



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

PEDRO ALEXANDRE PINTO CERQUEIRA BARROS

**PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIROLISE DE PODAS DE
FLAMBOYANT (DELONIX REGIA)**

PALMAS

2021

PEDRO ALEXANDRE PINTO CERQUEIRA BARROS

**PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE DE PODAS DE
FLAMBOYANT (DELONIX REGIA)**

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

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

**PALMAS
2021**

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

B277p Barros, Pedro Alexandre Pinto Cerqueira
 PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE PODAS DE
 FLAMBOYANT (DELONIX REGIA) / Pedro Alexandre Pinto Cerqueira
 Barros. – Palmas, TO, 2021.
 53 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, 2021.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Resíduos de poda. 2. Carvão ativado. 3. Pirólise. 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

PEDRO ALEXANDRE PINTO CERQUEIRA BARROS
PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE PODAS DE FLAMBOYANT
(DELONIX REGIA)

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 / 09 / 2021

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador
(IFTO)



Prof. Me. Michelle Ludmila Guedes dos Santos
(IFTO)



Eng. Civil Ranyere do Nascimento Lôbo

RESUMO

Nos últimos anos uma crescente problemática que vem ganhando espaço é a questão envolvida com os resíduos produzidos pelas atividades humanas. A quantidade de resíduos sólidos produzidos e coletados diariamente tem tomado proporções preocupantes, visto que se não forem corretamente destinados, esses resíduos podem causar danos ao meio ambiente, e aos próprios seres humanos, sendo necessária à busca por novas tecnologias para reutilização de resíduos sólidos. O flamboyant (*Delonix Regia*), é uma espécie ornamental muito utilizada para fins de paisagismo, devido a sua beleza. Os resíduos de poda do flamboyant podem ser expressivos, devido a sua quantidade em diversos locais. Este trabalho teve como objetivo utilizar o resíduo da poda de flamboyant no processo de pirólise para a produção de carvão ativado. A biomassa foi caracterizada através das análises imediatas: material volátil (84,56%), cinzas (3,84%) e carbono fixo (11,57%). Os experimentos de pirólise do resíduo foram realizados em mufla (marca MAGNUS), em duas temperaturas diferentes (350 e 550 °C) durante 30 minutos de degradação térmica na qual foram obtidas um rendimento da massa inicial do resíduo de 25,99% para a pirólise a 550° e de 35,49% para a pirólise a 350°C. Após os ensaios de pirólise, as amostras de carvão obtidas durante o processo foram coletadas, armazenadas e caracterizadas pelas mesmas técnicas analíticas empregadas com a biomassa *in natura* além do teste de adsorção de azul de metileno em mesa agitadora orbital no qual foi utilizado o planejamento multivariável do delineamento de faces centradas com 7 tipos de combinações de massa e concentração de corante, onde todos os resultados tiveram mais de 80% de eficiência, sendo o maior deles de 85,93%.

Palavras-chave: Flamboyant. Resíduos de Poda. Resíduos Sólidos. Carvão Ativado. Pirólise.

ABSTRACT

In recent years a growing problem that has been gaining space is the issue involved with the waste produced by human activities. The amount of solid waste produced and collected daily has taken on worrying proportions, since if not properly disposed of, this waste can cause damage to the environment, and to human beings themselves, being necessary to search for new technologies for the reuse of solid waste. The flamboyant (*Delonix Regia*), is an ornamental species widely used for landscaping purposes, due to its beauty. The pruning residues of the flamboyant can be expressive, due to their quantity in several places. This work aimed to use the flamboyant pruning residue in the pyrolysis process for the production of activated carbon. The biomass was characterized through immediate analysis: volatile material (84.56%), ash (3.84%) and fixed carbon (11.57%). The pyrolysis experiments of the residue were carried out in a muffle (MAGNUS brand), at two different temperatures (350°C and 550°C) during 30 minutes of thermal degradation, in which an initial residue mass yield of 25.99% was obtained for the pyrolysis at 550° and 35.49% for pyrolysis at 350°C. After the pyrolysis tests, the charcoal samples obtained during the process were collected, stored and characterized by the same analytical techniques used with *in Nature* biomass, in addition to the methylene blue adsorption test on an orbital shaker table in which multivariable planning was used the delineation of centered faces with 7 types of combinations of mass and dye concentration, where all results had more than 80% efficiency, being the highest of them 85.93%.

Keywords: Flamboyant. Activated Carbon. Pyrolysis. Pruning Residue. Solid Waste.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio e Simone por terem tornado possível toda essa jornada, dando todo apoio e suporte necessário, sem vocês nada disso seria possível. Aos meus irmãos Arthur, Rafael e Lucas por estarem sempre presentes como família, especialmente em memória do Arthur que como irmão mais velho tanto se preocupava com o futuro dos irmãos, com o futuro que teriam, estará sempre em nossos corações.

Aos meus tios Paulo e Margarida e meu Primo Gabriel, por serem parte fundamental da minha vida estando sempre presentes como família.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo, por ter me aceitado como orientando e ter feito um magnífico trabalho, se mostrando sempre a disposição, estando presente mesmo com as circunstâncias de um ano tão conturbado quanto o de 2021, um exemplo de pessoa e profissional que irei sempre lembrar e carregar como inspiração.

A Prof. Me. Michelle e ao engenheiro civil Ranyere por terem se prontificado a participar dessa banca e terem se mostrado tão prestativos e atenciosos deixando claro que estavam ali para ajudar e tirar dúvidas se preciso.

A minha amiga Ana Vitória pela amizade e companheirismo durante todos esses anos, sempre estando presente para momentos de descontração e para dar suporte nos momentos de dificuldade, sempre se mostrando uma verdadeira amiga.

Ao Instituto Federal do Tocantins, campus Palmas, pela oportunidade que me foi dada nos últimos 10 anos, estando presente em minha vida desde o ensino médio integrado, até minha formação no curso superior de bacharel em engenharia civil, tendo proporcionado um enriquecimento pessoal e intelectual imensurável, com uma vasta estrutura e profissionais dedicados e qualificados.

Aos meus colegas de turma que passaram por toda essa jornada comigo, foram diversas as vezes que enfrentamos os mesmos desafios, sem sombra de dúvidas foi enriquecedor ter conhecido e convivido com todos vocês.

Aos meus colegas e amigos Alessandro, Matheus e Kaio Henrique, que durante o percurso se tornaram amigos com os quais vivi diversos momentos, desde provas e trabalhos até festas e descontração.

Enfim, a todas as pessoas que durante essa jornada estiveram presentes de forma a contribuir ou incentivar nesse caminho para a conclusão deste trabalho e do curso, finalizando essa grande etapa em minha vida.

Muito obrigado!

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração mensal de RSU por área programa no estado do Tocantins.....	17
Tabela 2 – Estimativa da geração de resíduos de limpeza pública por área programa no Tocantins.....	18
Tabela 3 – Principais processos de pirólise de biomassa.....	29
Tabela 4 – Fatores e níveis utilizados no planejamento experimental.....	37
Tabela 5 – Ordem dos experimentos.....	37
Tabela 6 – Resultado da análise imediata da biomassa.....	39
Tabela 7 – Dados de rendimento do carvão obtidos durante o ensaio de pirólise.....	41
Tabela 8 – Análise estatística com teste-t considerando variância equivalente para a produção de carvão nos ensaios de pirólise.....	41
Tabela 9 – Comparativo entre os resultados de rendimento do carvão.....	42
Tabela 10 – Resultado da análise imediata do carvão ativado.....	43
Tabela 11 – Resultado do teste de adsorção sob efeito das duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração do corante)	44
Tabela 12 – Coeficiente de regressão do planejamento DFC.....	44
Tabela 13 – ANOVA para absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno	45
Tabela 14 – Coeficiente de regressão do planejamento DFC para definição da capacidade máxima de adsorção do carvão ativado.....	47
Tabela 15 – ANOVA para capacidade máxima de adsorção da absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno.....	49

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Flor de flamboyant.....	14
Figura 2 – Arvore de flamboyant	14
Figura 3 – Danos a estruturas.....	15
Figura 4 – Sementes de flamboyant.....	15
Figura 5 – Disposição final de RSU por tipo de destinação.....	16
Figura 6 – Disposição final de RSU na região norte	17
Figura 7 – Fluxograma de possíveis destinações finais para RSU.....	19
Figura 8 – Componentes das árvores.....	20
Figura 9 – Prensa de pistão mecânico para briquetagem.....	23
Figura 10 – Prensa de pistão hidráulico para briquetagem.....	24
Figura 11 – Matriz do tipo cilíndrica vertical.....	25
Figura 12 – Matriz do tipo plana.....	25
Figura 13 – Gaseificador contra corrente.....	26
Figura 14 – Gaseificador concorrente.....	26
Figura 15 – Esquema do processo pirolítico.....	27
Figura 16 – Fluxograma de pirólise rápida de leito líquido.....	28
Figura 17 – Diagrama dos procedimentos metodológicos abordados nesse trabalho.....	31
Figura 18 – Amostras coletadas na quadra 101 Sul Avenida LO-01.....	32
Figura 19 – Amostras coletadas na quadra 110 Norte Avenida NS-08.....	32
Figura 20 – Forno mufla para secagem (1)	33
Figura 21 – Forno mufla para secagem (2)	33
Figura 22 – Forno mufla para determinação do material volátil.....	34
Figura 23 – Forno mufla para pirólise (1)	35
Figura 24 – Forno mufla para pirólise (2)	35
Figura 25 – Mesa agitadora orbital	36
Figura 26 – Filtragem da concentração de azul de metileno	38
Figura 27 – Espectrofotômetro de duplo feixe	38
Figura 28 – Diagrama de Pareto da absorbância do carvão	45
Figura 29 – Valores observados X valores previstos para absorbância do carvão	46
Figura 30 – Superfície de resposta para absorbância do teste de adsorção com utilização do carvão ativado	47
Figura 31 – Gráfico de Pareto da capacidade máxima de adsorção (Q) do carvão	48
Figura 32 – Valores analisados X valores pressupostos da capacidade máxima de adsorção ..	49
Figura 33 – Gráfico de superfícies que representa a capacidade máxima de adsorção do carvão desta pesquisa	50

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS, ACÔNOMOS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABRALPE	Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais
SEISP	Secretaria de infraestrutura e serviços públicos
PNRS	Política nacional dos resíduos sólidos
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SNIS	Sistema nacional de informações sobre saneamento
PERS-TO	Plano estadual de resíduos sólidos do Tocantins
LARSEN	Laboratório de inovação em aproveitamento de resíduos e sustentabilidade energética do Tocantins
IFTO	Instituto federal do Tocantins
ASTM	American Society for Testing and Materials
DDC	Delineamento composto central
POM	Pequenos objetos de madeira
ETA	Estação de tratamento de água
°C	Graus Celsius
s	Segundo
Min	Minuto
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
HNO ₃	Ácido nítrico
NaOH	Hidróxido de Sódio
KOH	Hidróxido de Potássio
ZnCl ₂	Cloreto de Zinco
CO ₂	Dióxido Carbônico
Cm	Centímetro
g	Grama
mg	Miligrama
Kg	Quilograma
L	Litro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	OBJETIVOS.....	13
1.3.1	Objetivo Geral.....	13
1.3.2	Objetivos Específicos.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1	FLAMBOYANT, HISTÓRICO E MORFOLOGIA.....	13
2.2	A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	16
2.3	RESÍDUO DE PODA URBANA.....	19
2.4	BIOMASSA DE RESÍDUOS DE PODA URBANA.....	21
2.5	POSSÍVEIS DESTINAÇÕES PARA OS RESÍDUOS DE PODA URBANA.....	21
2.5.1	Pequenos objetos de madeira.....	22
2.5.2	Compostagem.....	22
2.5.3	Briquetagem.....	23
2.5.4	Paletização.....	24
2.5.5	Gaseificação.....	25
2.5.6	Combustão.....	26
2.5.7	Pirólise.....	26
2.5.7.1	Pirólise rápida.....	27
2.5.7.2	Pirólise lenta.....	28
2.6	PESQUISAS COM CARVÃO ATIVADO DE FLAMBOYANT.....	29
2.7	ADSORÇÃO.....	30
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	31
3.1	COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	31
3.2	PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	32
3.2.1	Análise imediata do resíduo.....	32
3.2.1.1	Umidade.....	33
3.2.1.2	Matéria volátil.....	34
3.2.1.3	Teor de cinzas.....	34
3.2.1.4	Teor de carbono fixo.....	35
3.4	PIRÓLISE DO RESÍDUO.....	35
3.5	PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO.....	35
3.5.1	ANÁLISE IMEDIATA DO CARVÃO.....	35
3.5.2	TESTE DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM MESA AGITADORA.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA.....	39
4.1.1	Análise imediata da biomassa.....	39
4.2	PIRÓLISE DE BIOMASSA E ATIVAÇÃO DE CARVÃO.....	40
4.2.1	Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de biomassa.....	40
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO.....	42
4.3.1	Análise imediata do carvão.....	42
4.3.2	Teste de adsorção de azul de metileno em mesa agitadora orbital.....	43

4.3.2.1	Absorbância do carvão.....	44
4.3.2.2	Capacidade máxima de adsorção.....	47
5.0	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Segundo o site do ministério do meio ambiente o Brasil abriga a maior biodiversidade do mundo, contendo cerca de 20% do número total de espécies do planeta. Além de ter tamanha diversidade, durante o período colonial, foram trazidas para o Brasil diversas outras espécies que não eram nativas dessa região como a cana de açúcar da Nova Guiné, o café da Etiópia, arroz das Filipinas, eucaliptos da Austrália, bovinos da Índia, carpas da China dentre outras espécies que, facilmente se adaptaram devido ao clima e solo do país (BRASIL, 2021).

O Flamboyant (*Delonix Regia*), é uma árvore ornamental com origem na ilha de Madagascar e que foi levada por todo o mundo devido sua beleza, com copas largas e flores vermelhas como fogo, o que a faz ser utilizada principalmente como elemento de paisagismo em parques, canteiros, bosques, dentre outros. Seu cultivo está presente em quase todo o território nacional, de norte a sul do país (JULCEIA, 2014).

Uma preocupação que vem cada vez mais tomando espaço e ganhando representatividade é a respeito do destino correto a ser dado aos resíduos sólidos gerados pelas atividades humanas. De acordo com Meira (2010), a falta de modelos para a gestão de resíduos da arborização urbana está contribuindo para agravar problemas ambientais, sociais e econômicos derivados da disposição inadequada desses materiais. Segundo o novo marco legal do saneamento, as grandes cidades e capitais tem até o ano de 2021 para acabar com lixões a céu aberto e se enquadrar na política nacional dos resíduos sólidos.

