



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

***CAMPUS* PALMAS**

CURSO ENGENHARIA CIVIL

ALINE GOMES BATISTA

**ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM CARVÃO ATIVADO PRODUZIDO A
PARTIR DE FIBRA DE COCO-DA-BAÍÁ (*Cocos nucifera L.*)**

PALMAS

2021

ALINE GOMES BATISTA

**ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM CARVÃO ATIVADO PRODUZIDO A
PARTIR DE FIBRA DE COCO-DA-BAÍÁ (*Cocos nucifera L.*)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel do Curso Superior de Engenharia
Civil do Instituto Federal do Tocantins, *Campus*
Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza.

Coorientadora: Profa. Dra. Elaine da Cunha
Silva Paz.

PALMAS

2021

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

- B333a Batista, Aline Gomes
ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM CARVÃO ATIVADO
PRODUZIDO A PARTIR DE FIBRA DE COCO-DA-BAÍA (Cocos
nucifera L.) / Aline Gomes Batista. – Palmas, TO, 2021.
45 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
Coorientadora: Dra. Elaine da Cunha Silva Paz
1. Carvão ativado. 2. Coco-da-baía. 3. Adsorção. I. Pedroza, Marcelo
Mendes. II. Paz, Elaine da Cunha Silva. III. 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

ALINE GOMES BATISTA

ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM CARVÃO ATIVADO PRODUZIDO A PARTIR DE FIBRA DE COCO-DA-BAÍÁ (*Cocos nucifera L.*)

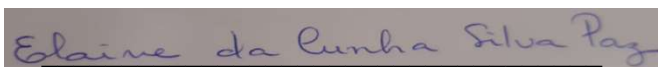
Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil
Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas,
como exigência à obtenção do grau em
Engenheiro Civil.

Aprovado em: 30 / 11 / 2021

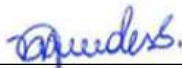
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador
(IFTO)



Profa. Dra. Elaine da Cunha Silva Paz
Coorientadora
(IFTO)



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



Profa. Me. Evanuzia Miranda da Silva
(IFTO)

Aos meus pais, Manoel da Silva Batista e Luciene Carneiro Gomes.

Às minhas irmãs, LÍlian Emanoela e Gabriella.

Sem vocês nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por tudo.

Aos meus pais por sempre acreditaram em mim e investiram nos meus sonhos. Agradeço por todos os conselhos e ensinamentos. Obrigada por não medirem esforços para me dar uma boa educação e todas as oportunidades, por me mostrarem o caminho e me apoiar em todo o trajeto, vocês me ensinaram sobre humildade, caráter, integridade e o valor dos estudos.

Às minhas irmãs, Lílian e Gabriella, vocês são minha base, minhas melhores amigas. Obrigada por sempre estarem ao meu lado e por tornarem os momentos mais difíceis suportáveis.

Ao meu namorado, Hector, por sempre me apoiar e acreditar em mim.

Aos meus amigos, Geovana, Otavio e Vitória, que estiveram ao meu lado durante a graduação me dando todo o apoio, aguentando minhas reclamações, meu cansaço, meus dramas e minha ausência, levarei eternamente a amizade de vocês comigo.

Ao professor Dr. Marcelo Pedroza por todo o esforço, dedicação, apoio e paciência na realização deste trabalho. Por me receber de braços abertos desde o início, por toda orientação e ajuda nesta conquista.

À professora Dra. Elaine da Cunha Silva Paz por aceitar o convite e ter me coorientado, por toda ajuda, atenção, disposição e conhecimento.

Às professoras, Me. Evanuzia M. da Silva e Me. Michele Ludmila G. dos Santos, por aceitarem prontamente minhas solicitações duas vezes e comporem a banca de defesa desse trabalho.

Aos professores, funcionários e colegas do Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins- *Campus* Palmas.

A todos que tive a oportunidade de conhecer durante a graduação, por todo conhecimento compartilhado.

Aos amigos que contribuíram com a minha graduação.

A todos, muito obrigada!

**“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é
senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria
menor se lhe faltasse uma gota”.**

-Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

BATISTA, Aline Gomes. **Adsorção de azul de metileno em carvão ativado produzido a partir de fibra de coco-da-baía (*Cocos nucifera* L.)**. 2021. 45 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2021.

A crescente preocupação com a qualidade dos meios hídricos que sofrem poluição das mais diversas formas, justifica a busca por técnicas e métodos alternativos ou adicionais aos processos convencionais de tratamento de água. A indústria têxtil brasileira tem uma produção anual superior a 2 milhões de toneladas, empregando toneladas de corantes em várias etapas da linha de produção que inevitavelmente tem uma parte perdida durante o processo que é destinada aos efluentes desse setor. Dentre outras técnicas, a adsorção por carvão ativado tem destaque no tratamento de efluentes em razão da simplicidade do processo, dos baixos custos e riscos à saúde humana. A utilização da adsorção com biomassas precursoras para produção de carvão ativado apresenta-se como um método viável, conciliando eficiência de remoção, baixo custo e biodegradabilidade do material aplicado. Nessa perspectiva, o presente trabalho objetivou estudar o carvão ativado produzido a partir do coco-da-baía, um resíduo da comercialização da água de coco, na remoção do corante azul de metileno. O carvão foi produzido em reator de leito fixo sob temperatura de 500 °C e taxa de aquecimento de 20 °C/ min. com tempo de residência de 60 minutos e ativado em temperatura de 800 °C por 30 minutos, com fluxo de vapor d'água. Os resultados mostraram que o carvão produzido teve teor de cinzas de 17,37%, umidade de 1,48%, teor de material volátil de 22,99% e teor de carbono fixo de 58,16%, nos testes de adsorção o carvão mostrou excelente desempenho na adsorção, tendo eficiência de 100% em todos os experimentos. Dos quatro fatores estudados, a velocidade de agitação e o tempo de adsorção foram os que apresentaram relevância estatística para a absorbância. Para a razão de adsorção, os fatores de relevância foram a massa de carvão e a concentração de corante. E para a eficiência de remoção, nenhum dos fatores influenciou estatisticamente. Sendo assim, através desses resultados verificou-se que o carvão estudado tem ótimo potencial de adsorção e durabilidade e que arranjos entre os fatores podem ser feitos visando a otimização operacional.

Palavras-chave: Carvão ativado, Biomassa, Coco-da-baía, Adsorção, Azul de metileno.

ABSTRACT

BATISTA, Aline Gomes. **Adsorption of methylene blue on activated carbon produced from coconut fiber (*Cocos nucifera* L.)**. 2021. 45 p. Completion of course work. Bachelor's Degree in Civil Engineering. Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2021.

The growing concern with the quality of water resources that suffer from various forms of pollution justifies the search for alternative or additional techniques and methods to conventional water treatment processes. The Brazilian textile industry has an annual production of over 2 million tons, using tons of dyes in various stages of the production line that inevitably have a part lost during the process, which is destined for the effluents of this sector. Among other techniques, activated carbon adsorption stands out in the treatment of effluents, due to the simplicity of the process, low costs and risks to human health. The use of adsorption with precursor biomass for the production of activated carbon is a viable method, combining removal efficiency, low cost and biodegradability of the applied material. In this perspective, the present work aimed to study the activated charcoal produced from coconut bay, a residue from the commercialization of coconut water, in the removal of the methylene blue dye. Coal was produced in a fixed bed reactor at a temperature of 500 °C and heating rate of 20°C/min with a residence time of 60 minutes and activated at a temperature of 800 °C for 30 minutes, with a flow of water vapor. The results showed that the charcoal produced had ash content of 17.37%, moisture content of 1.48%, volatile material content of 22.99% and fixed carbon content of 58.16%, in the charcoal adsorption tests showed excellent adsorption performance, with 100% efficiency in all experiments. Of the four factors studied, agitation speed and adsorption time were the ones that showed statistical relevance for absorbance. For the adsorption ratio, the relevant factors were the carbon mass and the dye concentration. And for the removal efficiency, none of the factors had a statistical influence. Thus, through these results, it was verified that the studied coal has great potential for adsorption and durability and that arrangements between the factors can be made aiming at operational optimization.

Keywords: Activated charcoal, Biomass, Coconut bay, Adsorption, Methylene blue.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Gráfico de dispersão dos valores de absorbância para curva-padrão.....	34
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparativo entre o teor de cinza e de carbono elementar nas amostras de carvão ativado preparados a partir de resíduos de biomassa com ou sem ativação química.....	21
Tabela 2 - Ordem dos experimentos empregados no DFF 2^{4-1}	27
Tabela 3 - Fatores e níveis empregados no DFF 2^{4-1}	28
Tabela 4- Pontos ensaiados para a curva de calibração do experimento.....	28
Tabela 5- Valores da caracterização do carvão ativado.....	32
Tabela 6- Resultados da absorbância para curva-padrão do experimento.....	33
Tabela 7- Resultado do teste de adsorção sob efeito das quatro variáveis independentes (massa de carvão, concentração da solução do corante, tempo de adsorção e velocidade de agitação)	35
Tabela 8- Efeitos dos fatores para absorbância do Planejamento DFF.....	35
Tabela 9- Efeitos dos fatores para remoção do corante do Planejamento DFF.....	37
Tabela 10- Efeitos dos fatores para razão de adsorção do Planejamento DFF.....	38

