



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

VICTOR FERREIRA DINIZ

**APROVEITAMENTO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO
DE CARVÃO ATIVADO VISANDO REMOÇÃO DE CLORO EM ÁGUA
INDUSTRIAL.**

**Palmas - TO
2020**

VICTOR FERREIRA DINIZ

**APROVEITAMENTO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO
DE CARVÃO ATIVADO VISANDO REMOÇÃO DE CLORO EM ÁGUA
INDUSTRIAL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito 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

**Palmas - TO
2020**

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

D585a Diniz, Victor Ferreira
 APROVEITAMENTO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
 PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO VISANDO REMOÇÃO
 RESÍDUOS DE CLORO EM ÁGUA INDUSTRIAL. / Victor Ferreira
 Diniz. – Palmas, TO, 2020.
 48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2020.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. bagaço de cana-de-açúcar. 2. carvão ativado. 3. cloro residual.
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

VICTOR FERREIRA DINIZ

APROVEITAMENTO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO VISANDO REMOÇÃO DE CLORO EM ÁGUA INDUSTRIAL.

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

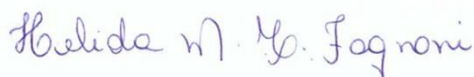
Orientador: Marcelo Mendes Pedroza

Aprovado em: 24/08/2020

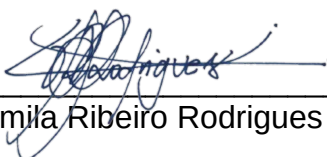
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador



Prof. Dr^a. Helida Monique Cordasso Fagnani - IFTO



Prof. Me. Camila Ribeiro Rodrigues - UNIRG

RESUMO

DINIZ, Victor Ferreira. **Aproveitamento de bagaço de cana-de-açúcar para produção de carvão ativado visando remoção de cloro em água industrial.** 2020. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2020.

Esta pesquisa realizou a degradação térmica de bagaço de cana-de-açúcar, com a finalidade de obtenção de carvão ativado, visando aplicação industrial. As amostras do resíduo foram coletadas nas dependências da Empresa BUNGE (Tocantins). A secagem dos resíduos foi realizada a 50 °C. Todas as amostras foram trituradas e peneiradas em peneira com abertura de 0,85 mm. A biomassa foi caracterizada por meio da análise imediata e elementar. A pirólise foi realizada em reator de leito fixo. Foi verificado através de planejamento multivariável o efeito de dois fatores no sistema de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar: temperatura e taxa de aquecimento. O carvão ativado obtido no processo foi usado para remover cloro residual de água de abastecimento em coluna de adsorção. Teores de umidade, material volátil e cinzas na biomassa foram de 7%, 81,8% e 8,4%, respectivamente. O maior rendimento de carvão ativado a partir da pirólise do bagaço de cana em reator de leito fixo a taxa de 51% em temperatura de 360° C e taxa de aquecimento de 45° C/min. A eficiência de remoção do cloro residual foi de 100%, tratando um volume de 4320 L de água de abastecimento bruta com cloro ajustado a 2mg/L em todo o período de monitoramento do sistema empregado nessa pesquisa.

Palavras Chave: bagaço de cana-de-açúcar, carvão ativado, cloro residual

ABSTRACT

DINIZ, Victor Ferreira. **Use of sugarcane bagasse for the production of activated carbon to remove chlorine in industrial water.** 2020. 51 p. Course Conclusion Paper - Bachelor of Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2020.

This research performed the thermal degradation of sugarcane sugar, with the use of activated activated carbon, industrial application. The residue samples were collected in the premises of the BUNGE Company (Tocantins). The drying of the residues was carried out at 50 oC. All the pieces were crushed and sieved through a 0.85 mm sieve. A biomass was characterized through immediate and elementary analysis. A pyrolysis was performed in the PackedBed Reactor. It was selected through multivariable planning or the effect of two factors in the cane sugar pyrolysis system: temperature and heating rate. The activated carbon used in the process was used to remove residual chlorine from the supply water in the adsorption column. moisture, volatile material and ash contents in biomass were 7%, 81.8% and 8.4%, respectively. The highest yield of activated carbon since sugarcane bagasse pyrolysis in a fixed bed reactor at a rate of 51% at a temperature of 360 ° C and a heating rate of 45 ° C / min. The efficiency of removing residual chlorine was 100%, treating a volume of 4320 L of water from the water supply with chlorine adjusted to 2mg / L throughout the monitoring period of the system used in this research.