Segundo o plano estadual de resíduos sólidos do estado do Tocantins (PERS-TO), na capital Palmas, são geradas cerca de 1337,40 toneladas de resíduos de limpeza urbana mensalmente. O que representa 37% do total de resíduos de limpeza urbana gerados em todo o estado. A secretaria de infraestrutura e serviços públicos (SEISP) tem um cronograma mensal de coleta de galhas em Palmas e os trabalhos atentem todas as regiões da capital. As equipes percorrem ruas internas das quadras e avenidas coletando galhas descartadas após a poda de árvores (TOCANTINS, 2015).

No Brasil os resíduos de poda urbana são na sua grande maioria depositados em aterros ou lixões, contribuindo para a produção de metano e acelerando o preenchimento das valas e por consequência acelerando o esgotamento das áreas dos aterros (CORTEZ, 2011). De acordo com Martins (2013), em se tratando de madeira de poda, a deposição final em aterro sanitário consiste

em um desperdício de matéria com potencial energético, esses resíduos podem ser aproveitados como matéria prima para a fabricação de produtos sólidos, geração de energia por meio da fabricação de carvão, entre outros. Segundo a associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais (ABRELPE, 2019) o Brasil perde cerca de 14 bilhões de reais por ano com a falta de reciclagem de resíduos sólidos.

Uma alternativa viável que vem sendo estudada em diversos segmentos é a utilização de biomassa para a produção de adsorventes de baixo custo ou biossorventes. De acordo com Vieira (2012) a biomassa é todo material de caráter orgânico no qual através de fotossíntese, pode armazenar energia radiante do sol dentro sua composição química, podendo ser convertida em outras formas de energia. Segundo Machado (2019), são dois os principais tipos de tecnologias empregados na conversão de biomassa em energia, os processos termoquímicos e bioquímicos. A pirólise se trata de uma das principais tecnologias termoquímicas para essa conversão, na qual produtos como bio-óleo, carvão ativado e biogás são gerados.

Processos e métodos de tratamento como coagulação, floculação, biodegradação, separações de membrana, troca iônica, oxidação, processo de oxidação avançado e adsorção são usados para remover vários tipos de poluentes. Esses métodos tem algumas desvantagens, como elevada produção de lodo, processos lentos, capacidade limitada, grande consumo de energia, e podem requerer um ambiente favorável ideal. Adsorção, usando principalmente carvão ativado, é um método simples e economicamente viável de remoção de poluentes. Algumas de suas vantagens em relação aos outros métodos convencionais de tratamento incluem, a necessidade de uma área menor, menor sensibilidade a variações diurnas, e um design melhor ou flexibilidade operacional (M.M VARGAS et al., 2011)

O carvão ativado se tornou um dos mais importantes e amplamente usados adsorventes devido a sua porosidade interna altamente desenvolvida e grande área superficial, permitindo assim sua alta capacidade de adsorção. A demanda de carvão ativado tem crescido em vários tipos de indústrias, como a farmacêutica por exemplo, fazendo assim com que a demanda por carvão ativado cresça cada vez mais (RAMANGKOON et al., 2016).

Este trabalho consiste em avaliar a aplicabilidade da espécie de poda de árvore, Flamboyant (*Delonix Regia*), para a produção de carvão ativado através do processo de pirólise, visando a sua utilização industrial.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Os resíduos de poda urbana no Brasil, em sua grande maioria tem destinação inadequada, sendo depositados em aterros sanitários, lixões, terrenos baldios, dentre outros. Quando alocados nesses locais esse material pode representar um perigo, em lixões ou terrenos baldios esse resíduo pode representar risco de incêndio e poluir o ambiente em volta. Quando destinado a aterros sanitários esse resíduo resulta em custos excedentes para os municípios, aumenta os riscos de incêndio, compromete grandes áreas para disposição, auxiliando no rápido esgotamento de valas e pode ser motivo de poluição do ar e água. O destino inadequado desse material consiste no desperdício de materiais com potencial energético, de matéria-prima para fabricação de objetos ou da biomassa que poderia ser utilizada na geração de energia por processos como a pirólise. A pirólise é um processo que tem a capacidade de converter a biomassa desses resíduos de poda em matéria energética com novas aplicações, visto isso, qual a viabilidade do uso dos resíduos de poda do flamboyant para a produção de um carvão ativado com aplicações?

1.2 JUSTIFICATIVA

A arborização consiste em um elemento não só de paisagismo, a mesma também proporciona controle térmico, diminuição de ruídos, controle da umidade, redução da velocidade dos ventos, melhor qualidade do ar, sombreamento, dentre diversas outras vantagens estéticas e físicas que ela pode trazer para as cidades, pode-se dizer que a qualidade de vida de uma região está intimamente ligada à sua arborização (RESENDE, 2011).

No artigo 13 da política nacional dos resíduos sólidos são descritos como “resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.” A lei 11.445 de 2007 que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, também define os resíduos de limpeza pública como os provenientes dos serviços de capina, poda, varrição dentre outros.

As atividades de arborização geram uma grande quantidade de resíduos sólidos devido sua manutenção, que são as atividades de poda ou remoção, que devem ser feitas regularmente afim de se evitar problemas (SANTOS, 2019). De acordo com dados levantados pela PERS-TO, na cidade de Palmas, são geradas cerca de 1337,40 toneladas de resíduos de limpeza urbana mensalmente.

Em dados levantados pelo sistema nacional de informações sobre saneamento (SNIS 2019), no diagnóstico de manejo dos resíduos sólidos urbanos, consta que quase 60% dos resíduos provenientes de limpeza urbana são direcionados para aterros sanitários, aterros

controlados ou lixões, esse número pode estar defasado a grande quantidade de cidades que não enviam informações.

De acordo com Martins (2013), a destinação da biomassa proveniente de resíduos de poda para aterros e lixões consiste em maiores custos para os municípios, e contribuição para problemas ambientais como a poluição do ar e da água. Além disso o não aproveitamento desse material é um grande desperdício de energia que poderia ser convertida em diversos outros produtos.

A pirolise é um processo alternativo ao qual podem ser destinados materiais com potencial poluidor e também uma forma de agregação de valor a esses resíduos, por se tratar de um processo de conversão energética de biomassa. A degradação térmica dos componentes ocorre na ausência total ou parcial de oxigênio, e os produtos obtidos apresentam maior potencial energético em relação a biomassa empregada no processo (PEDROZA et al, 2017).

Visando a problemática dos resíduos de poda, seu descarte inadequado e desperdício de biomassa e a real necessidade pelo estudo de alternativas para destinação desses resíduos, será avaliada a viabilidade da produção de carvão ativado a partir dos resíduos de poda do flamboyant.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Utilizar o resíduo da poda de flamboyant para a preparação de carvão ativado através do processador de pirólise.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a biomassa a ser empregada nesta pesquisa;
- Efetuar a pirólise da poda de Flamboyant para obtenção de carvão;
- Caracterizar o carvão ativado resultante do processo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FLAMBOYANT, HISTÓRICO E MORFOLOGIA

O Flamboyant (*Delonix regia*), é uma árvore da família Fabaceae, também conhecida como leguminosa. Sua origem está na ilha de Madagascar, na África, e hoje está presente em quase todas as regiões de clima tropical e subtropical do mundo, desenvolvem-se bem em solos calcáreos, em lugares bem iluminados e com níveis pluviométricos tanto altos quanto baixos (RODRIGUES, 2012).

Seu nome, de origem francesa, significa flamejante, devido ao fato de que suas flores tem uma forte coloração vermelha como mostra a Figura 1. Estimasse que as primeiras mudas foram

tragas ao Brasil no século XIX, na mesma época do reinado de D. João VI. Apesar de ter maior incidência na região sudeste, o flamboyant pode ser encontrado por todo o país (JULCEIA, 2014).

Figura 1 – Flor de flamboyant



Fonte: arvoresdaufmt.wixsite.com acessado em (2021)

A copa do Flamboyant tem características que a fazem se assemelhar a um guarda-sol, sendo uma árvore com copa larga gerando uma grande sombra. Conforme Figura 2 seus galhos caídos e espalhados tendem a se inclinarem para baixo, fazendo com que sazonalmente sua poda seja necessária.

Figura 2 – Árvore de flamboyant



Fonte: Sitiodamata.com.br acessado em (2021)

As árvores de Flamboyant foram espalhadas ao redor do mundo com o intuito de serem utilizadas como árvores ornamentais, para fins paisagísticos. Porém, alguns cuidados devem ser tomados quando se vai escolher onde vão ser plantadas. O Flamboyant é árvore grande, com uma altura média de 5 a 10 metros existindo casos com mais de 30 metros, sua copa é ainda maior que sua altura, sendo assim uma árvore que ocupa um grande espaço. Além disso suas raízes são

rasas e fortes, são extensas e largas, fazendo com que não sejam indicadas para plantio em regiões onde tenham calçadas ou construções muito próximas, para evitar que essas raízes danifiquem o concreto ou até mesmo encanações como ilustrado na Figura 3. Sendo assim, são ideais para locais como parques, jardins, canteiros, campos abertos, praças públicas, no geral espaços com muito espaço e uma certa distância de edificações.

Figura 3 – Danos a estruturas



Fonte: Google imagens (2021)

Os frutos dos Flamboyant são vagens que podem ter de 30 centímetros a 70 centímetros de comprimento tendo internamente diversas câmaras seminais as quais juntas podem totalizar até 45 sementes como ilustrando na Figura 4. Essas sementes, além do artesanato rende uma goma que pode ser usada na indústria têxtil e alimentícia. Além disso, o extrato da casca do tronco mostrou ter possível ação antimicrobiana.

Figura 4 – Sementes de flamboyant



Fonte: arvoresdaufmt.wixsite.com acessado em (2021)

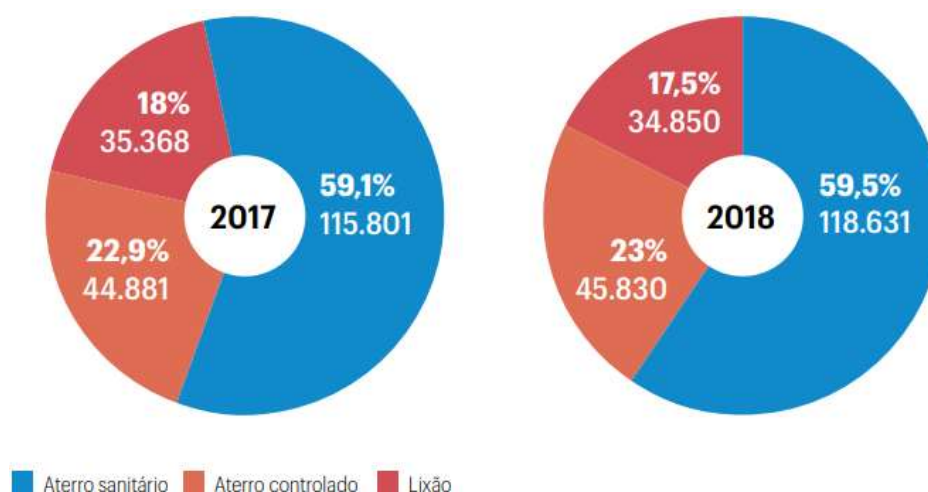
2.2 A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo decreto 7404, de 23 de dezembro de 2010, dispõe a política nacional dos resíduos sólidos (PNRS) no Brasil e define resíduos sólidos como “[...] material, substância objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.” (BRASIL, 2010).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) podem ser classificados quanto à sua origem e quanto a sua periculosidade, como consta no Art. 13 da PNRS (BRASIL, 2010). Quanto à origem, os resíduos podem ser divididos em domiciliares, de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais, resíduos da construção civil, da saúde, de atividades agrossilvopastoris, serviços de transporte, mineração e de serviços de saneamento básico

Atualmente, com mais de 10 anos, a lei ainda não teve grande efetividade, o fim dos lixões estava previsto para 2014, porém a meta não foi atingida. Recentemente foi estabelecido o novo marco legal do saneamento básico o qual prevê a extinção dos lixões até o ano de 2024. Porém, segundo a ABRELPE 23% dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil ainda tem como destino final os lixões, onde não existe nenhum aproveitamento do material descartado. A Figura 5 ilustra a disposição final dos resíduos sólidos urbanos no país conforme o tipo de destinação

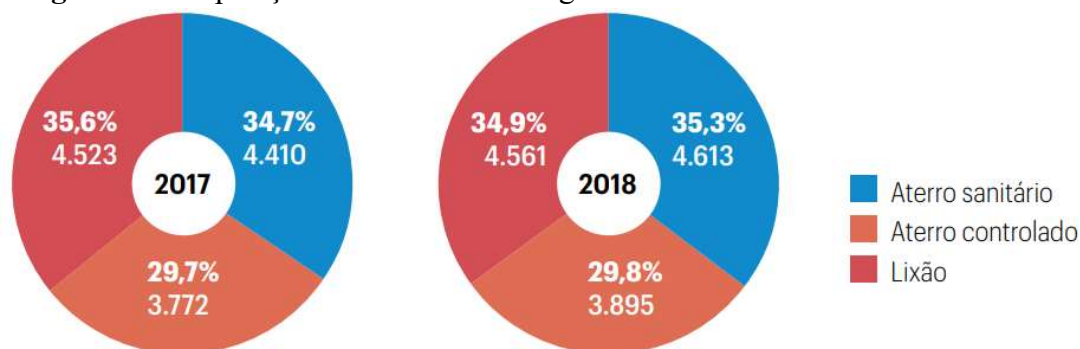
Figura 5 - Disposição final de RSU por tipo de destinação



Fonte: ABRELPE (2019).

A região norte do país, região com menor densidade populacional, gerou no ano de 2018 cerca de 16.073 toneladas de RSU por dia, das quais 81,31% foram coletadas. Mais de 4 mil toneladas diárias foram parar em lixões, o maior percentual dentre todas as regiões do país. A Figura 6 ilustra a disposição final dos resíduos sólidos urbanos na região norte do país.

Figura 6 – Disposição final de RSU na região norte



Fonte: ABRELPE (2019).

Segundo os dados levantados pelo plano estadual de resíduos sólidos do estado do Tocantins (PERS-TO), o estado gera mensalmente uma quantidade de 23.898,20 toneladas de resíduos sólidos, sendo que, a área-programa de Palmas representa 37% desse montante, gerando 8.877,15 toneladas de resíduos sólidos por mês, destacando que desses 8.877,15 tonelada por mês, 38,24% são de matéria orgânica. Na Tabela 1 pode-se observar esses dados.