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.....	16
Figura 2- Coqueiro.....	17
Figura 3- Representação esquemática da superfície interna e externa de um adsorvente.....	18
Figura 4- Estrutura molecular do Azul de Metileno.....	19
Figura 5- Desenho esquemático das atividades que serão desenvolvidas.....	22
Figura 6- Reator de leito fixo empregado na produção do carvão.....	23
Figura 7- Modelo de estufa utilizado no ensaio de teor de umidade.....	24
Figura 8- Dessecador empregado no ensaio de teor de umidade.....	24
Figura 9- Forno de mufla utilizado no ensaio de materiais voláteis.....	25
Figura 10 - Representação do planejamento experimental dos ensaios de adsorção.....	27
Figura 11- Concentrações ensaiadas na curva de calibração.....	29
Figura 12- Mesa agitadora orbital Shaker TE 141 (TECNAL).....	29
Figura 13- Pesagem de amostra de carvão ativado em balança (TECNAL).....	30
Figura 14- Sistema para filtração a vácuo.....	30
Figura 15- Papéis-filtro qualitativos após a filtragem da amostra.....	30
Figura 16- Cubeta do espectrofotômetro para leitura de absorbância.....	31
Figura 17- Espectrofotômetro digital da marca Hach.....	31
Figura 18- Solução com concentração de 100 mg/L antes e após filtragem.....	31
Figura 19- Diagrama de Pareto da absorbância do carvão do coco.....	36
Figura 20- Diagrama de Pareto da eficiência de remoção de corante do carvão do coco.	37
Figura 21- Diagrama de Pareto da razão de adsorção do carvão do coco.....	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. PROBLEMA DE PESQUISA	14
3. JUSTIFICATIVA.....	14
4. OBJETIVOS.....	15
4.1. Objetivo geral	15
4.2. Objetivos específicos.....	15
5. REVISÃO DE LITERATURA	15
5.1. Biomassa residual.....	15
5.2. Coco-da-baía	16
5.3. Carvão ativado.....	17
5.4. Azul de metileno	18
5.5. Adsorção.....	19
5.6. Estado da arte em adsorção sólido-líquido	20
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	21
6.1. Coleta do coco	22
6.2. Produção do carvão	22
6.3. Caracterização do carvão.....	23
6.3.1. Teor de Umidade.....	23
6.3.2. Teor de Material Volátil.....	24
6.3.3. Teor de Cinzas.....	25
6.3.4. Teor de Carbono Fixo	26
6.4. Testes de adsorção	26
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
7.1. Caracterização do carvão.....	32
7.2. Testes de adsorção	33
7.2.1. Absorbância do carvão do coco-da-baía	35
7.2.2. Eficiência da remoção de corante	36
7.2.3. Razão da adsorção (Q)	38
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

A Indústria têxtil brasileira teve uma produção média de 2,04 milhões de toneladas em 2019, sendo a 2ª maior empregadora do país da indústria de transformação, atrás apenas da indústria alimentícia e de bebidas. Esse setor está a quase 200 anos no Brasil e o colocou entre os cinco maiores produtores e consumidores têxteis do mundo. Apesar dos ganhos econômicos, essa indústria configura um grande passivo ambiental em virtude do uso em larga escala de corantes e tinturas com potencial tóxico em sua linha de produção que, inevitavelmente, se agrega aos efluentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL, 2021).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) determina em sua resolução Nº 357 de 2005 as condições e padrões de qualidade das águas para fornecimento e consumo, bem como para lançamento de efluentes nos corpos hídricos. Entre outras coisas, está descrito que a água doce destinada ao abastecimento humano deve estar livre de substâncias de efeito tóxico e corantes de origem antrópica, virtualmente presentes ou que não sejam removíveis por processo comum de tratamento de água. Quanto ao lançamento de efluentes, está disposto que as águas residuais de qualquer fonte poluidora não deverão causar ou possuir potencial para causar efeitos tóxicos aos organismos aquáticos no corpo receptor.

Neste contexto, o uso de técnicas implementadas no tratamento de efluentes e água é imperativo para adequação destes nos parâmetros normativos estabelecidos. Segundo Pedroza et al. (2017) o carvão oriundo da pirólise de biomassa residual pode ser empregado na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas de efluentes, substituindo o carvão ativado comercial, dentre outras destinações.

O coco-da-baía (*Cocos nucifera L.*) é uma expressiva fonte de biomassa no Brasil, visto a existência de uma área de plantio de 257.157 hectares, com produção superior a 2.820.468 toneladas de frutos por ano, ocupando a posição de quarto lugar no ranking de produção mundial, depois da Indonésia (MAGALHÃES et al., 2017). Os resíduos do consumo do coco *in natura*, ricos em fibras, são comumente destinados incorretamente gerando impactos ambientais negativos, como a degradação da paisagem, odor desagradável e riscos à saúde pública e meio ambiente (PAZ et al., 2018). E segundo Silva (2008) o endocarpo *in natura* do coco pode ser comercializado para a produção de carvão ativado em decorrência de seu poder calorífico.

Assim, nesta pesquisa buscou-se estudar a adsorção de azul de metileno em carvão ativado produzido a partir da fibra do coco-da-baía e ativado fisicamente a 800 °C. Avaliando

quatro variáveis envolvidas no processo de adsorção, sendo elas a massa do adsorvente, a concentração do corante, o tempo de adsorção e a velocidade de agitação da amostra.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

Como a massa de carvão, a concentração de corante, o tempo de adsorção e a velocidade de agitação influenciam estatisticamente na eficiência da adsorção de azul de metileno em carvão ativado produzido a partir de biomassa residual oriunda da fibra de coco-da-baía?

3. JUSTIFICATIVA

A remoção de corantes e tinturas, que são amplamente empregados pelo setor industrial, é um dos gargalos encontrados no tratamento de efluentes devido ao caráter tóxico, muitas vezes cancerígeno e não biodegradável dessas substâncias que representam sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Tendo isso em vista, várias técnicas de remoção de corantes podem ser consideradas como o uso de membranas e a ultrafiltração, contudo com alto custo envolvido, enquanto os processos oxidativos avançados e fotodegradação têm potencial gerador de subprodutos tóxicos. Por isso os processos adsorptivos têm destaque no tratamento de efluentes, em razão da simplicidade do processo, dos baixos custos e riscos à saúde humana comparados aos demais métodos (TOUCHETTO, 2020).

O adsorvente mais comumente empregado é o carvão ativado e devido à natureza não renovável do carvão mineral ao longo dos anos se buscou alternativas sustentáveis e economicamente viáveis de matérias-primas para a sua substituição com o estudo das biomassas residuais, oriundas do setor agrícola principalmente. Os resíduos desse setor se distinguem em função da abundância, baixo teor de cinzas e alta durabilidade, e por conterem celulose, possuem maior potencialidade de adsorção de diversos poluentes (SCHUSTER, 2021).

Assim, novos estudos e tecnologias tanto de inovação quanto de aprimoramento de eficiência das técnicas já utilizadas vem sendo desenvolvidos, sobretudo considerando-se o constante aumento populacional e, conseqüentemente, a poluição e a demanda por água.

Neste cenário, o estudo das propriedades adsorptivas do carvão produzido a partir do coco-da-baía (*Cocos nucifera L.*) parece pertinente observando a grande quantidade de resíduos de coco verde gerados no Brasil, o alto valor agregado a materiais renováveis devido

a conservação ambiental e a redução de custos extrativos ao se reaproveitar de forma ambientalmente correta resíduos de um setor. Além do alto potencial energético desse material em decorrência do seu poder calorífico e qualidade (CARDOSO et al., 2016).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de adsorção de azul de metileno em carvão ativado fisicamente a 800 °C produzido a partir da fibra de coco-da-baía.

4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar o carvão ativado empregado nos ensaios de adsorção;
- Efetuar os ensaios de adsorção de azul de metileno com o uso de carvão ativado;
- Quantificar os efeitos estatísticos dos fatores (massa de carvão, concentração de corante, velocidade de agitação e tempo de adsorção) no processo de adsorção do corante na superfície do carvão ativado empregado nessa pesquisa.

5. REVISÃO DE LITERATURA

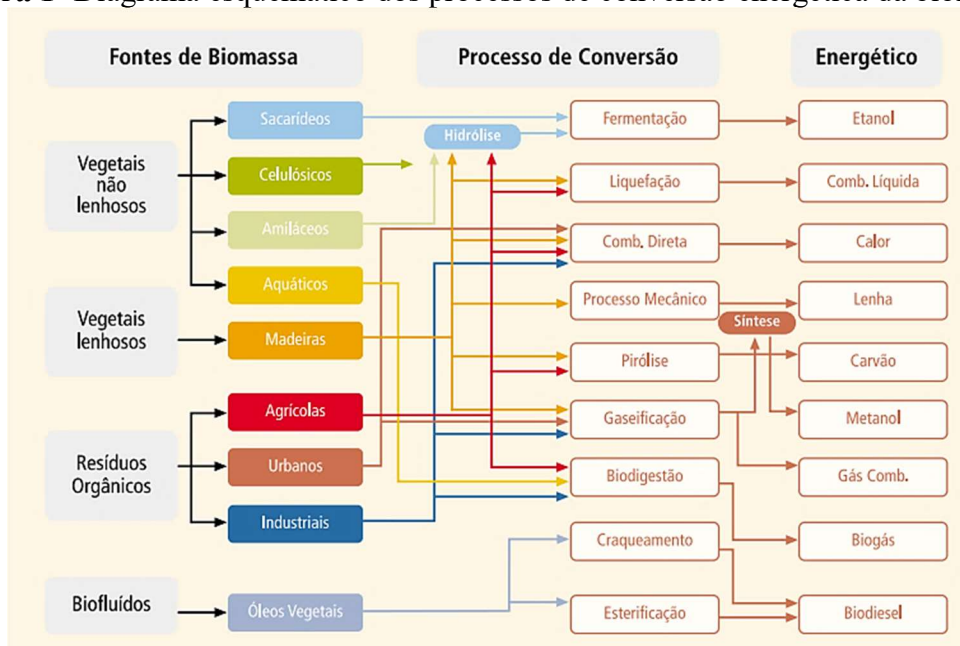
5.1. Biomassa residual

O termo biomassa surgiu em torno de 1975 se referindo aos materiais que poderiam ser empregados como combustível, incluindo toda forma de matéria orgânica, tanto de origem vegetal como animal, oriundos de transformação natural ou artificial. Hodiernamente, aceita-se o termo biomassa para descrever o grupo de produtos energéticos e matérias-primas renováveis procedentes da matéria orgânica formada biologicamente. Excluindo-se assim deste conceito, os combustíveis fósseis e seus derivados orgânicos, ainda que tivessem origem biológica em seus primórdios (SEYE, 2003).