Keywords: sugarcane bagasse, activated carbon, residual chlorine

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regiões produtoras de açúcar no Brasil	17
Figura 2 - Área cultivada e área para expansão do plantio de cana-de-açúcar	18
Figura 3 - Comparativo de produtividade de cana-de-açúcar por Região.	18
Figura 4 - Comparativo de área, produtividade e produção de cana-de-açúcar no Brasil	19
Figura 5 - Processo de adsorção das moléculas em um fluido.	24
Figura 6 - Cinética da biomassa <i>in natura</i>	30
Figura 7 - Preparação da amostra (a) Processamento do bagaço de cana (b) bagaço <i>in natura</i> e após o processamento (c) Biomassa com adição de água (d) Briquete produzido	31
Figura 8 - Processo de secagem dos briquetes	31
Figura 9 - Reator de leito fixo empregado nos experimentos de pirólise de biomassa	32
Figura 10 - Processo de pirólise da biomassa de cana	33
Figura 11 - Carvão ativado produzido a partir do processo de pirólise da biomassa de cana-de-açúcar	33
Figura 12 - Representação do planejamento experimental utilizado na pirólise de bagaço de cana-de-açúcar (Delineamento composto central rotacional 22).....	34
Figura 13 - Sistema de descloração de água de abastecimento obtido da pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.....	36
Figura 14 - Processo de análise imediata biomassa de cana-de-açúcar.	37
Figura 15 - Diagrama de Pareto para a obtenção de carvão a partir da biomassa de cana	41
Figura 16 - Rendimento do Carvão (experimental) x Rendimento do Carvão (predito)	43
Figura 17 - Superfície para obtenção de carvão de bagaço de cana a partir das variáveis Temperatura e Taxa de aquecimento.	44
Figura 18 - Superfície apresentada na Figura 17 em três dimensões	44
Figura 19 - Teste de azul de metileno empregando o carvão proveniente do bagaço de cana-de-açúcar.	45
Figura 20 - Remoção de cloro residual em água de abastecimento empregando o carvão proveniente do bagaço de cana-de-açúcar.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do bagaço de cana.....	20
Tabela 2 - - Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a Pirólise de bagaço de cana-de-açúcar	34
Tabela 3 - Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR .	34
Tabela 4 - Resultados obtidos durante a caracterização do bagaço da cana-de-açúcar	37
Tabela 5 - Resultados da caracterização da biomassa de cana-de-açúcar comparado a outros resíduos pesquisados para a produção de carvão ativado.....	38
Tabela 6 - Resultados do planejamento DCCR obtidos da pirólise do bagaço de cana em reator de leito fixo.	40
Tabela 7 - Coeficientes de regressão do Planejamento DCCR obtidos da produção de carvão da biomassa de cana em sistema de pirólise com intervalo de confiança de 95%.	42
Tabela 8 - ANOVA para a produção de carvão em processo de pirólise de bagaço de cana em reator de leito fixo.	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre o processo físico e químico de adsorção.	24
---	----