Tabela 1 – Geração mensal de RSU por área programa no estado do Tocantins

Área programa	Estimativa Mensal (ton/mês)	% da geração mensal da área programa em relação ao total do estado do Tocantins
Palmas	8.877,15	37%
Araguaína	4.386,55	18%
Gurupi	2.304,86	10%
Paraíso	1.482,40	6%
Colinas	974,54	4%
Guaraí	895,21	4%
Augustinópolis	781,36	3%
Tocantinópolis	693,25	3%
Araguatins	601,09	3%
Dianópolis	495,33	2%
Pedro Afonso	416,05	2%
Xambioá	392,93	2%
Natividade	341,90	1%
Novo Acordo	317,75	1%
Taguatinga	277,88	1%
Arraias	251,17	1%

Goiatins	207,60	1%
Paranã	201,20	1%
Total para o estado do TO	23.898,20	100%

Fonte: PERS-TO (2015).

A Lei Federal 11.445/2007 (BRASIL, 2007) define os resíduos de limpeza pública como os provenientes dos serviços de: poda, capina, varrição dentre outros. Os municípios do Tocantins não adotam medidas para fazer o controle quanto a esses tipos de resíduos, de tal forma utilizando-se o valor indicado pelo manual de orientação do meio ambiente para elaboração de plano de gestão de resíduos sólidos, pode-se estimar que 15% dos RSU gerados em determinada localidade equivalem aos resíduos de limpeza pública. Ainda segundo a PERS-TO a estimativa de geração de resíduos de limpeza pública em Palmas é de 1.337,40 toneladas por mês, representando 37% do total no estado. A Tabela 2 mostra uma estimativa da geração de resíduos de limpeza pública no estado do Tocantins.

Tabela 2 – Estimativa da geração de resíduos limpeza pública por área programa no Tocantins

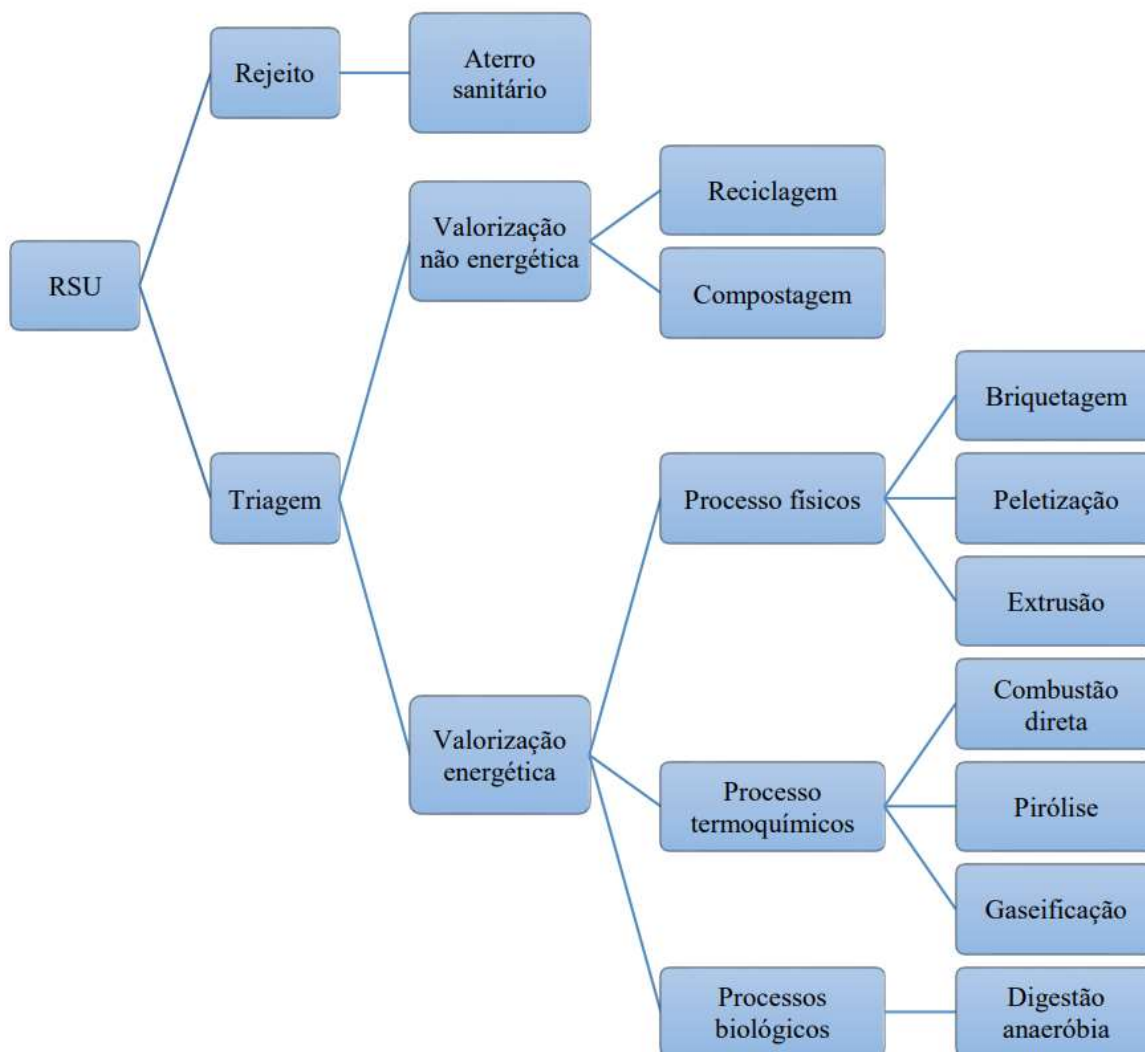
Fonte: PERS-TO (2015)

Área programa	Estimativa de geração de resíduos de limpeza pública (ton/mês)	% em relação ao total
Palmas	1.337,40	37%
Araguaína	657,98	18%
Gurupi	345,73	10%
Paraíso	222,36	6%
Colinas	146,18	4%
Guaraí	134,28	4%
Augustinópolis	117,20	3%
Tocantinópolis	103,99	3%
Araguatins	90,16	3%
Dianópolis	74,30	2%
Pedro Afonso	62,41	2%
Xambioá	58,94	2%
Natividade	51,28	1%
Novo Acordo	47,66	1%
Taguatinga	41,68	1%
Arraias	37,68	1%
Goiatins	31,14	1%
Paranã	30,18	1%
Total para o estado do TO	3.590,56	100%

Fonte: PERS-TO (2015)

A PNRS determina que qualquer tipo de resíduo passível de reutilização ou reciclagem, não podem ser dispostos em aterros sanitários. Visto isso, há uma constante necessidade de estudos a respeito de potenciais meios de reutilização de resíduos, dentre esses, os resíduos de poda urbana. A Figura 7 ilustra possíveis destinação aos resíduos sólidos urbanos de forma que respeitem a PNRS.

Figura 7 – Fluxograma de possíveis destinações finais para o RSU



Fonte: Silva (2016)

2.3 RESÍDUO DE PODA URBANA

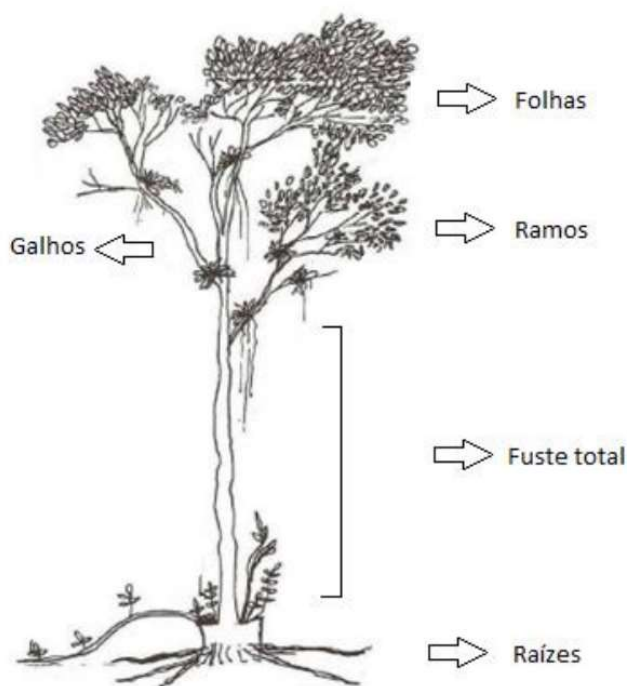
A qualidade de vida urbana está diretamente relacionada a arborização, visto que essa trás diversos benefícios como controle da umidade, diminuição de ruídos sonoros, redução da velocidade dos ventos, conforto térmico, melhorias da qualidade do ar, dentre outros (RESENDE, 2011). Porém a grande maioria das cidades Brasileiras não contam com projetos de

arborização urbana, o que gera diversos problemas de conflitos entre o uso de espaço terrestre e aéreo, o que leva a podas drásticas ou remoção das árvores.

Segundo Meira (2011), relatos históricos apontam que a poda foi trazida ao Brasil pelos europeus para o tratamento de árvores frutíferas, visando uma maior e melhor produção de frutos. A poda se trata de uma prática antiga, utilizada em jardins e parques, com o intuito de estimular a produção de flores. No meio urbano a poda surge com fins estéticos e fitossanitários

De acordo com o caderno técnico de arborização da Umuarama no Paraná, na arborização, a poda pode assumir quatro tipo de finalidades, a poda de formação, onde os ramos laterais são retirados até uma altura recomendada visando não prejudicar o trânsito de pedestres e veículos, a poda de limpeza, na qual eliminam-se os ramos velhos em excesso, poda de contenção, com a finalidade de adequar a copa da árvore ao espaço que se tem disponível, e a poda emergencial, que é feita para remover partes da árvore que ameacem a segurança de pessoas, edificações ou instalações. Na Figura 8 é ilustrado os componentes das árvores.

Figura 8 – Componentes das árvores



Fonte: Silva (2016)

Para se obter mais informações a respeito dos resíduos de poda, foram consultados os dados do “diagnostico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2008”, o qual e elaborado pelo Sistema nacional de informações sobre saneamento (SNIS), vinculado à secretaria nacional de saneamento ambiental e meio ambiente. Neste, foi relatado que dentro os resíduos de poda urbana

declarados no Brasil, 56% são encaminhados para aterros, sendo 34% para aterros sanitários sendo, 2% para aterros controlados, e 20% para aterros sem definição de tipo. Como muitos municípios se quer enviaram seus dados, o levantamento ainda teria muito a coletar, porém, pode-se perceber que a grande maioria dos resíduos de poda no Brasil não recebem a destinação adequada.

Os resíduos de poda urbana têm grande potencial de utilização devido a sua abundância e independência do mercado econômico. Além disso as empresas ou órgãos que realizam esses serviços geralmente se programam para executar as atividades ao longo do ano, para que não fiquem sobrecarregadas em períodos de chuva e ventos, assim há uma demanda de resíduos durante todo o ano. Uma das maiores dificuldades quanto a reutilização dos resíduos de podas se dá a má organização e gestão dos mesmos, não há se quer o controle da quantidade gerada, assim, esse material que poderia ser aproveitado de diversas maneiras acaba indo parar em lixões e aterros, representando mais um risco ambiental.

2.4 BIOMASSA DE RESÍDUOS DE PODA URBANA

Entre o final do século passado e início desse século, o carvão e a lenha foram as principais fontes de energia utilizadas pelo ser humano até serem substituídas pelo petróleo. As crises do petróleo na década de 70 evidenciou a dependência mundial desse insumo, desde então buscaram-se por alternativas para produção de energia, a biomassa está entre os possíveis materiais a serem utilizados (GOMES, 2002).

Segundo Genovese *et al.* (2006) a biomassa pode ser descrita como a matéria orgânica da terra, principalmente resíduos de plantas e sendo que no campo da energia, o termo biomassa é usado para descrever toda forma de plantas e derivados com potencial de serem convertidas em energia, alguns exemplos desses materiais são madeiras de resíduos urbanos, grãos, talos, lodo de tratamento biológico de efluentes, dentre outros.

A biomassa oriunda dos resíduos de poda pode ser descrita como os galhos, trocos, folhas, toras e todo material vegetal coletado durante os processos de poda ou remoção de árvores, sejam esses realizados por empresas ou pelos próprios cidadãos.

2.5 POSSÍVEIS DESTINAÇÕES PARA OS RESÍDUOS DE PODA URBANA

A deposição de resíduos como os de madeira de poda em aterros e lixões, traz consigo diversos problemas, custos excedentes para os municípios, compromete grandes áreas para disposição, aumenta o risco de incêndio, deterioração da paisagem, poluição do ar e da água, dentre outros, MARTINS (2013). O reaproveitamento desses materiais além de evitar

possíveis danos ao meio ambiente ainda pode trazer diversos benefícios como a geração de novos empregos.

Segundo Cortez (2011), podemos dividir os resíduos de poda em dois possíveis grupos de aproveitamento, o grupo sem aproveitamento energético, e o grupo com aproveitamento energético. No grupo sem aproveitamento energético podemos citar de exemplo duas aplicações, a reutilização para aproveitamento em confecção de pequenos objetos de madeira, por meio de artesanatos, obras de artes, entre outros, e a reutilização na compostagem, também conhecida como reciclagem orgânica. Já se tratando do grupo com aproveitamento energético pode-se citar processos físicos (briquetagem e paletização), termoquímicos (gasificação, combustão, pirólise) e biológicos (digestão anaeróbia).

2.5.1 PEQUENOS OBJETOS DE MADEIRA (POM)

Os resíduos de poda podem ser destinados a fabricação de POM como artesanatos, peças decorativas, brinquedos, artigos domésticos, dependendo do diâmetro dos galhos.

Em pesquisa realizada por Lopes (2009), foram desenvolvidos e aprovados 17 objetos fabricados com resíduo de madeira, dentre eles porta-retratos, porta canetas, relógios, revisteiros, luminárias e diversos outros. Esse tipo de atividade tem a capacidade de impulsionar uma geração de empregos e renda para comunidades e trabalhadores não qualificados. Lopes (2009), afirma ainda que um dos fatores da viabilidade econômica desse tipo de atividade é que a matéria prima em grande parte dos casos pode ser adquirida de forma gratuita.

2.5.2 COMPOSTAGEM

A compostagem é um termo associado ao tratamento de resíduos orgânicos, segundo Oliveira (2008), a compostagem é um processo aeróbio controlado, desenvolvido por uma população de microrganismos, efetuada em duas fases: quando ocorrem as reações bioquímicas mais intensas, e a segunda fase que consiste na maturação e o processo de humificação. São diversas as metodologias conhecidas para se fazer compostagem, no final, o produto obtido pode ser utilizado em adubamentos de diversas formas.