A biomassa vegetal é uma enorme fonte de recursos renováveis, em função da produção de resíduos e do seu potencial na geração de produtos de alto valor associado, sendo constituída de uma complexa mistura de celulose, hemicelulose e lignina (NEMET, 2020).

A partir de uma análise energética, pode-se dizer que a biomassa, assim como outras fontes renováveis de energia, é uma forma indireta de energia solar, por meio da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos, resultando na conversão da energia solar em energia química, na Figura 1 é possível visualizar a dinâmica dos processos de conversão energética da biomassa (ANEEL, 2005).

Figura 1- Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.



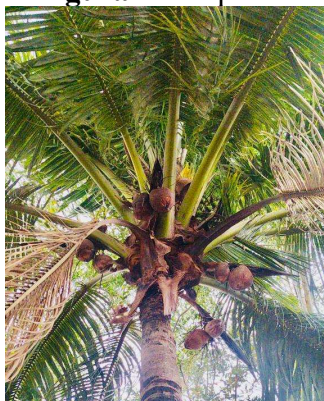
Fonte: Balanço energético nacional – BEN (1982).

Segundo Rambo et al. (2020), logo a biomassa produzida a partir de resíduos será a principal fonte de recursos para a obtenção de energia e de adjuvantes tecnológicos, em substituição aos produtos fósseis, isso como desfecho do crescimento populacional exacerbado e da atual forma de exploração de recursos naturais que levarão ao seu esgotamento.

5.2. Coco-da-baía

O fruto do coqueiro (Figura 2), denominado de coco, é uma drupa constituída por epicarpo, mesocarpo, endocarpo, tegumento e albúmen (SILVA, 2008).

Figura 2- Coqueiro.



Fonte: Autora (2021).

O coco-da-baía é de origem asiática e chegou ao Brasil por volta de 1553 trazido por navios portugueses para a região do recôncavo baiano. Daí difundiu-se por toda costa brasileira naturalmente, tendo duas importantes variedades: a *Typica* (coqueiro gigante) e *Nana* (coqueiro-anão). O coqueiro é típico de clima quente-úmido sem muitas variações, exigindo boa luminosidade e temperatura anual média de 27 °C, adaptando-se melhor a solos leves e com boa drenagem (MAGALHÃES et al., 2017).

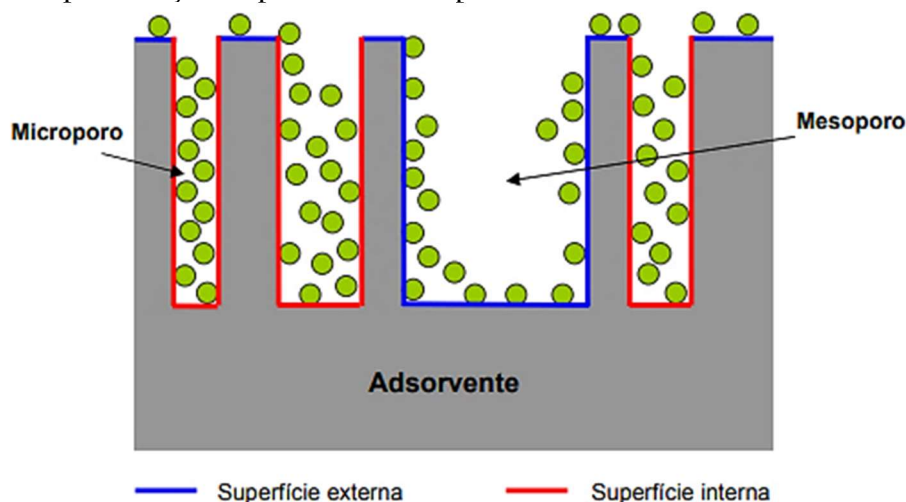
Rosa et al. (2001) destacaram uma peculiaridade do uso do coco no Brasil. Enquanto mundialmente o fruto do coqueiro é considerado uma oleaginosa sendo explorado prioritariamente em seu estágio final de maturação na fabricação de óleo e outros produtos, no Brasil também é consumido imaturo, aproveitando-se a água. Rosa et al. (2001) ressaltam em seu trabalho a necessidade de desenvolvimento de alternativas de aproveitamento de casca de coco verde para a redução da disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários e geração de uma nova fonte de rendimento.

5.3. Carvão ativado

O carvão ativado é um adsorvente eficaz amplamente empregado na separação e remoção de poluentes em efluentes líquidos, como na indústria farmacêutica, tratamento de água e outras utilizações industriais. Se trata de um material de carbono não grafítico quimicamente inerte com grande área de contato superficial, utilizado em pó ou granulado. Devido sua porosidade, as moléculas das impurezas responsáveis pelo odor, cor, gosto e substâncias tóxicas nos efluentes, são adsorvidas no carvão ativado e retidas por forças físicas (DEMIRAL et al., 2011; MOREIRA, 2010).

A superfície interna é a superfície microporosa composta pelas paredes dos microporos e a superfície externa é a não-microporosa composta pelas paredes dos mesoporos, macroporos e superfície não porosa da amostra (Figura 3) (MURANAKA, 2010).

Figura 3- Representação esquemática da superfície interna e externa de um adsorvente.



Fonte: Muranaka (2010).

O processo de produção do carvão ativado é composto pelas etapas de carbonização e de ativação, podendo ser realizadas em conjunto ou separadamente. Quando a matéria-prima utilizada se trata de uma biomassa residual, ela recebe o nome de *biochar* (biocarvão), configurando uma alternativa em relação aos problemas ambientais, uma vez que pode ser utilizada como adsorvente devido aos seus microporos gerados no processo de pirólise (ODA, 2017; FOONG et al., 2020; BATISTA et al., 2018).

Atualmente existem vários estudos explorando as diversas matérias primas promissoras na produção de carvão ativado para adsorção, como Costa, Furmanski e Domingui (2015) que produziram carvão ativado a partir de cascas de nozes, Moraes (2019) que produziu a partir de *Eucalyptus dunnii*, e ainda Nemet (2020) que em seu trabalho produziu e caracterizou carvão ativado de biomassa de baru (*Dipteryx alata Vog*). Nos exemplos citados obtiveram-se resultados satisfatórios para a produção de carvão ativado utilizando materiais orgânicos.

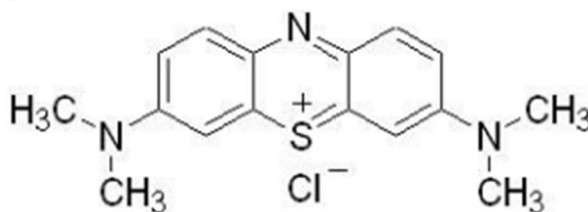
5.4. Azul de metileno

As indústrias químicas, têxteis, alimentícias e farmacêuticas empregam diariamente grandes quantidades de corantes em suas linhas de produção, e conseqüentemente há a

presença desses corantes em seus efluentes. Essas substâncias, geralmente não biodegradáveis, podem ser tóxicas e cancerígenas apresentando sérios riscos à saúde humana e ao ambiente, pois altas concentrações em corpos hídricos podem reduzir a taxa de oxigênio dissolvido e a penetração da luz, acarretando na eutrofização (SÁNCHEZ-OROZCO et al., 2018).

O azul de metileno é um corante orgânico catiônico utilizado na farmacologia, medicina, biologia e na química, e comumente aplicado em estudos e experimentos como composto modelo para testes de adsorção, afim de analisar a remoção de corantes em meio aquoso visando de modo geral o tratamento de água. É um composto aromático heterocíclico e do tipo básico com estrutura molecular representada na Figura 4 (MOREIRA, 2010; SOARES, 2014).

Figura 4- Estrutura molecular do azul de metileno.



Fonte: Soares (2014).

Esse adsorvato permite identificar a capacidade de adsorção de variados adsorventes, por meio da observação dos meso-poros do adsorvente onde suas moléculas ficam retidas em decorrência de seu tamanho. (JIS, 1992 apud MULLER et al., 2019).

5.5. Adsorção

Dentre as técnicas de separação utilizadas atualmente a adsorção tem sido destaque, isso se deve a alta seletividade do processo, incluindo o âmbito molecular, demonstrando eficácia na remoção de compostos odoríferos, toxinas liberadas por cianobactérias, subprodutos organo-halogenados e microcontaminantes orgânicos (CRITTENDEN et al., 2012).

A adsorção é a transferência de massa por meio da habilidade que um sólido, geralmente com partículas porosas, tem de concentrar substâncias de líquidos ou gases em sua superfície externa, possibilitando a separação dos componentes de determinado fluido. O material que se detém na interface do sólido é denominado de adsorvato ou adsorbato e a

superfície sólida na qual o adsorvato se acumula, de adsorvente ou adsorbente (LUCENA, 2018).

Quanto a intensidade das forças envolvidas na adsorção, pode-se separá-las em duas classificações: adsorção física e adsorção química. Sendo a adsorção física aquela em que o adsorvato e o adsorvente estão ligados de forma relativamente fraca, atribuída as forças de Van der Waals. E a adsorção química (quimissorção) aquela que envolve a troca ou partilha de elétrons entre as moléculas do adsorvato e do adsorvente, gerando uma ligação química consideravelmente mais forte (NASCIMENTO et al., 2014).