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
LARSEN	Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética
NBR	Norma Brasileira Registrada
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVC	Policloreto de Polivinila
PDEE	Plano Decenal de Expansão de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MME	Ministério de Minas e Energia
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. JUSTIFICATIVA.....	13
3. OBJETIVO GERAL.....	14
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
5. REVISÃO DE LITERATURA	15
5.1. A produção de cana-de-açúcar no Brasil: cenário e projeções.	15
5.2. O bagaço de cana-de-açúcar e seu uso como resíduo industrial.....	20
5.3. Carvão ativado: produção e seus usos.....	21
5.4. Adsorção de águas residuárias.	23
5.5. Adsorção de cloro residual em águas industriais.....	25
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	27
6.1. Preparação de amostras.....	27
6.2. Procedimentos de análise utilizados para caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar.	28
6.2.1. Umidade	28
6.2.2. Teor de Cinzas	28
6.2.3. Material Volátil.....	29
6.2.4. Teor de Carbono Fixo	29
6.2.5. Análise elementar	29
6.3. Cinética de secagem do bagaço da cana-de-açúcar in natura.....	30
6.4. Preparação de Briquetes da biomassa bagaço de cana-de-açúcar em pó	30
6.5. Pirólise de bagaço de cana-de-açúcar em reator de leito fixo	32
6.6. Teste de adsorção de azul de metileno em coluna de carvão ativado	35
6.7. Teste de Adsorção de Cloro residual em filtro de carvão	35
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
7.1. Caracterização da biomassa	36
7.2. Testes de pirólise da biomassa	40
7.4. Remoção de cloro de água através da adsorção em carvão ativado	46
8. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

É consenso que deve-se buscar alternativas para a melhor utilização dos nossos recursos naturais e que sua preservação configura como principal ativo na agenda de gestores e defensores do meio ambiente, sendo do interesse de todos o seu uso com parcimônia a fim de que se possa aliar o desenvolvimento econômico com a preservação da natureza.

A década de 70 foi crucial no que tange à necessidade de buscar alternativas energéticas para a sociedade, principalmente quanto à redução da dependência do petróleo como fonte de energia principal. No entanto, essa busca não se limita a novos recursos, pois, na preservação do meio ambiente também está incluído o cuidado com a água utilizada, item escasso em sua natureza potável, que tem enfrentado o desperdício e a poluição diante do rápido crescimento populacional e industrial decorrente da primeira revolução industrial.

Nesse contexto, a comunidade científica tem se debruçado em meios que possam servir como fontes alternativas para o atendimento a essas demandas, como é o caso do uso dos resíduos agrícolas e agroindustriais, principalmente a biomassa gerada, como uma das soluções para o melhor uso e preservação dos recursos naturais (DE MORAES et al, 2017).

Para o Brasil, uma importante alternativa pode ser encontrada na produção de cana-de-açúcar. Segundo o Relatório de Acompanhamento de Safra de 2019 da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, a produção de cana-de-açúcar no Brasil foi estimada para a safra 2019/2020 em cerca de 642,7 milhões de toneladas, em uma área de aproximadamente 8,48 milhões de hectares, garantindo o país como maior produtor mundial (CONAB, 2019). A cana-de-açúcar possui utilização múltipla, desde o seu uso *in natura* para a produção de aguardente, açúcar, etanol, além da possibilidade de uso dos seus resíduos com a produção de biomassa e ração animal, a partir da utilização do bagaço, vinhoto, palhiço e levedura.

De todos os resíduos da unidade industrial sucroalcooleira, o bagaço é um dos mais atrativos, apesar de não ser o de maior volume. Devido ao seu poder calorífico, é o principal combustível de todo o processo produtivo da fabricação do açúcar e do álcool. Uma tonelada de cana gera cerca de 250 kg de bagaço, dos quais 90% são usados na produção de energia. A importância da cogeração de energia utilizando o bagaço reside no fato de que ela coincide com o período de seca dos

reservatórios das usinas hidrelétricas e, dessa forma, possui importante caráter complementar (UNICA, 2011 apud KAWA, 2015).

O Brasil desde a chegada dos portugueses teve suas vertentes voltadas para a produção da cana-de-açúcar, principalmente na região Nordeste do país. Mas, somente em meados da década de 70, com a iminência da crise do petróleo, o governo militar a partir do chamado Proálcool, incentivou a produção em larga escala da cana-de-açúcar (GUIMARÃES, 2008), tornando o Brasil o maior produtor mundial e migrando sua matriz produtiva da região Nordeste para a região Sudeste.