Segundo Cortez, et al. (2009) a compostagem pode ser um procedimento para valorizar e reaproveitar a matéria orgânica dos resíduos de poda, dando origem a um produto estabilizado denominado “composto”, o qual pode ser aplicado no solo com várias vantagens sobre fertilizantes químicos de síntese. Mangueira, *et al.* (2019) descreveu sobre o caso da URBFOR,

empresa responsável por executar os serviços de poda na cidade de Fortaleza, a qual realiza compostagem de parte dos resíduos gerados durante o serviço, sendo o composto gerado utilizado no Horto Florestal responsável por cultivar e fornecer as plantas que compõem o paisagismo da capital. Os autores ainda destacam que a compostagem é um meio ambientalmente correto e seguro para a reciclagem e reutilização dos restos de poda, potencializando a reutilização dessa biomassa.

2.5.3 BRIQUETAGEM

A biomassa - em sua forma original - é difícil de usar com sucesso como combustível em aplicações de grande escala porque é volumosa, úmida e dispersa. A densificação da biomassa representa tecnologias para converter resíduos de plantas em combustível. Essas tecnologias também são conhecidas como peletização, briquetagem ou aglomeração, o que melhora as características de manuseio dos materiais para transporte, armazenamento, etc TUMULURU *et al.*, (2010).

A briquetagem pode ser realizada usando uma prensa de pistão mecânico ou hidráulico, ou uma prensa de rolos. Na prensa de pistão mecânico a matéria prima é alimentada e compactada em uma matriz por meio de um pistão ligado a um grande volante que força e se movimenta alternadamente, gerando os briquetes. A Figura 9 apresenta uma prensa de pistão mecânico.

Figura 9 – Prensa de pistão mecânico para briquetagem



Fonte: Google imagens (2021)

A prensa de pistão hidráulico apresenta um mecanismo semelhante à de pistão mecânico, porém nessa, a compressão se dá com pressões e temperaturas mais baixas. No processo o pistão é acionado hidráulicamente e o material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Na Figura 10 pode-se observar uma prensa de pistão hidráulico.

Figura 10 – Prensa de pistão hidráulico para briquetagem



Fonte: Google imagens (2021)

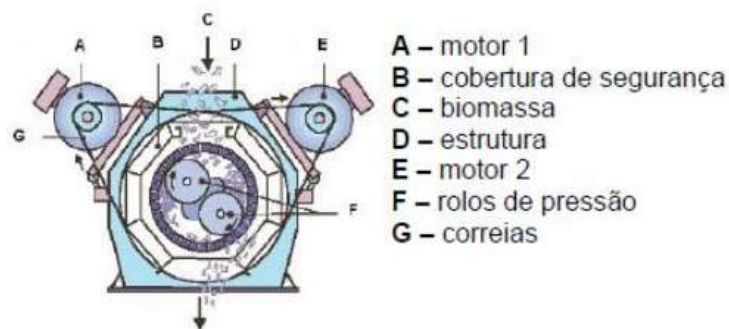
Segundo Lins e Rodrigues (2018), o briquete feito com madeira de poda urbana tem grande potencial de mitigação do aquecimento global, visto que o carbono em sua composição é neutro, foi absorvido da atmosfera durante o crescimento e desenvolvimento da árvore, concluindo que o processo de briquetagem é ambientalmente viável.

2.5.4 PALETIZAÇÃO

Segundo Tumuluru et al. (2010), a peletização e a briquetagem são aplicadas há muitos anos em vários países. William Smith foi o primeiro a obter uma patente nos Estados Unidos em 1880 para densificação de biomassa. Usando um martelo a vapor (a 66 ° C), Smith compactou resíduos de serrarias. A paletização se assemelha a briquetagem exceto por alguns fatores. Na paletização se usam máquinas menores, que geram produtos densificados menores, chamados de pallets.

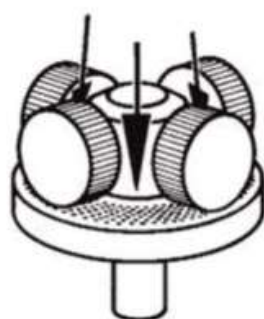
São dois os tipos de prensas de pallets, as de matriz do tipo cilíndrica, na qual o material é alimentado dentro de uma câmara entre a matriz e os rolos, e a matriz tipo plana, na qual a compressão se baseia numa matriz plana e redonda equipada com rolos de compressão sobre a superfície. Nas Figuras 11 e 12 pode-se observar respectivamente a matriz do tipo cilíndrica e a matriz do tipo plana

Figura 11 – Matriz do tipo cilíndrica vertical



Fonte: Silva (2006)

Figura 12 – Matriz do tipo plana

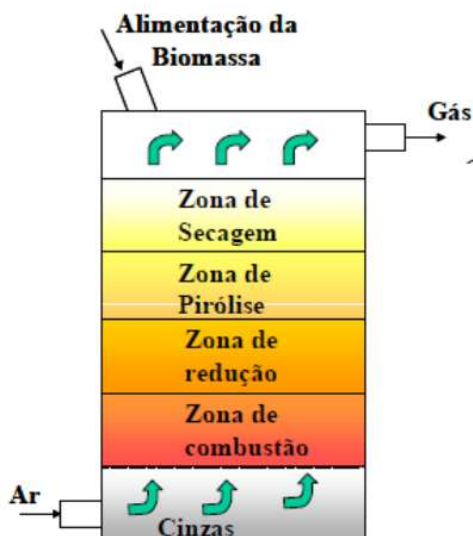


Fonte: Silva (2006)

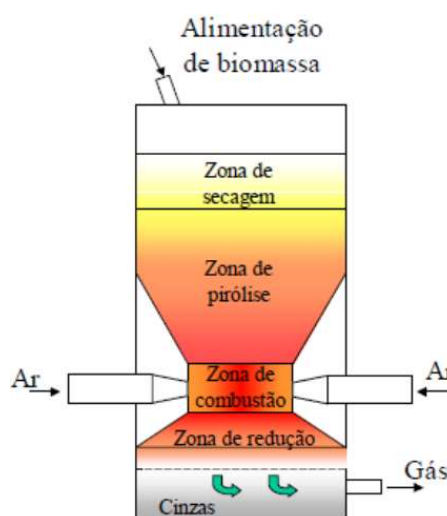
2.5.5 GASEIFICAÇÃO

Segundo Sila (2016), a Gaseificação consiste no processo de conversão térmica de combustíveis sólidos ou líquidos em um combustível gasoso, através de uma oxidação em quantidades inferiores a estequiometria (mínimo teórico para combustão), em elevadas temperaturas. O gás oriundo do processo de gaseificação de biomassa tem vários tipos de aplicações como a queima em motores de combustão ou turbinas para geração de energia, matéria prima para produção de combustíveis, geração de calor dentre outros (CORTEZ, 2009).

O processo de gaseificação pode ser utilizado facilmente com ganhos no desempenho ambiental e na eficiência quando comparados a combustão direta da biomassa. Essa tecnologia é interessante para a utilização com resíduos como palha, folhas e caules, os quais tem um poder calorífico considerável, sendo viáveis para a geração de energia (CHAVES, 2007). As Figuras 13 e 14 apresentam respectivamente um gaseificador do tipo contra corrente e um gaseificador do tipo concorrente.

Figura 13 – Gaseificador contra corrente

Fonte: Google Imagens (2021)

Figura 14 – Gaseificador concorrente

Fonte: Google Imagens (2021)

2.5.6 COMBUSTÃO

Combustão é um simples processo de decomposição térmica que produz calor para geração de energia. Porém, não é um processo confiável do ponto de vista ambiental, pois gera alto teor de dióxido de carbono e outros gases nocivos, e tem baixa eficiência térmica (VARMA, et al. 2019)

Segundo Genovese, *et al.* (2006), uma das formas de utilização da biomassa é através da combustão, ou queima direta para a produção de energia térmica e elétrica. Os autores citam ainda que há muitas vantagens na utilização de biomassa como combustível, como baixo conteúdo de enxofre, as emissões de CO₂ podem ser consideradas quase nulas pois o gás é reabsorvido no próximo ciclo de vida, além de uma baixa quantidade de cinzas em comparação ao carvão mineral.

2.5.7 PIROLÍSE

A pirólise, ou carbonização pode ser dita como o mais antigo processo de conversão de um combustível em outro de melhor qualidade, no caso o processo de carbonização mais rudimentar, utilizando fornos de tijolo e argila. Nessa atividade o material (lenha) é aquecido a temperaturas entre 300°C a 650°C na ausência de oxigênio, sendo que neste, a pirólise é limitada a fabricação exclusiva de carvão vegetal (GOMEZ, 2019 e GENOVESE, 2006)

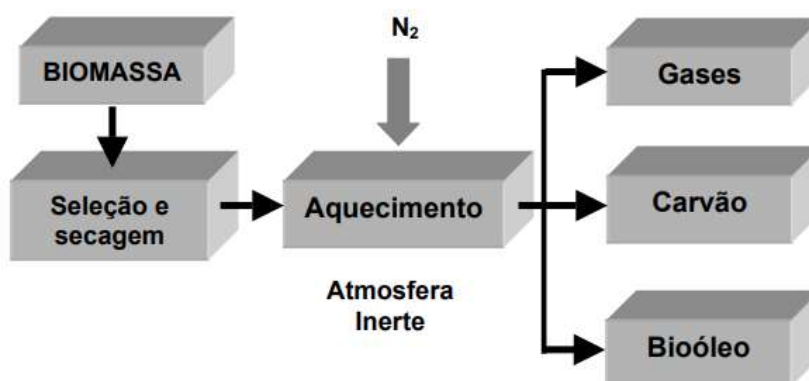
Segundo Gomez (2019), dentre as tecnologias com capacidade de conversão térmica de biomassa, a pirólise se destaca devido a sua grande flexibilidade, permitindo que o processo seja conduzido na direção que mais favorecer a obtenção de um ou outro subproduto (sólido, líquido

ou gasoso). Essa possibilidade de produzir produtos de maior valor agregado e especialidades químicas faz da pirólise uma opção muito atraente dentre as atuais iniciativas por busca de fontes renováveis de energia.

A pirólise pode ser descrita como um processo endotérmico realizado na ausência de oxigênio, a qual pode constituir como produtos finais o carvão, gases e bio-óleo, sendo que a constituição da biomassa e as condições de operação do reator, são fatores influenciáveis na composição dos produtos gerados pelo processo (PEDROZA et al. 2017).

Segundo Cardoso (2004), todos os sistemas de pirólise de biomassa seguem os mesmos princípios, calor é fornecido a biomassa em um ambiente na ausência de oxigênio (inerte), os vapores oriundos do aquecimento são separados e condensados, obtendo assim uma fração sólida carbonosa, e fração gasosa não condensável como demonstrado na Figura 15. Além disso através de um controle mais rigoroso ainda pode-se obter uma quantidade maior de líquidos orgânicos.

Figura 15 – Esquema do processo pirolítico



Fonte: Cardoso (2004)

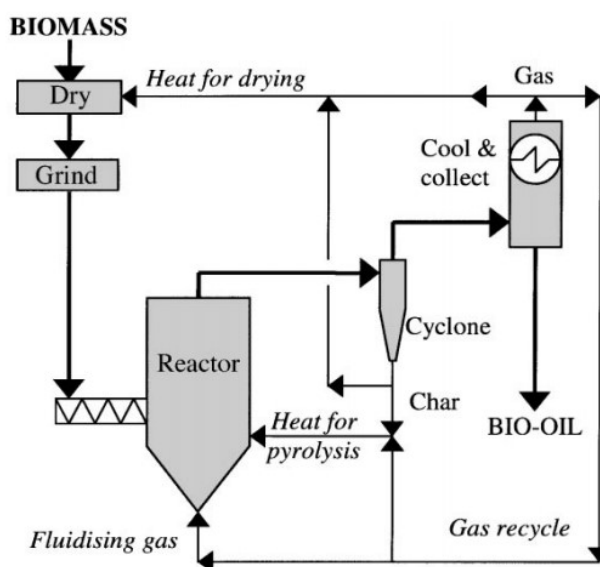
2.5.7.1 PIRÓLISE RÁPIDA

A pirólise rápida é uma forma inovadora de pirólise de materiais orgânicos, algumas de suas características são as elevadas taxas de transferência de calor e massa, pequenos tempos de residência e temperaturas moderadas. A pirólise rápida oferece elevados rendimentos líquidos, o bio-óleo, que em algumas situações pode chegar a até 70% (GOMEZ, 2019).

Segundo Peacocke *et al.* (1996), ao se controlar os principais parâmetros do processo de pirólise, temperatura do reator, tempo de residência do produto de gás/vapor, tamanho da matéria-prima, teor de umidade, podem ser obtidos altos rendimentos líquidos, líquidos esses com alto rendimento para uso como combustível ou fonte de especialidades químicas.

A pirólise rápida é um processo de alta temperatura no qual a biomassa é rapidamente aquecida na ausência de oxigênio. Como resultado, ele se decompõe para gerar principalmente vapores óleo e algum carvão. A produção de líquido requer um tempo de residência de vapor muito baixo para minimizar as reações secundárias de normalmente 1 s. Após o resfriamento e a condensação, um líquido móvel marrom escuro é formado, o qual tem um valor de aquecimento de cerca da metade do óleo combustível convencional (BRIDGWATER, 1999). A figura 16 demonstra esquematicamente o fluxograma do processo de pirólise rápida.

Figura 16 – Fluxograma de pirolise rápida de leito líquido



Fonte: Bridgwater 1999

2.5.7.2 PIRÓLISE LENTA

O processo de pirólise lenta trata-se da conversão térmica na qual a biomassa, após seleção e eliminação de umidade, é submetida a um aquecimento em baixas temperaturas, baixas taxas de aquecimento, e um elevado tempo de residência sob a atmosfera inerte. Em se tratando de pirólise lenta de resíduos de madeira, os parâmetros de temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e tamanho de partícula empregada influenciam significativamente nos rendimentos de gases e carvão, porém para o bio-óleo não há o mesmo efeito (CARDOSO, 2004).

A pirólise lenta decompõe termicamente compostos em fragmentos menores, o processo envolve a desidratação e a descarboxilação a baixas temperaturas. Com o aumento da temperatura no processo de pirólise, há uma redução do rendimento do composto sólido, o carvão, e um aumento do gás. O rendimento do bio-óleo fica na faixa de 500°C a 600°C (MOREIRA, 2015). Na Tabela 3 é possível observar os principais tipos de pirólise e seus respectivos produtos.