5.6. Estado da arte em adsorção sólido-líquido

Nos últimos anos, considerando a crescente preocupação com as questões ambientais, energéticas e sanitárias, houveram diversas pesquisas no segmento adsorção por carvão ativado derivado de variados tipos de biomassa. Existe uma grande diversidade nos estudos de produção de carvão ativado a partir de biomassa, explorando alternativas de combinações, comparações e eficiência no processo de ativação.

SILVA, LIMA e MESSIAS em 2014 estudaram as biomassas residuais da fibra/bagaço/sementes de coco, acerola e caju para a produção de carvão ativado visando redução de custos econômicos e sustentabilidade. Em seu estudo analisaram os teores de carbono e de cinzas apresentados por seus testemunhos e concluíram a promissora viabilidade desses resíduos na produção de carvão ativado, principalmente para a amostra de coco e acerola que teve o melhor desempenho, apontando para os autores a qualidade do resíduo de acerola apresentou um baixo teor de cinza e material volátil, e um alto teor de carbono fixo, superando o resíduo de coco que foi a base do estudo.

Morais et al. (2019) produziram e qualificaram carvão ativado de *Eucalyptus dunii* avaliando a capacidade de adsorção de azul de metileno, adotando a ativação física por vapor d'água, concluindo que houve eficiência no uso da madeira para a produção de carvão ativado que apresentou excelentes propriedades texturais e adsorptivas.

A casca de noz foi o resíduo agrícola rico em carbono escolhido por COSTA, FURMANSKI e DOMINGUINI (2015) para produção de carvão ativado em seu trabalho. Eles fizeram uma análise comparativa das propriedades de adsorção de azul de metileno obtidas pelo carvão ativado por pirólise sem tratamento químico e com tratamento químico por cloreto de zinco ($ZnCl_2$). Seus resultados estão apresentados na Tabela 1 e constataram a

exequibilidade do uso de cascas de nozes na produção de carvão ativado com teor de carbono acima de 78% e a potencialização da adsorção por ativação química.

Tabela 1- Comparativo entre o teor de cinza e de carbono elementar nas amostras de carvão ativado preparados a partir de resíduos de biomassa com ou sem ativação química.

Fonte primária	Tratamento químico	Teor de cinzas (%)	Teor de Carbono (%)	Área superficial ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)	Q_{eq} ($\text{mg}.\text{g}^{-1}$)	Capacidade adsortiva ($\text{mg}.\text{m}^{-2}$)
Casca de nozes	Sem	6,7	79,6	408	68	0,167
	ZnCl_2	7,2	78,4	427	104	0,244

Fonte: COSTA, FURMANSKI e DOMINGUINI (2015) (adaptada).

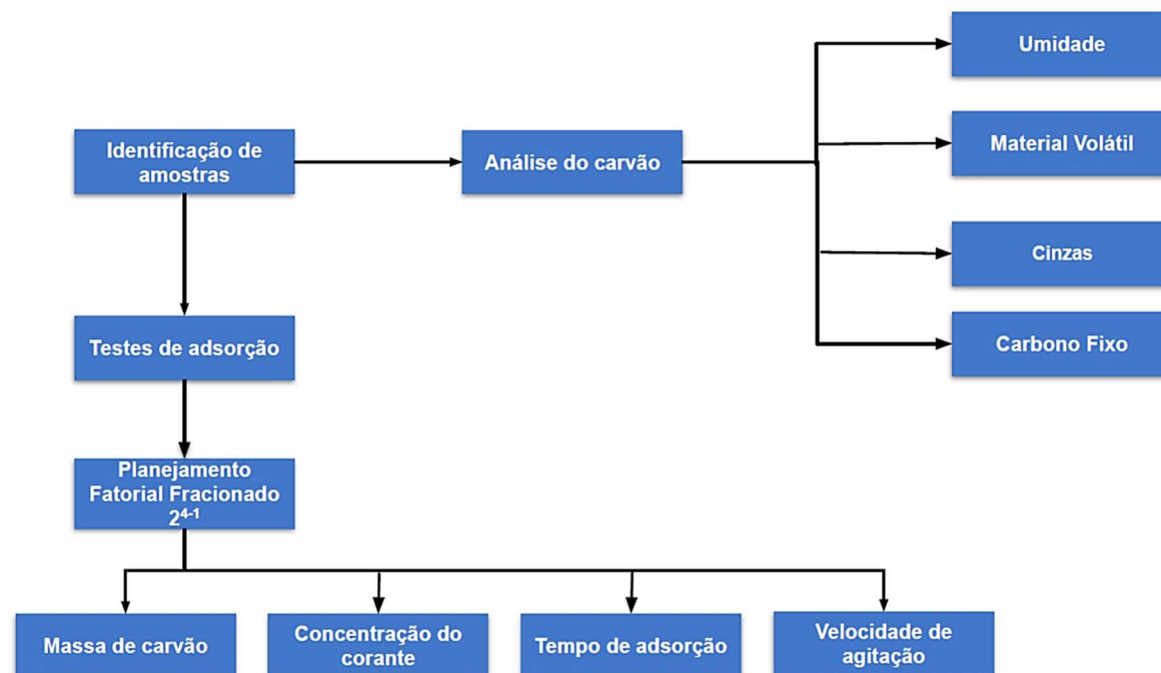
TOCHETTO (2020) estudou a adsorção de azul de metileno em carvão ativado produzido a partir de coco de Jerivá e ativado termoquimicamente com ácido fosfórico, tendo como variável observada estatisticamente a cinética (agitação) durante a adsorção. O carvão produzido apresentou alta capacidade de adsorção, microporosidade e elevada área superficial, tendo a cinética se mostrado favorável e rápida na adsorção em várias concentrações.

Em sua pesquisa FORTUNATO (2018) também lançou mão da ativação termoquímica, porém com uso de hidróxido de potássio simultaneamente a carbonização da biomassa de petíole de Buriti, em diferentes dosagens. Seu trabalho visava o estudo de técnicas de otimização da adsorção de azul de metileno e verificou que, apesar do carvão ativado possuir boa qualidade de adsorção e microporosidade, o aumento na dosagem de hidróxido de potássio não exerceu influência sobre a propriedade estudada.

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo trata dos procedimentos metodológicos empregados nesta pesquisa, abordando os materiais utilizados, preparação, caracterização e os procedimentos seguidos para realização dos testes de adsorção de azul de metileno em carvão ativado derivado de biomassa residual de coco-da-baía. A Figura 5 apresenta o desenho esquemático com todas as atividades desenvolvidas durante esta pesquisa.

Figura 5- Desenho esquemático das atividades que serão desenvolvidas.



Fonte: Autora (2021).

6.1. Coleta do coco

Os cocos utilizados nesta pesquisa são os resíduos provenientes do processo de extração da água de coco verde, de uma empresa envasadora de água da região de Palmas-TO. Deste modo, foram empregados os frutos verdes *in natura* sem a água, compostos, portanto da epiderme, mesocarpo fibroso, endocarpo e albúmen.

6.2. Produção do carvão

O carvão do coco foi produzido pelo processo de pirólise em reator de leito fixo (Figura 6) na temperatura de 500°C com taxa de aquecimento de 20 °C/min. e em seguida ativado na temperatura de 800 °C sob fluxo de vapor d'água como gás oxidante, com tempo de residência de 60 minutos para o processo de produção do carvão e mais 30 minutos para o processo de ativação. O sistema ocorreu em regime de batelada e os ensaios foram em triplicatas a fim de calcular média de rendimento.

Figura 6- Reator de leito fixo empregado na produção do carvão.



Fonte: Autora (2021).

6.3. Caracterização do carvão

Os procedimentos citados nesse capítulo, determinaram o Teor de Umidade, o Teor de Material Volátil, o Teor de Cinzas e o Teor de Carbono Fixo do carvão ativado resultante da pirólise do coco-da-baía.

6.3.1. Teor de Umidade

O teor de umidade do carvão foi determinado de acordo com a norma ASTM D 3173-87 (2017) e forneceu o percentual de umidade na amostra. A análise se baseou no cálculo de perda de peso da amostra quando submetida a um aquecimento sob condições controladas de temperatura, tempo e ambiente.

O procedimento consistiu basicamente em queimar por uma hora 1,0 g de amostra, condicionada em um cadinho de porcelana, em uma estufa (Figura 7) pré-aquecida a 104°C-110°C. Em seguida, levou-se ao dessecador (Figura 8) por 15-30 minutos e se fez a pesagem. O teor de umidade foi obtido a partir da seguinte fórmula:

$$\% \text{ umidade} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

A = massa inicial da amostra, em gramas (1,0 g);

B = massa da amostra após o aquecimento, em gramas.

Figura 7- Modelo de estufa utilizado no ensaio de teor de umidade.



Fonte: Autora (2021).

Figura 8- Dessecador empregado no ensaio de teor de umidade.



Fonte: Autora (2021).

6.3.2. Teor de Material Volátil

Conforme realizado por Lourenzi (2014), a metodologia que foi adotada para a determinação da porcentagem de material volátil seguiu o descrito na norma ASTM D 3175 (2020), onde o conteúdo de material volátil foi estabelecido pela perda de peso da amostra corrigida para o conteúdo de umidade. Por esse método determinou-se o percentual de

produtos gasosos do carvão que foram liberados durante o aquecimento controlado da amostra.