Diante disso, se observa o quanto tal setor é importante para o país, bem como o potencial e a quantidade de resíduos que podem ser gerados a cada safra ou nova colheita podendo os mesmos serem utilizados visando a preservação dos recursos naturais do qual tem sido destaque. A transformação do bagaço de cana em carvão ativado pode se mostrar como importante alternativa, tanto como solução para a utilização do resíduo gerado a partir da cana-de-açúcar, como para seu aproveitamento na filtragem de águas residuais, seja industrial ou residencial, tendo em vista sua capacidade de adsorção dos elementos prejudiciais presentes nesses efluentes.

O carvão ativado pode ser importante também para a retirada de cloro residual presente na água que já passou pelo processo de tratamento. A utilização da água no setor industrial ocupa diversas funções, destacando seu uso na incorporação de ingredientes e fórmulas, como agente de sanitização e limpeza e como fonte de resfriamento ou aquecimento.

No tratamento de água, a desinfecção, última etapa do processo, tem por objetivo efetuar o extermínio de microrganismos presentes no líquido. Dentre os agentes empregados na etapa de desinfecção, os compostos clorados são os mais utilizados, pois possuem custos relativamente baixos, são fáceis de preparar e aplicar e muito eficazes para extinguir bactérias, bolores e esporos bacterianos (MACHADO, 2019).

O cloro, quando presente na água industrial, interfere nas características dos produtos finais da indústria, causando mudança de sabores ou prejudicando o atingimento dos princípios farmacológicos presentes nos medicamentos (MACHADO, 2019). Diante desse fato, torna-se necessária, portanto, a utilização de métodos de remoção desse constituinte na água industrial. Comumente, a nível industrial, se emprega o carvão ativado para o processo de remoção dos compostos clorados

presentes na água. De acordo com a literatura, a utilização no processo de descloração da água representa um importante gasto na indústria de alimentos, devido o alto custo de aquisição de carvão ativado (RODRIGUES, 2019).

Diante deste contexto, realizou-se a seguinte indagação: como se pode promover a remoção do cloro residual em águas industriais com a produção de carvão ativado a partir da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar?

Portando, conforme a problematização apresentada, esse trabalho possui como objetivo a utilização do carvão ativado, obtido a partir processo de pirólise do bagaço da cana-de-açúcar, de forma a se otimizar sua produção para a adsorção do cloro industrial presente em águas industriais, buscando a melhor alternativa para utilização de tal resíduo a fim de que se possa otimizar sua produção em razão da necessidade de se permitir sua produção de forma que possa ser atrativa para o seu uso em larga escala.

2. JUSTIFICATIVA

O uso do carvão ativado tem se mostrado como solução importante quando se pensa no tratamento e preservação dos corpos hídricos, porém, quando se fala em escala industrial o mesmo possui elevado custo devido à origem e o valor da matéria prima. Aliado a isso, tem-se também perdas durante o processo de recuperação do adsorvente, tornando sua utilização, muitas vezes, onerosa. (BACCAR et al., 2009 apud WERLANG et.al., 2013).

Na busca de alternativas que possam viabilizar a produção de carvão ativado a baixo custo, surge como possibilidade o uso do bagaço de cana-de-açúcar, que pretende aliar o seu uso com a filtragem do cloro residual existente na água utilizada no meio industrial, mostrando-se como uma alternativa a esse tão importante setor da economia que necessita de água tratada, ao mesmo tempo que, essa matéria prima não deve interferir na qualidade dos produtos produzidos, o que ocasionaria a perda de consumidores e consequentes prejuízos financeiros. Resumindo, se observa, a partir desses meios, na possibilidade de se promover a filtragem adequada de águas industriais em conjunto com a produção de carvão ativado de baixo custo e em larga escala bem como na utilização dos resíduos gerados pela indústria agrícola.