Tabela 3 – Principais processos de pirólise de biomassa

Processo de pirólise	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura (°C)	Produtos obtidos
Carbonização	Dias	Muito baixa	400 450	Carvão vegetal
Lenta	5 a 30 min	baixa	até 600	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 a 5s	Muito alta	550 a 650	Bio-óleo
Flash-líquido	Menos de 1s	Alta	Inferior 650	Bio-óleo
Flash-gás	Menos de 1s	Alta	Superior a 650	Produtos químicos e gás combustível

Fonte: Moreira (2015)

2.6 PESQUISAS COM CARVÃO ATIVADO DE FLAMBOYANT

Carvão ativado é o nome de um grande grupo de materiais que apresentam alto grau de porosidade e, conseqüentemente, extensa área superficial interna, com propriedades adsorptivas de caráter físico e químico. Inúmeros materiais podem ser utilizados como precursores, especialmente biomassa (RIMOLI, et al. 2019)

A preparação dos carvões ativados consiste em duas etapas principais: carbonização de uma matéria-prima carbonácea e ativação do carvão vegetal (IONNIDOU e ZABANITOU, 2006). A ativação pode ser feita com gases como dióxido de carbono, vapor e outros (ativação física) ou desidratantes e oxidantes como H_3PO_4 , H_2SO_4 , HNO_3 , $NaOH$, KOH e $ZnCl_2$ (ativação química). A ativação química é amplamente empregada na preparação de carvão ativado (VARGAS et al., 2011).

A ativação física é um processo de duas etapas. Envolve a carbonização de um material carbonáceo seguida pela ativação do carvão resultante em temperatura elevada na presença de gases oxidantes adequados, como dióxido de carbono, vapor, ar ou suas misturas. O gás de ativação geralmente é o CO_2 , pois é limpo, fácil de manusear e facilita o controle do processo de ativação devido à lenta taxa de reação em temperaturas em torno de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (IONNIDOU e ZABANITOU, 2006).

Ionnidou e Zabanitou, (2006) descrevem ainda que no processo de ativação química as duas etapas são realizadas simultaneamente, sendo o precursor misturado a agentes ativadores químicos, como desidratantes e oxidantes. A ativação química oferece diversas vantagens por ser realizada em uma única etapa, combinando carbonização e ativação, realizada em temperaturas mais baixas e, portanto, resultando no desenvolvimento de uma melhor estrutura porosa, embora as preocupações ambientais do uso de agentes químicos para ativação possam ser desenvolvidas.

Em estudo com carvão ativado feito com as vagens de flamboyant, Vargas et al. (2009) constatou que o desenvolvimento de porosidade de carvões ativado está diretamente associado a taxa de impregnação utilizada durante a ativação química, no carvão ativado produzido na pesquisa foram identificadas áreas superficiais maiores do que a de vários carvões ativados encontrados na literatura. A ressonância magnética nuclear de estado sólido mostrou que as estruturas lignocelulósicas foram completamente transformadas em um material policíclico após o processo de ativação enquanto a termogravimétrica mostrou uma alta resistência térmica. Imagens de microscopia eletrônica e varredura mostraram alto desenvolvimento de poros. Concluiu-se então que os frutos da árvore de flamboyant são um potencial material precursor para produção de carvão ativado.

Em estudo sobre a otimização de carvão ativado preparado com frutos de flamboyant utilizando NaOH como base química para ativação, Vargas et. al. (2010) chegou a conclusão de que a temperatura de ativação e a taxa de impregnação são os fatores que mais influenciam na produção dos carvões ativados. O carvão ativado ótimo foi obtido a uma temperatura de ativação de 761,70°C, tempo de ativação de 0,86h e taxa de impregnação de 3,46, que levaram a uma área de superfície de 2854m²g⁻¹, a um volume microporoso de 1,44cm³g⁻¹ e valores de rendimento de 10,80%. As características do material obtido possibilitam sua aplicação na adsorção de gás.

2.7 ADSORÇÃO

A adsorção pode ser descrita como um processo físico químico no qual componentes gasosos ou líquidos são adsorvidos (transferidos) para a superfície de um sólido (adsorvente). O conceito de adsorvente aplica-se a um sólido que mantém o soluto em sua superfície através de forças físicas, sendo que a substância adsorvida é o adsorvato (ROUQUEROL *et al.*, 2014).

A adsorção pode ser separada em fisissorção e quimissorção (adsorção física e química). A adsorção física se dá quando as forças intermoleculares de atração entre moléculas do fluido e da superfície sólida são maiores que as forças atrativas entre as moléculas do próprio fluido. A adsorção física é reversível, de forma que o adsorvente possa ser usado mais vezes (LUCENA, 2014).

A adsorção física que também pode ser chamada de Van der Waals, é um processo rápido e reversível devido ao fato de que a força de atração intermoleculares são fracas entre o adsorvente e as moléculas adsorvidas, além de que, pelo fato de não haver formação de quebra de ligações, a natureza química do adsorbato não é alterada. Outro detalhe é que podem haver várias camadas de moléculas adsorvidas (SCHNEIDER, 2008).

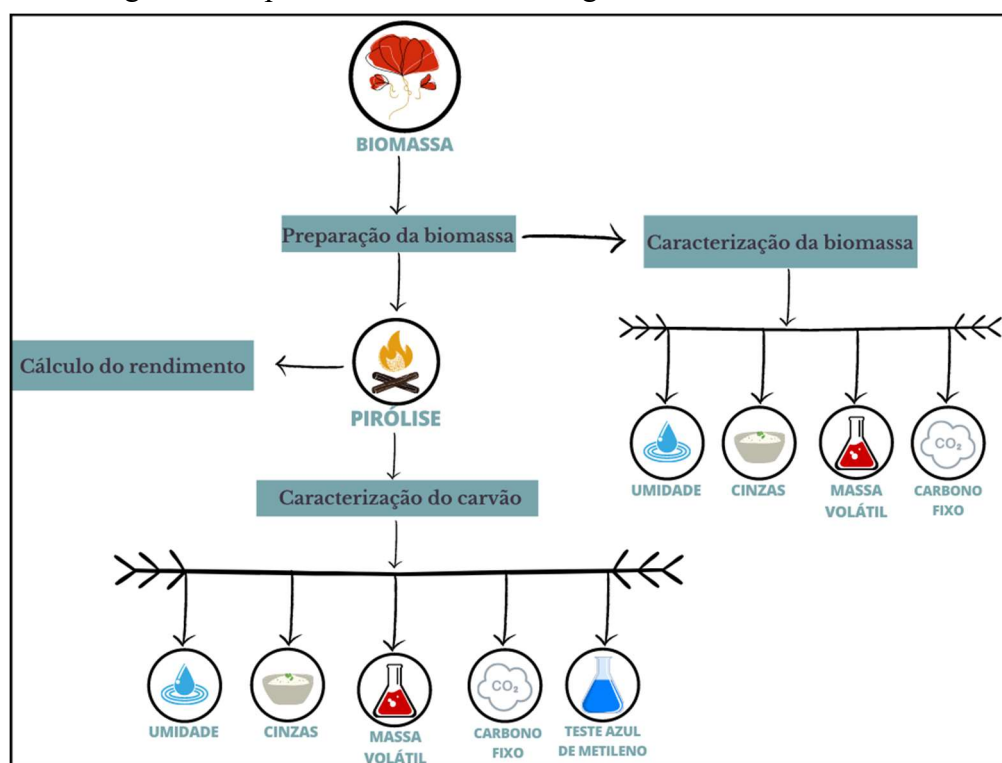
Em se tratando da remoção de contaminantes decorrentes de diversos processos, a adsorção em fase líquida tem sido amplamente utilizada. Em certos casos essa metodologia é aplicada visando a remoção de um contaminante em específico, já em outros o objetivo é apenas a melhoria de algumas propriedades como cor, paladar, odor e outros (BRANDÃO, 2006).

Os carvões ativados são um dos adsorventes mais utilizados pela indústria, utilizados desde o tratamento de água e de efluentes, até como catalisadores. Eles podem ser utilizados no tratamento de poluentes atmosféricos, para adsorção de compostos orgânicos, para remoção de pesticidas, metais pesados, dentre outros (SCHNEIDER, 2008).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia a ser usada nessa pesquisa é baseada no diagrama esquemático da Figura 17.

Figura 17 – Diagrama dos procedimentos metodológicos abordados nesse trabalho.



Fonte: Autor (2021)

3.1 COLETA E PREPARO DA AMOSTRA

A amostra da pesquisa foi a semente da vagem da árvore de Flamboyant, a vagem gera diversos resíduos e um grande volume de material. A amostra foi adquirida através de coleta em canteiros da cidade de Palmas-TO, na qual pode-se encontrar exemplares da espécie por diversas partes da cidade. As Figuras 18 e 19 apresentam os locais onde foram realizadas as coletas.

Figura 18 – Amostras coletadas na quadra 101 sul Avenida LO-01



Fonte: Autor (2021)

Figura 19 – Amostras coletadas na quadra 110 norte Avenida NS-08



Fonte: Autor (2021)

As vagens foram coletadas nas arvores e seus arredores, após a coleta as mesmas foram levadas para o laboratório de inovação em aproveitamento de resíduos e sustentabilidade energética (LARSEN) do Instituto federal do Tocantins (IFTO), campus Palmas, onde foi realizada a retirada das sementes de dentro das vagens.

3.2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DO RÉSIDUO

3.2.1 ANÁLISE IMEDIATA DO RESÍDUO

As análises imediatas do resíduo foram realizadas no laboratório de inovação em aproveitamento de resíduos e sustentabilidade energética do Tocantins (LARSEN) – campus Palmas.

3.2.1.1 UMIDADE

Para a obtenção da umidade do resíduo de poda foi utilizada a metodologia aplicada por Rodrigues (2019) e Pedroza (2011), que executaram de acordo com a norma ASTM D 3173-87, foi adicionado aproximadamente 1g do resíduo a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Feito isso, a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 110°C por um período de 60 minutos como ilustrado nas Figuras 20 e 21. Em seguida, o cadinho foi colocado em um dessecador por 10 minutos e logo após foi pesado. Este procedimento foi realizado em triplicata. O teor de umidade foi determinado segundo a Equação (1), descrita da seguinte forma.

$$\% \text{ Umidade} = (A-B) / C \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

A= peso do cadinho + amostra, g;

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

C= peso da amostra, g.

Nessa pesquisa a biomassa foi analisada em base seca.

Figura 20 – Forno mufla para secagem (1)



Fonte: Autor (2021)

Figura 21 – Forno mufla para secagem (2)



3.2.1.2 MATERIAL VOLÁTIL

Seguindo a metodologia de SÁNCHEZ *et al.* (2009), a determinação do teor de material volátil da biomassa do resíduo de poda de flamboyant foi realizada adicionando aproximadamente 1g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Posteriormente a amostra foi aquecida em uma mufla à temperatura de 850 °C, na ausência de oxigênio, durante 7 minutos, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Forno mufla para determinação do material volátil



Fonte: Autor (2021)

O teor de material volátil foi determinado pela Equação 2.

$$\% \text{Material Volátil} = (((P+P_0)-P_3)/P_0) \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

P= peso do cadinho vazio, g;

P₀= peso da amostra inicial, g;

P₃= peso do cadinho + amostra final, g.

3.2.1.3 TEOR DE CINZAS

O teor de cinzas foi determinado conforme o método sugerido por SANCHEZ *et al.*, (2009) e executado por Rodrigues (2019). Uma massa de aproximadamente 1g do resíduo foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi aquecida em mufla de marca Coel modelo Hm, a uma temperatura de 710 °C durante 60 minutos. Na sequência o cadinho foi colocado em um dessecador por 1 hora e posteriormente pesado. O teor de cinzas foi determinado de conforme a Equação 3.

$$\% \text{Cinzas} = (A / B) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

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

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

3.2.1.4 TEOR DE CARBONO FIXO – CF

Aplicando a metodologia utilizada por Pedroza (2011), o teor de carbono fixo foi definido por diferença, através da Equação 4.

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

3.4 PIRÓLISE DO RESÍDUO

Os experimentos de pirólise do resíduo foram realizados em mufla (marca MAGNUS) conforme Figuras 23 e 24, em duas temperaturas diferentes (350 e 550 °C) durante 30 minutos de degradação térmica. Após a realização da degradação térmica, o carvão obtido foi coletado, pesado para fins de cálculo de rendimento e armazenado em recipiente apropriado.

Figura 23 – Forno mufla para pirólise (1)



Fonte: Autor (2021)

Figura 24 – Forno mufla para pirólise (2)



Fonte: Autor (2021)

3.5 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO

3.5.1 ANÁLISE IMEDIATA DO CARVÃO

O carvão obtido no processo foi caracterizado através da análise imediata (material volátil, cinzas e carbono fixo), com a utilização das mesmas metodologias empregadas durante a caracterização do resíduo *in natura*.

3.5.2 TESTE DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM MESA AGITADORA

O teste foi feito em uma mesa agitadora orbital da marca TECNAL modelo TE-141 conforme a Figura 25, onde se utilizou do carvão obtido no processo e diferentes concentrações de azul de metileno, todo o processo se deu no LARSEN – IFTO.

Figura 25 – Mesa agitadora orbital



Fonte: Autor (2021)

A análise dos resultados foi obtida com o auxílio do software *Protimiza Experimental Design* no qual foi utilizado o planejamento multivariável do delineamento composto central (DCC) com o efeito de dois fatores, sendo o fator 1 a concentração de azul de metileno e o fator 2 a massa de carvão utilizado. Esse planejamento teve como finalidade observar como as duas variáveis influenciam na adsorção do azul de metileno observando as melhores dosagens aplicadas durante o processo.

Foi utilizado o planejamento experimental fracionário 2^2 - Delineamento composto central (DCC), sem repetições e com 7 tipos de combinações entre os fatores, sem que houvesse perda da qualidade. Os ensaios foram efetuados de acordo com os fatores e níveis expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores e níveis utilizados no planejamento experimental

Fatores	Níveis		
	(-1)	0	(+1)
Concentração de azul de metileno	20 mg/L	60 mg/L	100 mg/L
Massa de carvão	0,5 g	0,75 g	1,0 g

Fonte: Autor (2021)

Em seguida foi elaborada a ordem dos experimentos que foram adotados nessa pesquisa, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Ordem dos experimentos

Ordem dos experimentos	Fatores	
	Concentração (mg/L)	Massa de carvão (g)
1	20	0,50
2	20	1,00
3	100	0,50
4	100	1,00
5	60	0,75
6	60	0,75
7	60	0,75

Fonte: Autor (2021)

Determinados então os ensaios que precisavam ser feitos, foram separados em 7 erlenmeyeres diferentes cada uma das soluções, contendo a massa de carvão e o azul de metileno com a determinada concentração. Após 30 minutos na mesa agitadora as amostras foram retiradas, filtradas para separar do carvão do líquido como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Filtragem da concentração de azul de metileno



Fonte: Autor (2021)



A absorbância da solução do corante foi medida em espectrofotômetro de duplo feixe (PERKIN ELMER, LAMBDA 750) conforme a Figura 27, em 650 nm, com o auxílio de uma curva de calibração externa, construída pela análise de soluções de concentrações iguais a: 1, 2, 3, 5, 7 e 10 mg/L partindo-se da solução inicial de azul de metileno.