O ensaio consistiu em levar 1,0 g de amostra de carvão em um cadinho de porcelana com tampa a um forno de mufla (Figura 9) pré-aquecido a 950°C por 7 minutos, com taxa de fluxo de ar de 2-4 mudanças por minuto. Em seguida, o cadinho resfriou até atingir a temperatura ambiente, por fim se pesou a amostra. A porcentagem de material volátil foi determinada por meio da Equação 2 descrita a seguir:

$$\% \text{ material volátil} = \frac{A-B}{C} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A = massa inicial do conjunto, em gramas;

B = massa final do conjunto, em gramas;

C = massa da amostra inicial, em gramas (1,0 g).

Figura 9- Forno de mufla utilizado no ensaio de materiais voláteis.



Fonte: Autora (2021).

6.3.3. Teor de Cinzas

As cinzas são resíduos inorgânicos que permanecem após a ignição do carvão. Seguindo a metodologia de SCHUSTER (2021), o teor de cinzas foi obtido incinerando a amostra em forno tipo mufla, no qual toda a matéria orgânica foi queimada. As amostras foram colocadas em cadinhos de porcelana tarados que permaneceram em forno tipo mufla

(550°C ± 5°C) até total queima da matéria orgânica. A diferença entre a massa da amostra com o cadinho e a massa do cadinho forneceu a massa das cinzas da amostra. O teor de cinzas foi calculado pela Equação 3:

$$\% \text{ cinzas} = \frac{A-B}{C} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

A = massa do conjunto após a queima, em gramas;

B = massa do cadinho vazio, em gramas;

C = massa da amostra utilizada antes da queima, em gramas.

6.3.4. Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo diz respeito a porcentagem de matéria orgânica não volátil presente no carvão. Foi calculado pela soma das porcentagem de umidade, cinzas e material volátil, subtraído de 100, de acordo com a Equação 4 (LORENZI, 2014).

$$\% CF = 100 - (\% \text{ umidade} + \% \text{ cinzas} + \% \text{ material volátil}) \quad (\text{Equação 4})$$

6.4. Testes de adsorção

Planejamento Experimental: Delineamento Fatorial Fracionado (2⁴⁻¹)

Foi verificado através de planejamento multivariável o efeito de quatro fatores nos ensaios de adsorção para se obter as melhores respostas em remoção do corante. Foi adotado o Delineamento Fatorial Fracionado (2⁴⁻¹), com 11 experimentos, com a utilização da geratriz $I = abcd$, nessa etapa da pesquisa, conforme Figura 10. Os fatores estudados foram: (a) massa de carvão, (b) concentração do corante, (c) tempo de adsorção e (d) velocidade de agitação.

Figura 10 - Representação do planejamento experimental dos ensaios de adsorção.

Fonte: Autora (2021).

A Tabela 2 apresenta a ordem dos experimentos adotada nessa etapa da metodologia experimental.

Tabela 2 - Ordem dos experimentos empregados no DFF 2⁴⁻¹.

Ordem dos experimentos	Fatores			
	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	Tempo de adsorção (min)	Velocidade de agitação (rpm)
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0

Fonte: Autora (2021).

Os domínios das faixas dos parâmetros (valores mínimos e máximos para os fatores) estão de acordo com Rodrigues (2019) e estão apresentado na Tabela 3. Inicialmente foi feita a curva de calibração do experimento em cinco pontos (Tabela 4 e Figura 11) e a preparação de uma concentração piloto de 100 mg/L. Os ensaios de adsorção foram realizados em uma mesa agitadora orbital Shaker TE 141 (Figura 12) no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) – IFTO Campus Palmas.

Tabela 3 - Fatores e níveis empregados no DFF 2⁴⁻¹.

Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
Massa de carvão (g)	0,30	0,45	0,60
Concentração do corante (mg/L)	20	60	100
Tempo de adsorção (min)	10	20	30
Velocidade de agitação (rpm)	71	119	167

Fonte: Autora (2021).

Tabela 4- Pontos ensaiados para a curva de calibração do experimento.

Volume (mL)	Padrão (mg/L)
0,5	1
1,0	2
1,5	3
2,0	4
2,5	5

Fonte: Autora (2021).

Figura 11- Concentrações ensaiadas na curva de calibração.



Fonte: Autora (2021).

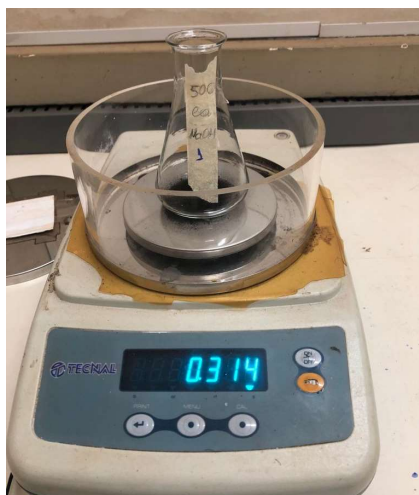
Figura 12- Mesa agitadora orbital Shaker TE 141 (TECNAL).



Fonte: Autora (2021).

Em todos os ensaios foram utilizados um volume padrão de 30 mL de solução de azul de metileno. Os ensaios seguiram a seguinte ordem: a amostra de carvão foi pesada (Figura 13) e a solução de azul de metileno preparada, em seguida esses dois elementos foram unidos em frasco Erlenmeyer e levados para a agitadora. Após a agitação da amostra, o material foi filtrado em papel-filtro qualitativo (Figura 14 e Figura 15) e a absorbância do material filtrado foi lida em espectrofotômetro digital da marca Hach (Figura 16 e Figura 17), no comprimento de onda de 660 nm. Na Figura 18 é possível visualizar lado a lado a solução com concentração de 100 mg/L antes e após a filtragem. Foram definidas três respostas para o planejamento, a saber: (a) absorbância do filtrado, (b) remoção de corante e (c) razão de adsorção (Q).

Figura 13- Pesagem de amostra de carvão ativado em balança (TECNAL).



Fonte: Autora (2021).

Figura 14- Sistema para filtração a vácuo.



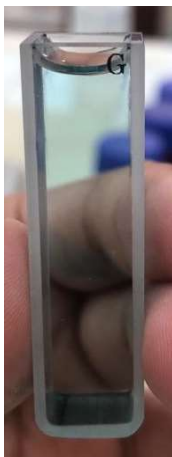
Fonte: Autora (2021).

Figura 15- Papéis-filtro qualitativos após a filtração da amostra.



Fonte: Autora (2021).

Figura 16- Cubeta do espectrofotômetro para leitura de absorvância.



Fonte: Autora (2021).

Figura 17- Espectrofotômetro digital da marca Hach.



Fonte: Autora (2021).

Figura 18- Solução com concentração de 100 mg/L antes e após filtragem.



Fonte: Autora (2021).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Caracterização do carvão

Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos das determinações dos teores de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo do carvão obtido através do processo de pirólise do coco-da-baía nas seguintes condições: Temperatura 500 °C e Taxa de aquecimento 20°C/min com tempo de residência da biomassa no reator foi de 60 minutos na produção do carvão e Temperatura de 800 °C por 30 minutos de ativação, com fluxo de vapor d'água. E em conjunto, o carvão vegetal produzido a partir de cascas de coco-da-baía por Pimenta et al. (2015), sob as seguintes condições: carbonização por dois dias, atingindo-se temperatura média final de 450°C.

Tabela 5- Valores da caracterização do carvão ativado.

Variável Analítica (%)	Carvão Ativado a 800 °C do Coco-da-baía (do autor)	Carvão Vegetal de cascas de Coco-da-baía a 450 °C (PIMENTA et al., 2015)
Umidade (%)	1,48	4,6
Cinzas (%)	17,37	1,6
Material Volátil (%)	22,99	24
Carbono Fixo (%)	58,16	74,4

Fonte: Autora (2021).

Observa-se um teor de umidade mais baixo para o carvão ativado do coco, o qual é acordante com a redução da água na biomassa em virtude da exposição a altas temperaturas inclusive durante o processo de ativação. Segundo Paz et al. (2018) quanto maior o conteúdo de umidade, menor é o poder de combustão do material, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia em combustão.

O teor de cinzas apresentado foi de 17,37 %, valor inferior ao encontrado por Ramos et al. (2009) (20%) ao produzirem carvão ativado por ZnCl_2 a partir de grãos de café (preto, verde e ardido) e superior ao carvão sem ativação de Pimenta et al. (2015). Esse alto teor de cinzas era esperado, pois conforme citado por Paz et al. (2018) o teor de cinzas está diretamente ligado com a presença de substâncias minerais como: cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro, sódio concentrados principalmente no mesocarpo. Do ponto de vista da adsorção, o alto teor de cinzas pode ser um fator negativo para a produção de carvão ativado,

visto que a matéria mineral causa um efeito dielétrico sobre o processo de adsorção de água devido ao caráter hidrofílico (RAMOS et al., 2009).

No que concerne aos teores de carbono fixo e material volátil do biocarvão estudado, este teve valores de 58,16% e de 22,99%, respectivamente, ambos inferiores aos valores encontrados por Pimenta et al. (2015) para o carvão vegetal sem ativação. Para Brisola Junior e Souza (2020) o fator mais importante para a qualidade de um carvão é o teor de carbono fixo, pois o aumento do teor de carbono resultará no aumento da reatividade do carvão.

Paz et al. (2018) ressaltam em seu trabalho que a hemicelulose e a celulose se decompõem nas faixas de temperaturas de 220 – 315°C e 315-400°C, respectivamente, enquanto a lignina se decompõe em uma faixa de temperatura bem mais ampla de 160-900°C. Desta forma, é possível afirmar que a hemicelulose e celulose da biomassa deste estudo foi decomposta durante o processo de produção do carvão, e que no processo de ativação já restava majoritariamente lignina. E de acordo com Oliveira (2014) materiais ricos em lignina e com baixo teor de hemicelulose são mais duráveis e resistentes a agressividade ambiental, configurando bom potencial no uso como bioadsorventes.