Figura 27 – Espectrofotômetro de duplo feixe



Fonte: Autor (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo relata os resultados que foram obtidos nos ensaios executados para a caracterização da biomassa e do carvão ativado, de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Os ensaios de caracterização da biomassa são o ensaio de umidade, de teor de cinzas, massa volátil e de carbono fixo. Para a caracterização do carvão ativado foram utilizados os mesmos ensaios de caracterização da biomassa além do teste de adsorção do corante azul de metileno.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

4.1.1 Análise Imediata da Biomassa

Através da Tabela 6, é possível se identificar os resultados dos ensaios realizados para a caracterização da biomassa do resíduo de poda de flamboyant em um comparativo de resultados de outros trabalhos que executaram esses mesmos ensaios com outros tipos de biomassas, mais especificamente, diferentes tipos de madeira.

Tabela 6 – Resultado da análise imediata da biomassa

Ensaio	Resultados (%)	Resultados comparativos (%)		
		Maia (2020) Casca de castanha de caju	Ribeiro (2021) Castanha do Brasil	Rodrigues (2018) Casca de arroz
Umidade	-	6,10	5,06	6,95
Material Volátil	84,56	75,10	69,21	83,32
Teor de cinzas	3,87	2,00	1,5	9,54
Carbono fixo	11,57	16,80	24,12	1,19

Fonte: Autor (2021)

Pode-se dividir a degradação térmica de biomassa em duas etapas, a secagem, etapa onde o material perde a água contida nele, e a devolatilização, que pode ser descrita como a liberação de uma vasta gama de espécies voláteis que emergem em diferentes taxas. A etapa de secagem se apresenta em uma faixa de temperatura que vai até os 150°C, enquanto o estágio de

devolatilização se encontra geralmente em um intervalo de 150 a 700°C. (ANDRADE, 2015). Nessa pesquisa o material foi estudado a partir da fase de devolatilização.

Quanto maior o teor de material volátil, maior é a reatividade da ignição, dessa forma o teor de material volátil determina a facilidade com que uma biomassa queima (KLAUTAU, 2008). Comparando com os valores de material volátil de outras pesquisas, é possível notar que o resultado obtido nos ensaios com o resíduo de poda (84,56%) é um bom valor, sendo um material adequado para o processo de pirólise.

As cinzas são compostas por materiais não orgânicos e geralmente são indesejadas nos processos industriais pois podem diminuir o poder calorífico ocasionando perdas energéticas (ANDRADE, 2015). Quando possuem altos teores de cinzas os carvões podem gerar problemas de incrustações, entupimentos e até mesmo corrosão em processos de combustão e pirólise, tendo como resultado um aumento do custo operacional (SAIT *et al.*, 2012). O baixo teor de cinzas do material estudado (3,87%) demonstra que é um material com um bom potencial para utilização na pirolise e fabricação do carvão ativado.

Um alto teor de material volátil está diretamente relacionado a facilidade de uma biomassa entrar em combustão em baixas temperaturas, e com estabilidade de chama, sendo que o teor de carbono fixo está diretamente ligado ao material volátil (GARCIA *et al.*, 2012)

O carbono fixo representa a massa restante após a liberação dos compostos voláteis presentes na biomassa, excluindo as cinzas e teores de umidade (MCKENDRY, 2002)

O processo de carbonização pode então ser resumindo em concentrar carbono e expulsar o oxigênio, obtendo como resultado o aumento do conteúdo energético do produto (FROEHLICH, *et al.*, 2014).

O resultado do carbono fixo para a biomassa de resíduo de poda foi de 11,57%, menor que a maioria dos resultados que foram usados como comparativo. O baixo teor de carbono fixo na biomassa junto com o alto teor de material volátil, significa que esse material tem uma combustão rápida, favorecendo assim o processo de pirólise.

4.2 PIRÓLISE DE BIOMASSA E ATIVAÇÃO DE CARVÃO

4.2.1 Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de biomassa

Os resultados obtidos nos experimentos iniciais de pirólise da biomassa para produção de carvão estão apresentados na Tabela 7. Os dados da pirólise foram processados aplicando o teste-t presumindo variâncias equivalentes no tratamento estudado para que fosse possível verificar se havia diferença entre eles, conforme na Tabela 8.

Tabela 7 – Dados de rendimento do carvão obtidos durante o ensaio de pirólise

Experimentos	Temperaturas	
	550°C	350°C
1	25,86	31,65
2	25,52	38,95
3	26,59	35,86
Desvio padrão	0,44	2,99
Grau de liberdade	4	4

Fonte: Autor (2021)

Tabela 8 – Análise estatística obtida com o teste-t considerando variância equivalentes para a produção de carvão nos ensaios de pirólise

	550°C	350°C
Média	25,99	35,49
Variância	0,296857702	13,43776385
Observações	3	3
Variância agrupada	6,86731	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	-4,439387969	
P(T<=t) uni-caudal	0,00566966	
t crítico uni-caudal	2,131846786	
P(T<=t) bi-caudal	0,01133932	
t crítico bi-caudal	2,776445105	

Fonte: Autor (2021)

De acordo com os dados obtidos nos ensaios e nas análises, como pode ser observado nas Tabelas 7 e 8, existe uma diferença com o nível de confiança de 95% entre as médias de rendimento das duas temperaturas diferentes adotadas (550°C e 350°C). Visto isso, partindo como referência apenas o rendimento do carvão, sem levar em conta suas características químicas, o recomendado seria em se optar pela produção com o reator a temperatura de 350°C, visto que a mesma gera um rendimento maior e tem um gasto energético bem inferior comparado ao processo executado na temperatura de 550°C.

Segundo Pedroza (2011) o máximo rendimento de carvão é obtido quando a taxa de aquecimento e a temperatura são baixas, sendo que a devolatilização dos compostos orgânicos sólidos, pode ser o fator que causa a redução no rendimento da fração sólida com o aumento da temperatura.

Na Tabela 9 estão os resultados obtidos com a pirólise para produção do carvão ativado em reator de leito fixo, além de mostrar resultados de outros trabalhos para um comparativo. Pode se observar que os resultados obtidos na pesquisa com o resíduo de poda estão dentro dos intervalos obtidos em outras pesquisas.

Tabela 9 – Comparativo entre os resultados de rendimento do carvão

Rendimento (%)		Silva, E. M. (2018)	Ribeiro, F.B.R (2021)	Soares, F.K.S (2020)
550°C	350°C	Serragem de Angelim Pedra (%)	Castanha do Brasil (%)	Resíduo de indústria de madeira (%)
25,99	35,49	22,27 a 29,71	37,65 a 54,08	43,60

Fonte: Autor (2021)

Saber o rendimento do material é fundamental, principalmente quando se trata de comercializar o mesmo, pois através do rendimento é possível que se possa calcular quanto da matéria prima seria necessário para produzir uma certa quantidade do carvão ativado. Por exemplo, para que se possa produzir 100Kg de carvão ativado oriundo da pirólise do resíduo estudado nessa pesquisa, seriam necessários aproximadamente 282Kg de biomassa, visto que o rendimento é de 35,49%.

Com base nos dados levantados por Machado (2019), no qual relata que o custo do carvão ativado é de R\$ 3,89/Kg, e considerando a situação discutida por ele na qual a empresa BRK ambiental, no ano de 2018, utilizou 10.575Kg de carvão ativado no tratamento de água da ETA 006 em 4 meses, resultando num custo total de R\$ 41.136,75 podemos levar em consideração que uma grande parte desse valor poderia ser poupado caso houvesse a produção de carvão ativado a partir de biomassa, a qual poderia ser obtida com parcerias com os órgãos que fazem os serviços de poda (como companhias elétricas por exemplo).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

4.3.1 Análise imediata do carvão

Através da Tabela 10, é possível se identificar os resultados dos ensaios realizados para a caracterização do carvão a 550°C e a 350°C do resíduo de poda de flamboyant em um comparativo de resultados de outros trabalhos que executaram esses mesmos ensaios com outros tipos de biomassas, em diferentes temperatura ou taxa de aquecimento.

Tabela 10 - Resultado da análise imediata do carvão ativado

Ensaio	Resultados (%)		Resultados comparativos (%)		
			Maia (2020)		Rodrigues (2020)
	550°C	350°C	500°C a 20°C/min	500°C a 27°C/min	400°C a 35°C/min
Umidade	-	-	5,1	5,3	4,35
Material Volátil	23,52	37,45	31,2	27,1	51,17
Teor de cinzas	11,96	6,79	6,4	6,6	37,63
Carbono fixo	64,53	55,75	57,3	61	6,84

Fonte: Autor (2021)

O aumento no teor de carbono fixo mostra que durante a pirólise ocorre a liberação de compostos de fácil degradação térmica e acúmulo dos materiais mais resistentes termicamente (RODRIGUES, 2020). Em se tratando do carbono fixo do carvão, foram obtidos valores de 64,53% e 55,75%, sendo que o valor para biomassa era de 11,57%. Houve então a redução do material volátil durante a pirólise, de forma que resultou num aumento do carbono fixo no carvão oriundo da degradação térmica do resíduo de poda.

Comparando com as outras pesquisas podemos ver que os valores estão dentro da conformidade, exceto no caso de Rodrigues (2020) que trabalhou com um material com um teor de carbono fixo elevado e onde ainda assim houve um aumento de 574% no teor de carbono fixo.

4.3.2 Teste de adsorção de azul de metileno em mesa agitadora orbital

Nessa pesquisa foi realizada a adsorção do corante azul de metileno utilizando o carvão ativado produzido através da pirólise do resíduo de poda de flamboyant, sendo avaliados os parâmetros de concentração residual de azul de metileno e a capacidade de adsorção.

O método adotado foi o delineamento de faces centradas (DCC), que foi definido no planejamento experimental e descrito nos procedimentos metodológicos. Foi considerado que as variáveis investigadas para o teste de adsorção são a massa de carvão (X1) e a concentração do corante (X2). Os resultados estão expressos na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado do teste de adsorção sob efeito das duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração do corante)

Experimento	Massa do carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	Absorbância do filtrado	Eficiência de remoção (%)	Capacidade de adsorção
1	0,5	20	0,62	80,81	0,98
2	1	20	0,45	85,93	0,51
3	0,5	100	2,87	82,51	4,95
4	1	100	2,95	82,03	2,46
5	0,75	60	1,83	81,31	1,95
6	0,75	60	1,70	82,69	1,98
7	0,75	60	1,64	83,3	1,99

Fonte: Autor (2021)

4.3.2.1 Absorbância do carvão

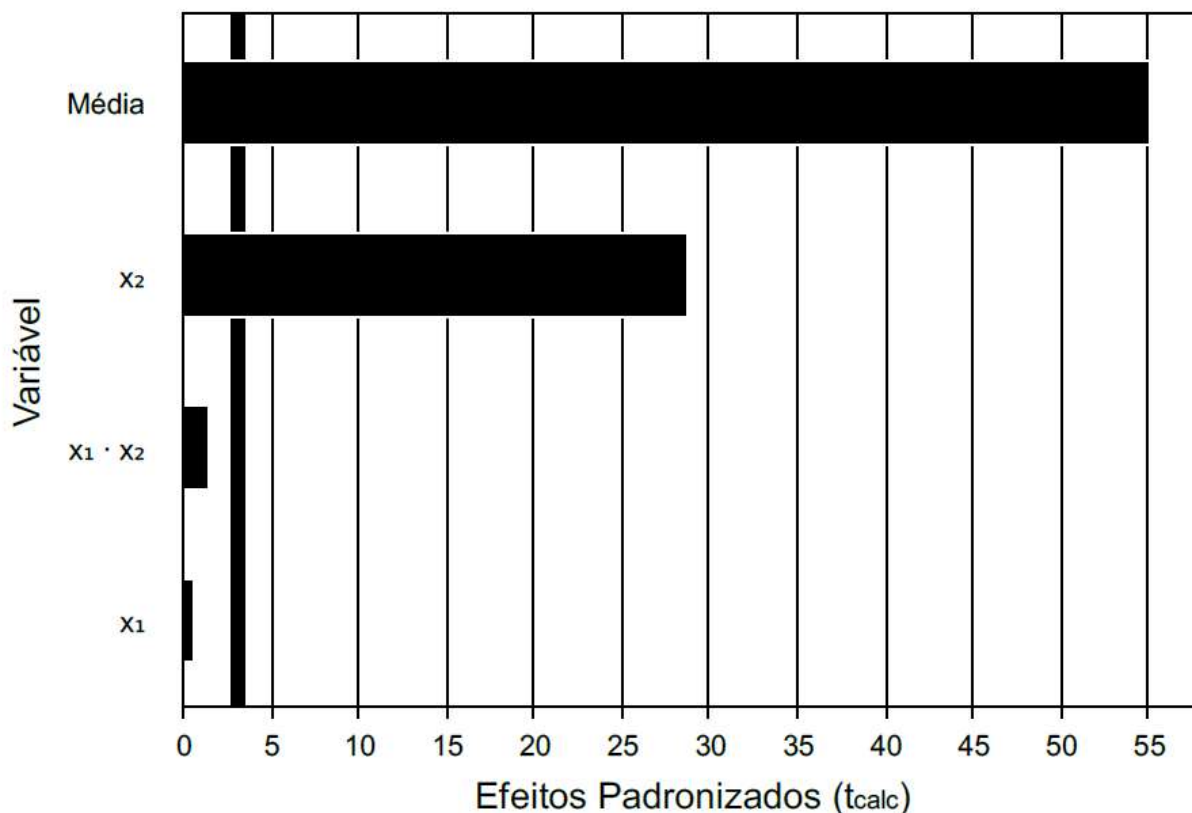
Através de regressão linear foi gerado o intervalo espectral da adsorção do azul de metileno e a construção do gráfico analítico linear da absorbância, o que permite observar a relação estatística desta variável em relação a outras. Na Tabela 12 são apresentados os efeitos da interação entre as variáveis para o resultado de absorbância das amostras.

Tabela 12 – Coeficientes de regressão do planejamento DCC

Fatores	Coeficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	1,72	0,03	55,17	0
X1	-0,02	0,04	-0,55	0,6232
X2	1,19	0,04	28,81	0,0001
X1.X2	0,06	0,04	1,50	0,2297

Fonte: Autor (2021)

O diagrama de Pareto ilustrado a seguir na Figura 28 destaca quais as variáveis tem efeitos mais significativos sobre a absorbância do carvão ativado oriundo da pirólise de resíduos de poda de flamboyant. Observa-se que apenas a concentração de corante foi significativa na pesquisa realizada.

Figura 28 – Diagrama de Pareto da absorbância do carvão

Fonte: Autor (2021)

A equação 5 foi gerada por meio da análise da regressão e descreve a relação estatística entre os fatores de variância aqui expostos.

$$Y1 = 1,72 - 0,02X1 + 1,19X2 + 0,06X1.X2 \quad (\text{Equação 5})$$

$X1$ = Massa de carvão (g)

$X2$ = Concentração de corante (mg/L)

A análise de variância (ANOVA) da absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno é apresentada na Tabela 13 a seguir.

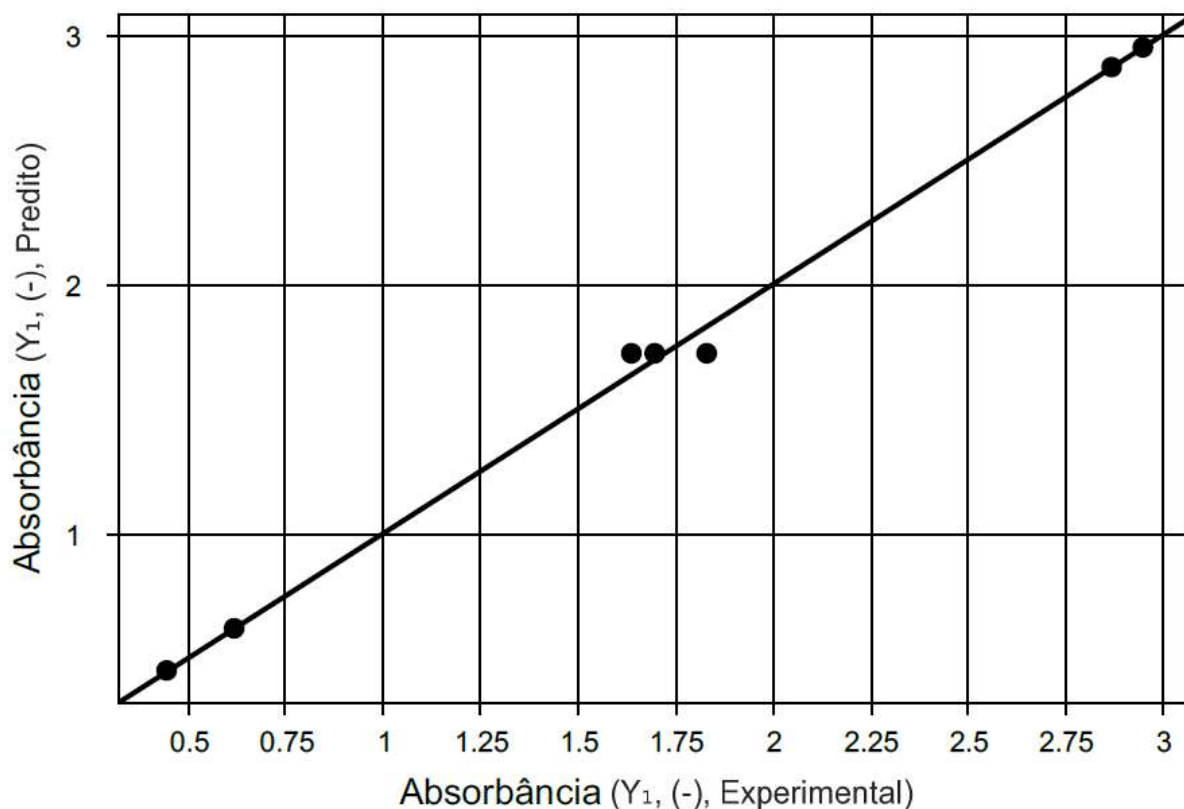
Tabela 13 – ANOVA para absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	P valor
Regressão	5,7	3	1,9	277,6	0,000
Resíduos	0,0	3	0,0		
Falta de Ajuste	0,0	1	0,0	0,0	0,980
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total	5,7	6			

$R^2 = 99,64\%$ Fonte: Autor (2021)

Com o modelo linear ajustado, é possível observar que o coeficiente de regressão (R^2) alcançado foi de 0,9964, o que indica um bom ajuste do modelo de dados. A Figura 29 comprova através de representação gráfica que houve uma pequena diferença entre os valores observados e os valores previstos do modelo, confirmado pelo agrupamento de pontos próximo a linha representativa.

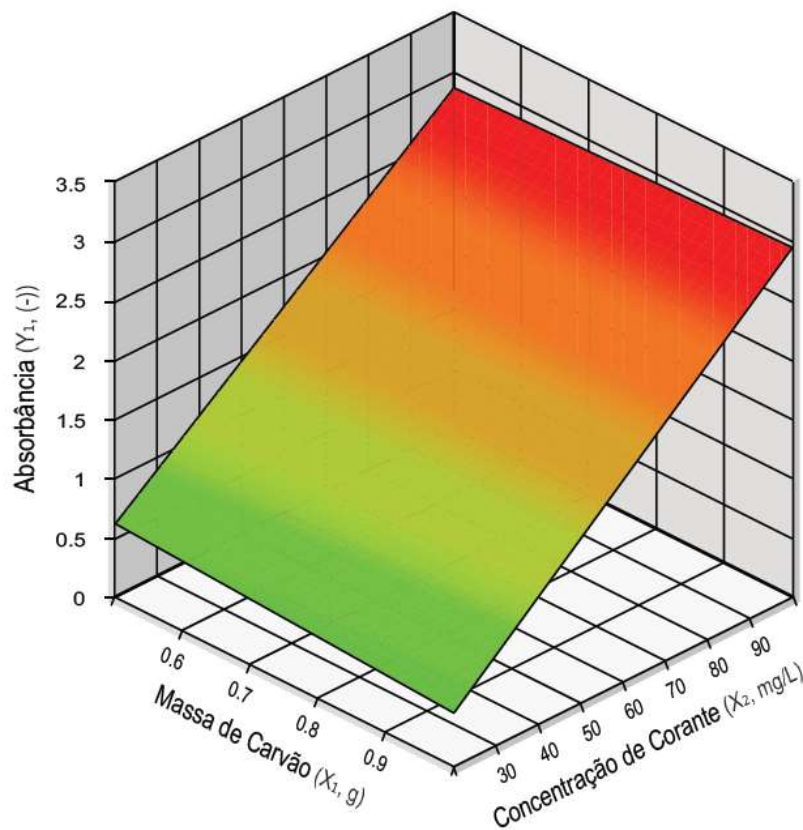
Figura 29 – Valores observados X valores previstos para absorbância do carvão



Fonte: Autor (2021)

O gráfico de superfície exposto por meio de planejamento experimental é apresentado na Figura 30. É possível notar que a capacidade de absorbância foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração de corante, como mostra a região em vermelho.

Figura 30 – Superfície de resposta para absorvância do teste de adsorção com utilização do carvão ativado



Fonte: Autor (2021)

4.3.2.2 Capacidade máxima de adsorção

O grau de capacidade máxima de adsorção de um carvão ativado, indica a eficiência do carvão nas condições em que o mesmo foi submetido. Na Tabela 14 estão expostos os resultados da interação entre as variáveis deste estudo para o resultado de capacidade máxima de adsorção do carvão oriundo do resíduo de poda de flamboyant.

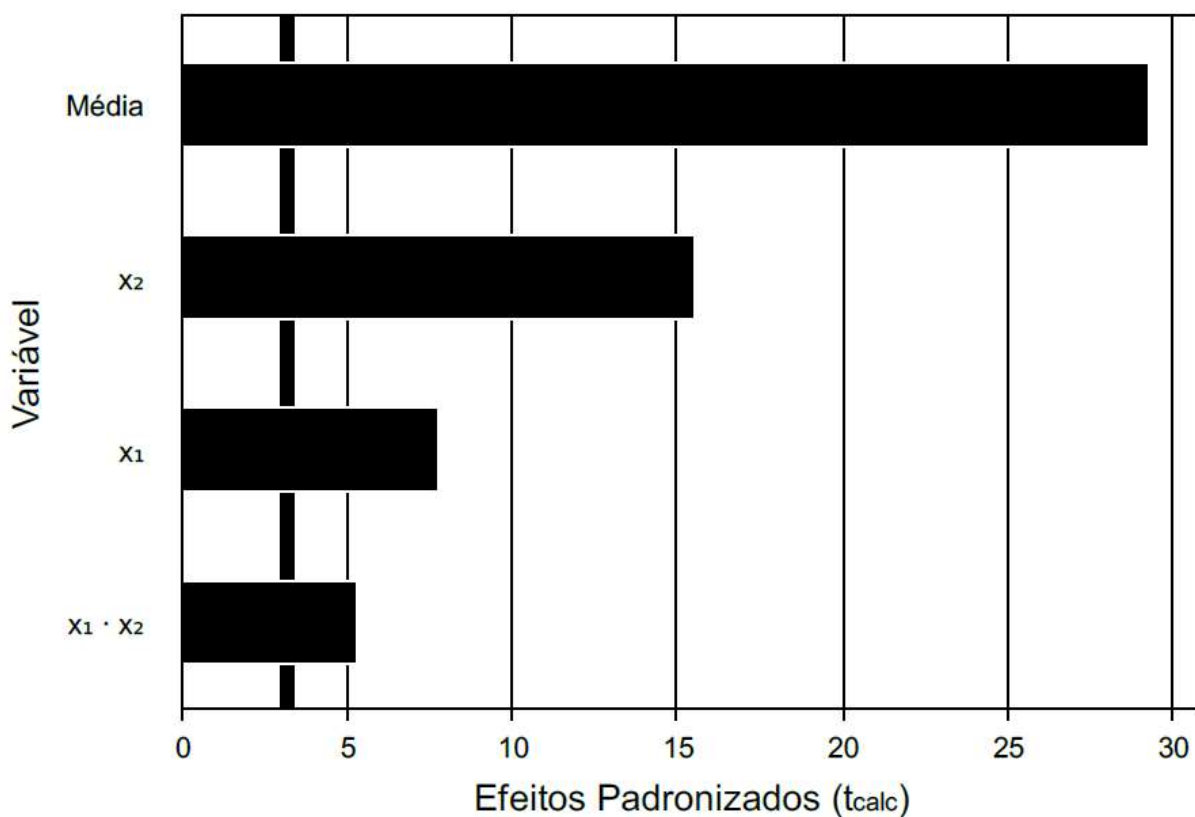
Tabela 14 – Coeficiente de regressão do planejamento DCC para definição da capacidade máxima de adsorção do carvão ativado

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro padrão	t-calculado	p-valor
Média	2,12	0,07	29,33	0,0001
X1	-0,74	0,10	-7,75	0,0045
X2	1,48	0,10	15,50	0,0006
X1.X2	-0,51	0,10	-5,29	0,0132

Fonte: Autor (2021)

O gráfico de Pareto representado pela Figura 31 demonstra o efeito significativo das variáveis massa de carvão (X1) e concentração do corante (X2) atribuindo a capacidade de adsorção do carvão, demonstrando que tais variáveis preditoras influenciam consideravelmente esta capacidade neste resultado.

Figura 31 – Gráfico de Pareto da capacidade máxima de adsorção (Q) do carvão



Fonte: Autor (2021)

A equação 6 foi gerada pela análise de regressão e está aqui representada

$$Q = 2,12 - 0,74X1 + 1,48X2 - 0,51X1.X2$$

X1 = massa de carvão

X2 = Concentração do corante

Na Tabela 15 está demonstrada a análise de variância (ANOVA) da capacidade máxima de adsorção (Q) das amostras de carvão ativado de resíduo de poda de flamboyant.

Tabela 15 – ANOVA para capacidade máxima de adsorção da absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	P valor
Regressão	12	3	4,0	109,4	0,001
Resíduos	0,1	3	0,0		
Falta de ajuste	0,1	1	0,1	250,6	0,003
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total	12,1	6			

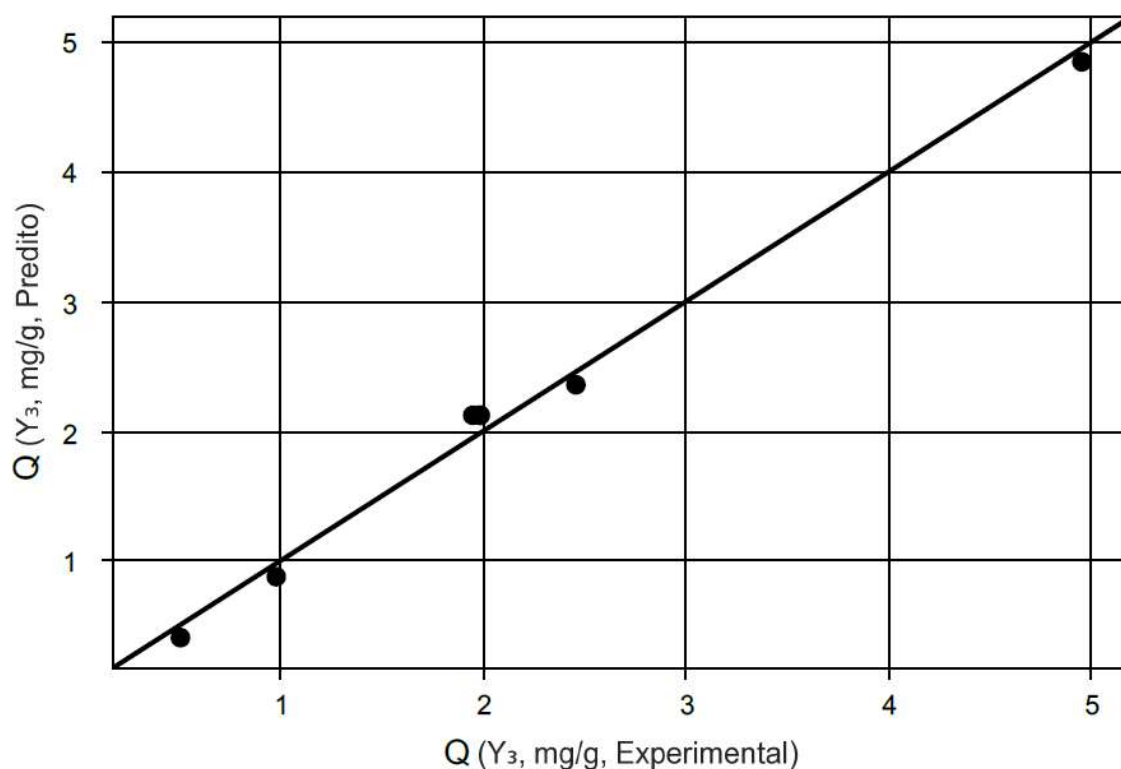
$R^2 = 99,09\%$

Fonte: Autor (2021)

Os resultados obtidos evidenciam que a ANOVA tem elevada significância sobre a precisão do método.