7.2. Testes de adsorção

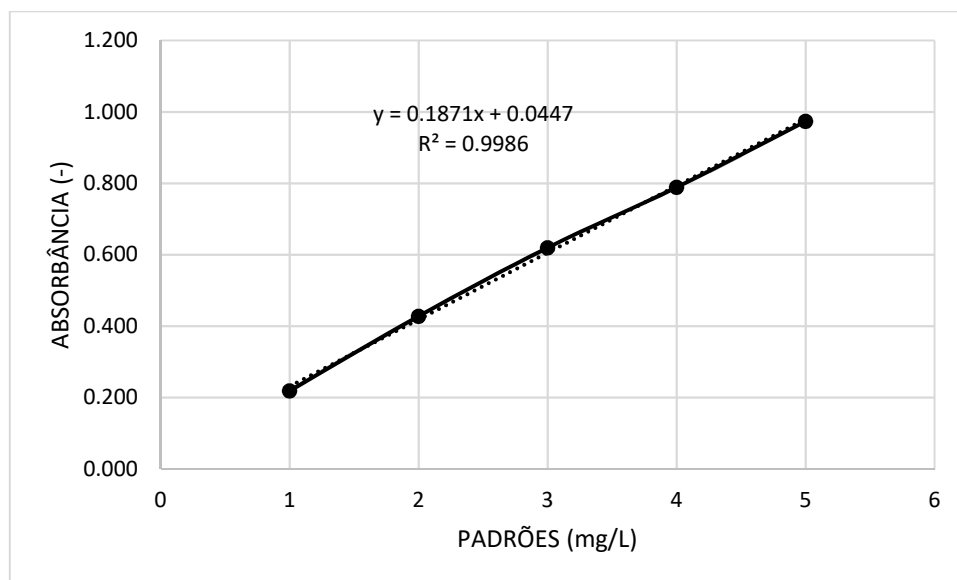
Nessa etapa da pesquisa foi realizada a adsorção do corante azul de metileno no carvão ativado gerado através da pirólise do coco, sendo observados os parâmetros de absorbância, eficiência na remoção de corante e razão de adsorção (Q).

Para a curva-padrão do experimento, obteve-se os resultados de absorbância apresentados na Tabela 6, originando o Gráfico 1 apresentado abaixo.

Tabela 6- Resultados da absorbância para curva-padrão do experimento.

Volume (mL)	Padrão (mg/L)	Absorbância
0,5	1	0,219
1,0	2	0,428
1,5	3	0,620
2,0	4	0,789
2,5	5	0,974

Fonte: Autora (2021).

Gráfico 1- Gráfico de dispersão dos valores de absorbância para curva-padrão.

Fonte: Autora (2021).

A Equação 5, obtida do Gráfico 1, permite determinar o valor da concentração de corante (X) para qualquer valor de absorbância (Y) lido no espectrofotômetro, permitindo determinar a quantidade de corante residual após a filtração da amostra.

$$Y = 0.1871 X + 0.0447 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

Y= Absorbância;

X= Concentração da amostra (mg/L).

O método escolhido foi o Delineamento Fatorial Fracionado $2^{(4-1)}$ (DFF) definido no Planejamento Experimental (descrito nos procedimentos metodológicos) que considerou que as variáveis investigadas para o teste de adsorção do índice de azul de metileno são: massa do carvão (X_1), concentração do corante (X_2), tempo de adsorção (X_3) e velocidade de agitação (X_4). Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Resultado do teste de adsorção sob efeito das quatro variáveis independentes (massa de carvão, concentração da solução do corante, tempo de adsorção e velocidade de agitação).

Experimentos	Massa do Carvão (g)	Concentração do Corante (mg/L)	Tempo de adsorção (min)	Velocidade de agitação (rpm)	Absorbância do filtrado	Eficiência de remoção (%)	Capacidade de adsorção (mg/g)
1	0,30	20	10	71	0,002	100	2
2	0,60	20	10	167	0,003	100	1
3	0,30	100	10	167	0,000	100	10
4	0,60	100	10	71	0,002	100	5
5	0,30	20	30	167	0,004	100	2
6	0,60	20	30	71	0,011	100	1
7	0,30	100	30	71	0,003	100	10
8	0,60	100	30	167	0,000	100	5
9	0,45	60	20	119	0,000	100	4
10	0,45	60	20	119	0,000	100	4
11	0,45	60	20	119	0,000	100	4

Fonte: Autora (2021).

7.2.1. Absorbância do carvão do coco-da-baía

Por meio da regressão linear foi gerada a tabela de efeitos dos fatores na adsorção do azul de metileno e a construção do gráfico de Pareto da absorbância, o que possibilita observar a influência estatística das variáveis do experimento em relação ao parâmetro absorbância, para o nível de significância de 10%. Na Tabela 8 são apresentados os efeitos da interação entre as variáveis para o resultado de absorbância das amostras filtradas.

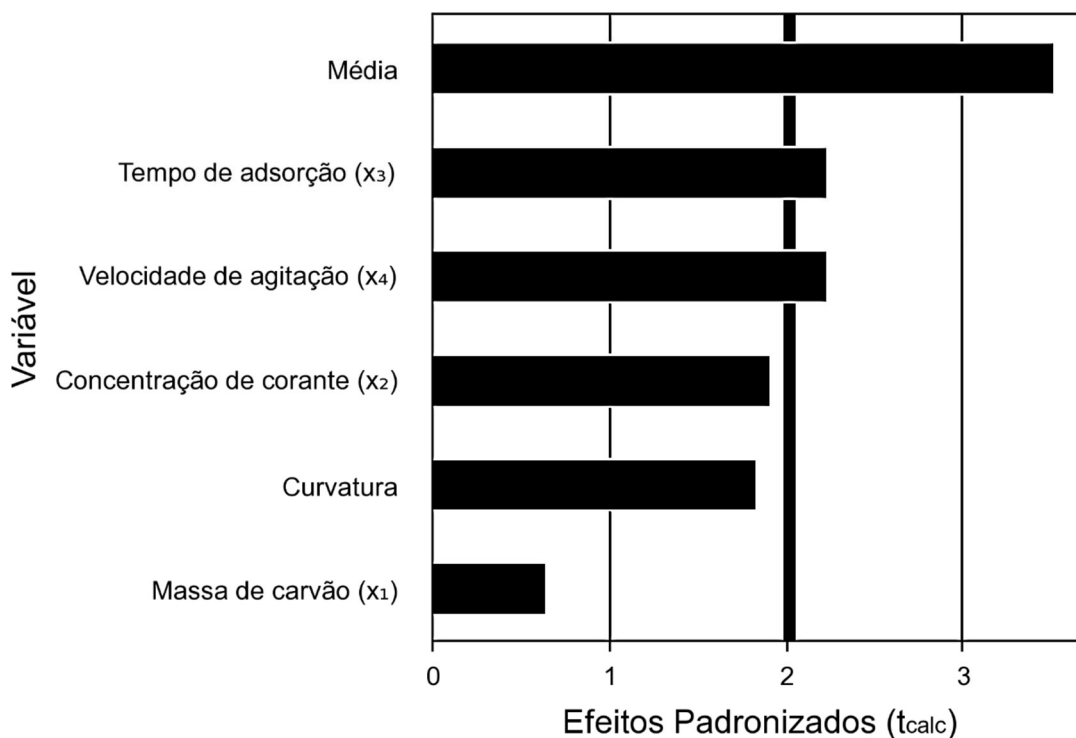
Tabela 8- Efeitos dos fatores para absorbância do Planejamento DFF.

Fatores	Efeitos	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	0,00	0,00	3,51	0,0170
Curvatura	-0,01	0,00	-1,84	0,1259
X ₁	0,00	0,00	0,64	0,5510
X ₂	0,00	0,00	-1,92	0,1134
X ₃	0,00	0,00	2,24	0,0756
X ₄	0,00	0,00	-2,24	0,0756

Fonte: Autora (2021).

O Diagrama de Pareto ilustrado na Figura 19 destaca quais variáveis tem efeitos mais significativos sobre absorbência do carvão ativado oriundo da pirólise do coco.

Figura 19-Diagrama de Pareto da absorbência do carvão do coco.



Fonte: Autora (2021).

Observa-se que os fatores de maior relevância para a absorbência no nível de confiança de 90% foram o tempo de adsorção e a velocidade de agitação. Isso significa que ao analisar esse parâmetro isoladamente poderiam ser empregadas no tratamento de efluentes com presença de corante, mesmo que em altas concentrações, quantidades menores de carvão ativado, isso porque os fatores encontrados que exercem influência estatística são a velocidade de agitação e o tempo de adsorção, sendo assim, podendo tratar efluentes muito poluídos com menos carvão, gerando um impacto financeiro positivo no processo.