A Figura 31 mostra os valores analisado em comparação aos valores pressupostos para o teste de adsorção do índice de azul de metileno.

Figura 32 – Valores analisados X valores pressupostos da capacidade máxima de adsorção



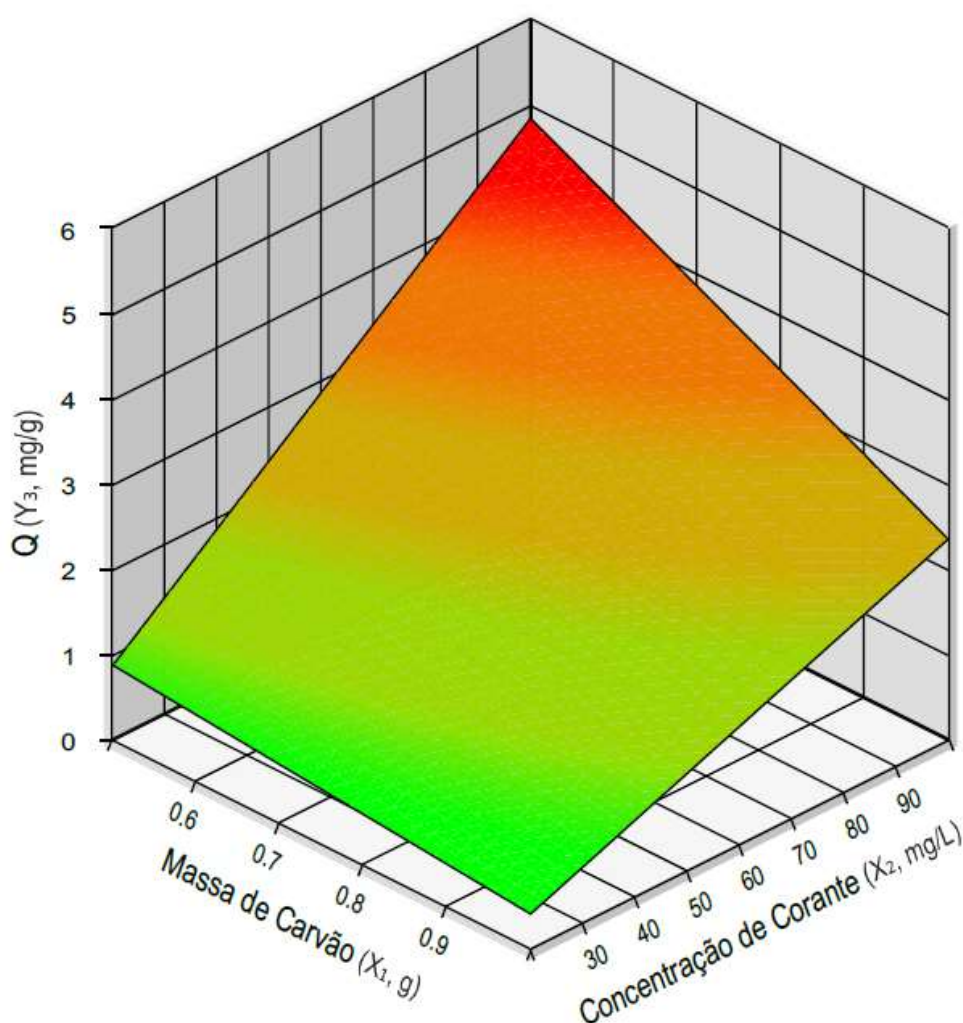
Fonte: Autor (2021)

O modelo bem ajustado representado pelas proximidades dos pontos a linha central ajustada constata-se que dentro deste intervalo de dados fica condicionado que alterações na

variável preditora implica em mudanças na variável resposta. Tal fato também é justificado pelo p-valor baixo presente na análise de regressão.

Na Figura 32 que representa a superfície de resposta, pode-se verificar que a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado foi obtida em circunstâncias de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração do corante azul de metileno, conforme ilustra a área em vermelho.

Figura 33 – Gráfico de superfícies que representa a capacidade máxima de adsorção do carvão desta pesquisa



Fonte: Autor (2021)

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado nos resultados obtidos com esta pesquisa por meio de diferentes etapas (caracterização da biomassa, delineamento experimental, caracterização do carvão, ensaio de adsorção), podemos concluir que:

O alto teor de material volátil da biomassa de resíduo de poda de flamboyant, mostra que a mesma se encontra adequada para o processo de pirólise.

O processo de degradação térmica do resíduo de poda de flamboyant realizado em diferentes circunstâncias possibilitou alcançar rendimentos adequados na fase sólida. Com temperaturas de 350°C e 550°C o rendimento em massa do carvão variou de 35,49% a 25,99%, o que indica um rendimento favorável aos valores definidos para as variáveis do ponto central no planejamento experimental.

O aumento da temperatura teve um efeito negativo no rendimento do carvão, o qual diminuiu o rendimento quando comparado ao carvão feito em temperatura mais baixa. Logo, esta variável apresenta um importante indicativo para a composição e capacidade de produção dos subprodutos obtidos por intermédio da pirólise.

O baixo teor de carbono fixo da biomassa, aliado ao alto teor de material volátil, demonstram que é um material adequado para a produção de carvão, pois quanto maior o teor de material volátil e menor o teor de carbono fixo, mais rápida a combustão acontece.

Após a pirólise, o índice de carbono fixo aumentou para 55,75% no carvão obtido através do processo de pirólise a 350°C e para 64,53% no carvão obtido na pirólise a 550°C, isso demonstra que durante o processo de pirólise, o rearranjo da estrutura converteu a matéria volátil em carbono fixo, o que demonstra a eficiência da pirólise realizada, e a qualidade do carvão obtido.

O teste de adsorção de azul de metileno realizado em mesa giratória orbital e posteriormente analisado estatisticamente, resultou que o carvão obtido na pirólise de biomassa do resíduo de poda de flamboyant tem uma alta capacidade de adsorção apresentando em todos os ensaios uma eficiência acima dos 80%.

Além dos bons resultados obtidos, o carvão ativado de resíduo de poda de flamboyant pode ajudar na economia de carvão ativado utilizado em diversos fins, afinal, é uma biomassa de

fácil acesso que é descartada sem nenhum tipo de reaproveitamento, podendo assim, através de programas e parcerias ser feita a aquisição desse material sem custos.

É importante ressaltar também que a partir do momento que se dá uma destinação a esse tipo de resíduo, a quantidade de material que vai para lixões, aterros, aterros controlados, e outros, está sendo reduzida, diminuindo assim os impactos ambientais que essa biomassa poderia causar caso não tivesse um destino adequado.

Recomenda-se para futuras pesquisas realizar outros ensaios que possam caracterizar ainda mais a biomassa e o carvão obtido no processo. Além disso, uma boa alternativa seria a utilização de outras espécies, ou até mesmo a mistura delas para que se possa avaliar a viabilidade da utilização de um carvão obtido através da reutilização de biomassa de resíduos de poda das espécies encontradas na cidade.

REFERÊNCIAS

- CORTEZ, C. L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia**. Estudo de caso: AES Eletropaulo. 2011.
- SILVA, Dafne Pereira da. **Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital**. 216. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Instituto de Energia e Ambiente, Usp, São Paulo, 2016.
- MEIRA, Ana Maria de. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. 210. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Escola Superior de Agricultura, Usp, Piracicaba, 2010.
- MARTINS, Carlos Humberto. O aproveitamento de madeiras das podas da arborização viária de Maringá/PR. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Maringá, v. 8, n. 2, p. 257-263, jun. 2013.
- DOURADO, Lucyan Comini; SILVA, Rogério J. P.. Estudo sobre impacto de volume de lixo em aterros proveniente de podas de árvores e jardins. **Revista Ciências do Meio Ambiente**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 10-13, jul. 2011.
- PEDROZA, Marcelo Mendes *et al.* APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM PROCESSO DE PIRÓLISE. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Palmas, v. 6, n. 2, p. 184-207, fev. 2017.
- ALMEIDA, Ronise Nascimento de *et al.* A problemática dos resíduos sólidos urbanos. **Interfaces Científicas**, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 25-36, out. 2013.
- Abrelpe. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil — Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. 2019.
- Tocantins. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins**, 2015.
- Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Lei 12.305. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010
- Umuarama, Secretaria de Agricultura e Meio Ambiente. **Plano Diretor De Arborização Urbana de Umuarama – Paraná**. 2020
- RESENDE, Otávia Melina de. **Arborização Urbana**. 2011. 28 f. Monografia (Especialização) - Curso de Geografia e Meio Ambiente, Escola Superior de Agricultura, Unipac, Barbacena, 2011.
- CHAVES, Marina Donária. **Gaseificação de materiais lignocelulósicos para geração de energia elétrica**. 2007. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- BURANI, Geraldo F. *et al.* Estudo Potencial de Utilização da biomassa Resultante da Poda e Remoção de Árvores na Área de Concessão da AES Eletropaulo. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 1., 2009, São Paulo. **Estudo**

Potencial de Utilização da biomassa Resultante da Poda e Remoção de Árvores na Área de Concessão da AES Eletropaulo. Belém: Aneel, 2009. v. 1, p. 1-11.

GENOVESE, Alex Leão; MIGUEL; LUIZ. **Aspetos Energéticos Da Biomassa Como Recurso No Brasil e no Mundo.** 2006. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Usp, São Paulo, 2006.

LINS, Gustavo Nascimento. **Avaliação do Desempenho Ambiental do Briquete Produzido a Partir de Resíduos de Poda Urbana.** 2015. 11 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Unb, Brasília, 2015.

LOPES, Camila Santos Doubek. DESENHO DE PEQUENOS OBJETOS DE MADEIRA COM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho em Meio Ambiente**, Piracicaba, v. 4, n. 3, p. 105-133, 1 jul. 2009.

MANGUEIRA, Rafael Dantas. REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE PODA PARA COMPOSTAGEM E PRODUÇÃO DE MUDAS NO HORTO MUNICIPAL DE FORTALEZA. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 2., 2019, Foz do Iguaçu. **Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.** Fortaleza: Ibeas, 2019. p. 1-10.

OLIVÉRIA, Emídio Cantídio Almeida de. **Compostagem.** 2008. 19 f. Monografia (Especialização) - Curso de Agronomia, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

Varma, A.K., Thakur, L.S., Ravi, S., Mondal, P., 2019. **Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products**, 224-235

Alexandro M.M. Vargas , Clarice A. Garcia , Edson M. Reis , Ervim Lenzi , Willian F. Costaa, Vitor C. Almeidaa, 2010. **NaOH-activated carbon from flamboyant (Delonix regia) pods: Optimization of preparation conditions using central composite rotatable design**, 43-50

Alexandro M.M. Vargas, André L. Cazetta, Clarice A. Garcia, Juliana C.G. Moraes, Eurica M. Nogami, Ervim Lenzi, Willian F. Costa, Vitor C. Almeida, 2011. **Preparation and characterization of activated carbon from a new raw lignocellulosic material: Flamboyant (Delonix regia) pods**, 178-184

BRIDGEWATER, A. V. an overview of fast pyrolysis of biomass. **Organic Geochemistry** 30 (1999) 1479-1493

CARDOSO, André Lima. **Pirólise Lenta De Serragem De Eucalipto Para Produção de Bio-óleo e carvão.** 2004. 68 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

O. Ioannidou, A. Zabaniotou. **Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review.** Chemical Engineering Department, Aristotle University of Thessaloniki, Un. Box 455, 54124 Thessaloniki, Greece 2006

A. V. Bridgwater et al. (eds.), **COMPARISON OF ABLATIVE AND FLUID BED FAST PYROLYSIS PRODUCTS: YIELDS AND ANALYSES**. Developments in Thermochemical Biomass Conversion. Springer Science+Business Media Dordrecht 1997

MOREIRA, Renata. **Estudo da pirólise lenta da casca da castanha de caju**. 2015. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Ipen, São Paulo, 2015.

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CARBON FROM THE FRUIT OF BRAZIL NUT TREE ACTIVATED BY PHYSICAL PROCESS. Mato Grosso: Sif, 2019.

ALVES, Myk. **Flamboyant, a árvore que é símbolo da capital do Brasil**. 2019. Disponível em: <https://agro20.com.br/flamboyant/>. Acesso em: 16 Não é um mês valido! 2021

SOUZA, Edvaldo de. **Flamboyant tem origem da África e foi introduzida no Brasil no século 19**. 2016. Disponível em: <http://glo.bo/2gc4iB0>. Acesso em: 4 mar. 2021.

JULCEIA. **Flamboyant [Delonix regia (Bojer ex Hook.) Raf.** 2014. Disponível em: <https://www.aplantadavez.com.br/2014/10/flamboyant-delonix-regia-ex-hook.html>. Acesso em: 6 mar. 2021.

ROUQUEROL, J.; ROUQUEROL, F.; LLEWELLYN, P.; MAURIN, G.; SING, S. W.K. **Adsorption by powders and porous solids. Principles, Methodology and Applications** Academic Press, Second edition, 2014.

SCHNEIDER, Eduardo Luiz. **Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado**. 2008. 93 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Centro de Engenharia e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

BRANDÃO, Poliana Cardoso. **Avaliação do uso do bagaço de cana como adsorvente para remoção de contaminantes derivados do petróleo de efluentes**. 2006. 160 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Forno a lenha de Fluxo Corrente para Secagem de Grãos**. Curitiba: UFPR. Dissertação de mestrado

SAIT, H. H.; *et al.* Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**

CORTON, J. **Expanding the biomass resource: sustainable oil production via fast pyrolysis of low input high diversity biomass and the potential integration of thermochemical and biological conversion routes**. Applied Energy: 177, p. 852-862, 2016.

GARCÍA, R.; *et al.* Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**: 103, p. 249-258, 2012.

FROEHLICH, Paulo Leandro *et al.* **Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações**. 2014. 19 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2014.

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

MAIA, Danielma Silva. **APROVEITAMENTO DO CARVÃO ATIVADO OBTIDO DA CASCA DE CASTANHA DE CAJU NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS**. 2020. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

ANDRADE, Laiane Alves de. **Aproveitamento do caroço de manga: um estudo de viabilidade da pirólise usando energia solar**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.