7.2.2. Eficiência da remoção de corante

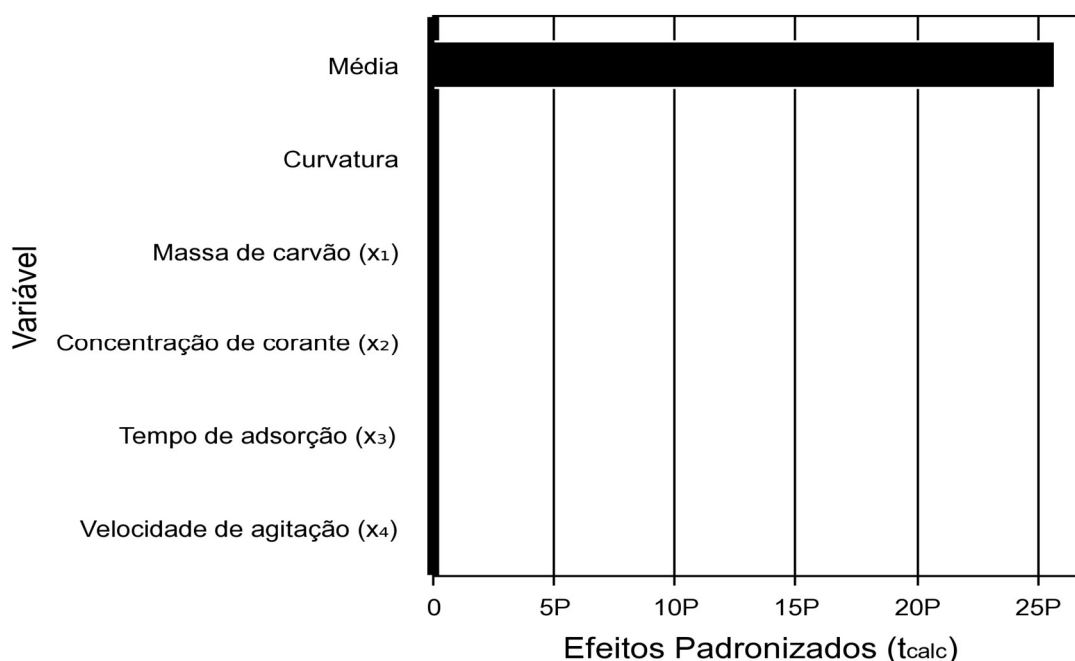
Para estudo da eficiência da remoção de corante foi construída a Tabela 9 que traz os dados resultantes da interação entre as variáveis deste estudo para o resultado deste parâmetro do carvão ativado originário da pirólise do coco.

Tabela 9- Efeitos dos fatores para remoção do corante do Planejamento DFF.

Fatores	Efeitos	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	100,00	0,00	25695032352944592,00	0,0000
Curvatura	0,00	0,00	1,91	0,1148
X ₁	0,00	0,00	0,00	1,0000
X ₂	0,00	0,00	0,00	1,0000
X ₃	0,00	0,00	0,00	1,0000
X ₄	0,00	0,00	0,00	1,0000

Fonte: Autora (2021).

O gráfico de Pareto representado pela Figura 20 demonstra que nenhuma das variáveis eleitas nesse estudo (massa de carvão, concentração de corante, tempo de adsorção e velocidade de agitação) tem influência significativa na eficiência da remoção de corante pelo biocarvão para o nível de significância de 10%. Isso se deve ao fato de que em todos os 11 experimentos realizados nenhum apresentou eficiência de remoção abaixo de 100%, sendo todos calculados segundo a equação obtida da curva de calibração do experimento. Resultado este superior ao encontrado por Maia (2020) para o carvão ativado da castanha de caju, onde a maior porcentagem de eficiência de remoção de azul de metileno encontrada foi de 98,30%.

Figura 20-Diagrama de Pareto da eficiência de remoção de corante do carvão do coco.

Fonte: Autora (2021).

Deste modo, tendo como referência a eficiência de remoção de corante pelo biocarvão é possível em sua aplicação prática delinear condições mais favoráveis economicamente sem prejudicar este parâmetro. Ou seja, para o resultado obtido neste ponto da pesquisa poderia ser

determinada a realização do tratamento de efluentes com alta concentração de corante utilizando menores quantidades de carvão, empregando no processo menores velocidades de agitação e tempo de adsorção, ocasionando assim redução de custos com insumos e energia elétrica gastos nessas etapas, e ainda aumentando a produtividade sem reduzir a eficiência de remoção de corante.

7.2.3. Razão da adsorção (Q)

A razão Q de um carvão ativado indica a capacidade máxima de adsorção de um carvão nas condições em que este foi submetido. A Tabela 10 traz os dados dos resultados da interação entre as variáveis desta pesquisa para a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado de coco-da-baía.

Tabela 10- Efeitos dos fatores para razão de adsorção do Planejamento DFF.

Fatores	Efeitos	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	4,50	0,45	10,06	0,0002
Curvatura	-1,00	1,71	-0,58	0,5847
X1	-3,00	0,89	-3,35	0,0202
X2	6,00	0,89	6,71	0,0011
X3	0,00	0,89	0,00	1,0000
X4	0,00	0,89	0,00	1,0000

Fonte: Autora (2021).

O gráfico de Pareto representado pela Figura 21 corrobora o efeito significativo das variáveis concentração do corante (X₂) e massa do carvão (X₁) atribuídas a capacidade de adsorção do biocarvão, demonstrando que tais variáveis preditoras, sobretudo a concentração de corante, influenciam consideravelmente essa capacidade neste resultado para o nível de significância de 10%. Nota-se que o fator massa de carvão tem efeito negativo sobre a razão de adsorção, isso significa que se aumentada a quantidade de massa de carvão, a razão de adsorção diminui, o que se explica pela Equação 6. O fator concentração de corante possui efeito positivo nesse parâmetro, por isso quanto maior a concentração de corante maior será a razão de adsorção.

$$Q = \frac{MCo}{MCa} \quad (\text{Equação 6})$$

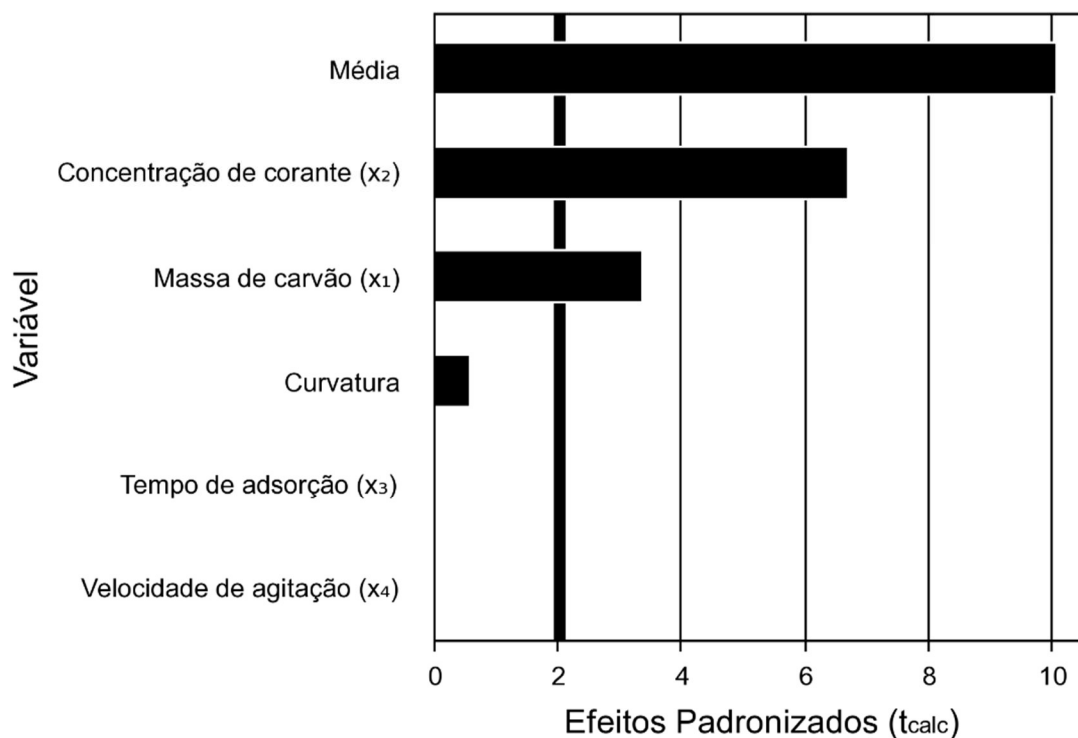
Onde:

Q= Razão de adsorção (mg/g);

MCo= Massa de corante (mg);

MCa= Massa de carvão (g).

Figura 21-Diagrama de Pareto da razão de adsorção do carvão do coco.



Fonte: Autora (2021).

Sendo assim, é coerente afirmar que o tratamento de efluentes com corantes por meio do biocarvão desta pesquisa poderia ser feito com menores velocidades de agitação e maior rapidez na adsorção sem que a razão de adsorção fosse prejudicada, assim reduzindo custos com energia elétrica e processando maiores volumes de efluentes em menos tempo de operação.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os resultados obtidos com esta pesquisa para a caracterização do carvão ativado produzido a partir do coco-da-baía sob temperatura 500 °C e taxa de aquecimento 20°C/min por 60 minutos e temperatura de 800 °C com vapor d'água por 30 minutos de ativação e adsorção de azul de metileno por esse carbono, percebe-se que apesar do Teor de cinzas encontrado de 17%, o carvão teve excelente performance na adsorção do corante, tendo eficiência de remoção de 100% em todos os 11 experimentos, além da boa qualidade relacionada ao Teor de Carbono Fixo ocasionando boa durabilidade.

Consoante aos resultados obtidos dos ensaios de adsorção, o experimento mostrou que com quantidade baixa de massa e alta concentração de corante azul de metileno a absorbância deste carvão se torna mais eficiente, visto que se obteve influência estatística apenas do tempo de adsorção e velocidade de agitação para este parâmetro.

Enquanto que para a eficiência de remoção, baixa quantidade de massa, alta concentração de corante, baixa velocidade de agitação e menor tempo de adsorção configuram o cenário mais eficiente para o carvão, já que nenhum dos fatores estudados influenciou nesse parâmetro.

A utilização de menores velocidades de agitação e menor tempo de adsorção compõem a situação mais vantajosa para o carvão quando se tem como referência a razão de adsorção (Q).

Com base em todos os dados apresentados é evidente a vantagem de se fazer a utilização da biomassa de coco que seria descartada na natureza para produção de carvão ativado em substituição às fontes não renováveis, bem como o emprego desse carvão nos processos de adsorção para remover corantes de efluentes.

Como sugestão para trabalhos futuros pode ser feito o estudo da cinética de sorção e do equilíbrio termodinâmico entre o carvão pirolítico ativado produzido a partir da biomassa do coco-da-baía e azul de metileno, também podem ser feitas pesquisas utilizando corantes reativos e partes isoladas do coco-da-baía, como utilização apenas do mesocarpo ou do endocarpo.

REFERÊNCIAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica do Brasil. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2ª ed., Brasília: 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2005_AtlasEnergiaEletricaBrasil2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8b>. Acesso em: 16 ago. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO (2021). Disponível em: <<http://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em: 15 set. 2021.
- BATISTA, E. M. C. C. et al. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. **Nature**, v. 8, p.177, 2018. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-018-28794-z>>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- BRISOLA JUNIOR, W. e SOUZA, F. M. L.. Avaliação química imediata do carvão (*Eucalyptus saligna*, *Myracrodruon balansae*, *Bursera graveolens* e *Ceratonia siliqua*) pós ativação física. **Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas da FAIT**. v. 15, n. 1, maio 2020.
- CARDOSO. **Transformação da casca de coco verde em carvão vegetal**. IX Encontro Nacional de Tecnologia Química. Goiânia, 2016. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/entequi/2016/trabalhos/50/50-8914-18277.html>>. Acesso em: 04 nov. 2021.
- CHAVES, A. M. B. et al. **Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp.*** Enciclopédia Biosfera. Centro Científico Conhecer. Goiânia, 2013.
- CONAMA, Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA; “Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.” publicada no Diário Oficial da União em 18/03/2005; Brasília, DF. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf>. Acesso em: 15 set. 2021.
- COSTA, P. D. de; FURMANSKI, L. M.; DOMINGUINI, L.; Produção, Caracterização e Aplicação de Carvão Ativado de Casca de Nozes para Adsorção de Azul de Metileno. **Revista Virtual de Química**. v. 4, n.4, p. 1272-1285. Disponível em: <<https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/871>>. Acesso em: 17 ago. 2021.
- CRITTENDEN, J.C.; TRUSSELL, R.R.; HAND, D.W.; HOWE, K.J.; TCHOBANOGLIOUS, G. (2012) **MWH's Water Treatment Principles and Design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 1901 p.
- DEMIRAL, H.; DEMIRAL, I.; KARABACAKOGLU, B.; TÜMSEK, F. Production of activated carbon from olive bagasse by physical activation. **Icheme**, v. 89, p. 206–213, 2011.

FOONG, S. Y et al. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions. **Elsevier**, v. 389, n. 1, 2020. Disponível em: <<https://in.booksc.eu/book/81013637/b83d13>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

FORTUNATO, A. B. **Produção de carvão ativado a partir de biomassa: Petíole de buriti**. 2018. TCC (Graduação). Curso de Licenciatura em Química, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/2143>>. Acesso em: 19 ago. 2021.

LORENZI, P. dos S. **O potencial de geração CBM (Coalbed Methane) da jazida sul catarinense da bacia do Paraná, Brasil: Características petrográficas e químicas das camadas Barro Branco, Irapuá e Bonito**. 2014. Dissertação (Mestrado). Curso em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/95994>>. Acesso em: 18 set. 2021.

LUCENA, L. M. de **Estudo do processo de adsorção com o carvão ativado Proveniente do endocarpo de coco (*Coccus Nucifera L.*) para remoção de cor, DQO e toxicidade de efluente têxtil**. 2018. Dissertação (Mestrado). Curso em Tecnologia Ambiental, Caruaru, 2018. Disponível em: < <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30444> >. Acesso em: 03 nov. 2021.

MAGALHÃES, T. N. C. B. B. et al. **Conjuntura de mercado do Coco da Baía (*Cocos Nucifera L.*) na região amazônica, com ênfase no estado do Pará**. II Congresso Internacional das Ciências Agrárias, COINTER, 2017. Disponível em: <repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/647>. Acesso em: 04 nov. 2021.

MAIA, D. S.. **Aproveitamento do carvão ativado obtido da casca de castanha de caju no processo de tratamento de águas cinzas**. Palmas. 2020. Dissertação. Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2020.

MORAIS, R. de M et al. Produção de carvão ativado a partir de *Eucalyptus dunnii* para adsorção de corante azul de metileno. **Brazilian Journal of Wood Science**. v. 10, n.1, p. 78-87. Disponível: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/view/13560>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

MOREIRA, D. R. **Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. Porto Alegre. 2010. Dissertação. Estrutura, Superfícies e Interfaces. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3158>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

MÜLLER, L.C. et al. Adsorção do azul de metileno em serragem de *Pinus elliottii* (pinus) e *Drepanostachyum falcatum* (bambu). **Eng Sanit Ambient**. v. 24, n.4, p. 687-695. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/Bq98m83rpVvW4pWBKKBJLWB/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

MURANAKA, C.T. **Combinação de adsorção por carvão ativado com Processo Oxidativo Avançado (POA) para tratamento de efluentes contendo fenol**. 2010. Tese

(Doutorado). Departamento de Engenharia Química. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-20082010-145336/publico/Tese_Cynthia_Tiemi_Muranaka.pdf>. Acesso em: 11 set. 2021.

NASCIMENTO, R. F. do et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

NEMET, Y. K. de S. **Caracterização de bioprodutos da pirólise de biomassa de baru (*dipteryx alata vog*) e seu potencial como coadjuvantes tecnológicos**. 2020. Dissertação (Mestrado). Curso em Ciência e Tecnologia de Alimentos, a Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11612/2364>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

ODA, T. Y. R. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado a partir de lodo biológico de indústrias têxtil e de papel**. 2017. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/11076/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

OLIVEIRA, M. S. C.. **Utilização de carvão ativado na adsorção de lactose e proteínas do soro do leite**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Itapetinga, 2014.

PAZ, E. da C. S. et al. **Uso do carvão de coco na remoção de cloro da água potável**. Jornada de Iniciação Científica do Instituto Federal do Tocantins, 2018. Disponível em: <<https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/jice/9jice/paper/viewFile/9253/4128>>. Acesso em: 04 nov. 2021.

PAZ, E. da C. S. et al. **Estudo dos produtos da pirólise e potencial energético da fibra de coco da baía**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/607>>. Acesso em: 04 nov. 2021.

PEDROZA, M. M.; GOMES, M. C. F. A.; PAZ, E. C. S.; PEDROSA, A. L.; VIEIRA, G. E. G.; SOARES, J. E. M. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em processo de pirólise. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n.2, p.184-207. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46577/pdf>>. Acesso em: 15 set. 2021.

PIMENTA, A. S. et al. Utilização de resíduos de coco (*Cocos nucifera*) carbonizado para a produção de briquetes. **Ciência Florestal**. v. 25, n. 1, p. 137-144. Santa Maria, 2015.

RAMBO, M. K. D et al. Sustainability of biorefinery processes based on Baru biomass waste. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 31, n. 2, p. 273-279, 2020. Disponível: <<https://www.scielo.br/j/bchs/a/qfzMQBtLMcTDzZm6PHLtPKN/?lang=en>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

RAMOS, P. H. et al.. Produção e caracterização de carvão ativado produzido a partir do defeito preto, verde, ardido (PVA) do café. **Quim. Nova**. v. 32, n. 5, p. 1139-1143, 2009.

Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000500011>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

RODRIGUES, C. R. **Degradação Térmica da Casca de Arroz e Utilização do Carvão Obtido no Processo para Polimento de Águas Cinzas**. 2019. Dissertação (Mestrado). Curso em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11612/1449>>. Acesso em: 3 set. 2021.

ROSA, M. F. et al. **Processo agroindustrial: obtenção de pó de casca de coco verde**. Fortaleza: EMBRAPA, 2001. não paginado. (Comunicado Técnico). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT/7874/1/ct_61.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2021.

SANCHÉZ-OROSCO, R. et al. Removal of methylene blue from aqueous solution using Typha stems and leaves. **BioResources**, v. 13, p. 1696-1710, 2018. Disponível em: <<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/removal-of-methylene-blue-from-aqueous-solution-using-typha-stems-and-leaves/>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

SCHUSTER, L. **Avaliação da adsorção do azul de metileno por engaço de uva na forma *in natura* e na forma de carvão ativado**. 2021. TCC (Graduação). Curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.uergs.edu.br/xmlui/handle/123456789/1756>>. Acesso em: 14 set. 2021.

SEYE, O. **Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (*Pennisetum Purpureum Schaum*)**. 2003. Tese (Doutorado). Curso em Planejamento de Sistemas Energéticos, Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/263355/1/Seye_Omar_D.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2021.

SILVA, L. C. F. da **Utilização de Resíduo Lignocelulósico na obtenção de Chapa de Madeira Aglomerada Homogênea e Compósito Reforçado com Fibra de Vidro-E**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tese de Doutorado. Natal, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/12719>>. Acesso em: 04 nov. 2021.

SILVA, R. V. T. O.; LIMA, V. N. de; MESSIAS, A.S. **Uso de biomassa residual como alternativa para a produção de carvão ativado**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis: 2014. Disponível em: <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/uso-de-biomassa-residual-como-alternativa-para-a-producao-de-carvo-ativado-17735>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

SOARES, L. A. **Síntese, ativação e caracterização de carvão obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar e avaliação da capacidade de adsorção**. 2014. Dissertação (Mestrado). Curso em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/22736/1/LarissaAzevedoSoares_DISSERT.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2021.

TOUCHETTO, G. A. **Adsorção do corante azul de metileno utilizando um novo adsorvente obtido do coco de jerivá (*Syagrus romanzoffiana*):** Caracterização, estudo cinético e termodinâmico. 2020. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2020. Disponível em: <<https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/4057>>. Acesso em: 18 ago. 2021.