Desta forma, a partir de processos físicos e químicos se pretende produzir, a partir do bagaço da cana-de-açúcar, carvão ativado que possa ser utilizado na

adsorção de cloro residual de águas industriais melhorando a qualidade dos produtos de forma que não sejam afetados pelo cloro presente, que se mostra de suma importância para o consumo humano por ser um importante agente de desinfecção, mas que pode causar prejuízos às indústrias que a utilizam como matéria prima para a fabricação dos mais variados produtos.

O uso do carvão ativado pode ser considerado uma importante ferramenta para a purificação dessas águas, pois,

A adsorção em carvão ativado promove a remoção da matéria orgânica solúvel e é utilizada quando se necessita de **tratamento com qualidade mais elevada**, após o tratamento biológico ou após o tratamento físico-químico por coagulação/floculação, sedimentação e filtração, sendo considerado um processo de polimento. (ANDRES JUNIOR, 2015, p. 26, *grifo nosso*)

Conforme Santos; Alsina; Silva (2007) diversos materiais adsorventes têm sido utilizados para a retirada de compostos presentes na água ou em resíduos industriais, sendo o carvão ativo o de maior empregabilidade devido a sua alta capacidade de adsorção.

Estudos tem demonstrado o uso satisfatório do bagaço de cana como método para remoção de compostos orgânicos presentes na água (SANTOS, 2005 apud MORAIS, ALSINA, GOMES, 2007).

Segundo Worch (2012 apud LIMA; WANDERLEY, 2016) o carvão ativado pode ser produzido de qualquer material com alto teor de carbono com a utilização de uma série de metodologias com a utilização de ácidos, bases, vapores de água, nitrogênio ou dióxido de carbono. As matérias-primas mais comuns utilizadas são casca de coco, serragem, palhas de arroz, turfas e também o bagaço de cana.

Desta forma, o presente trabalho consiste na obtenção de carvão ativado por meio do processo de pirólise, que se define por um processo de decomposição térmica da biomassa na presença controlada de oxigênio (FELIX et al, 2017), a partir da utilização do bagaço de cana-de-açúcar, caracterizando-o e estudando o processo de remoção.

3. OBJETIVO GERAL

Obter, a partir do processo termoquímico de pirólise do bagaço da cana-de-açúcar, o carvão ativado visando a adsorção de cloro residual.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as características químicas do resíduo usado no experimento;
- Efetuar a pirólise do bagaço da cana-de-açúcar em reator de leito fixo;
- Caracterizar o carvão ativado produzido na reação de pirólise do bagaço da cana-de-açúcar;
- Estudar a remoção de cloro residual em coluna de filtração empregando-se o carvão obtido no processo pirolítico.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. A produção de cana-de-açúcar no Brasil: cenário e projeções.

A cana-de-açúcar ocupa importante cenário na produção agroindustrial brasileira, estando presente em todas as regiões do Brasil. Características como clima e solo propício garantem o país como maior produtor mundial da matéria prima e dos principais insumos gerados, o açúcar e o etanol. (CONAB, 2019).

A história da cana-de-açúcar no Brasil se confunde com a própria história nacional, com a produção de açúcar se iniciando ainda no período colonial, em 1520, foi importante produto para o desenvolvimento da colônia. Na década de 70, a produção chegou ao ápice após a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), iniciativa do governo brasileiro que incentivou o desenvolvimento da produção do álcool combustível no intuito inicial de enfrentar a queda nos preços da exportação de açúcar (RAMOS, 2007) e diminuir a dependência dos combustíveis derivados do petróleo, muito afetados pelas flutuações dos preços externos. Hoje acrescenta-se a essas justificativas os benefícios ao meio ambiente, por ser uma fonte de energia com reduzida emissão de CO₂ (MORAES, 2007).

Diante disso, devido a larga experiência nacional com a produção canavieira, marcada historicamente pelo apoio governamental para que a produção se expandisse no decorrer do tempo, acrescentando-se ainda o amplo espaço de

terras cultiváveis favoreceu que o país se tornasse o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Nestas perspectivas, pode-se considerar o amplo espaço ainda presente para expansão da produção nacional.

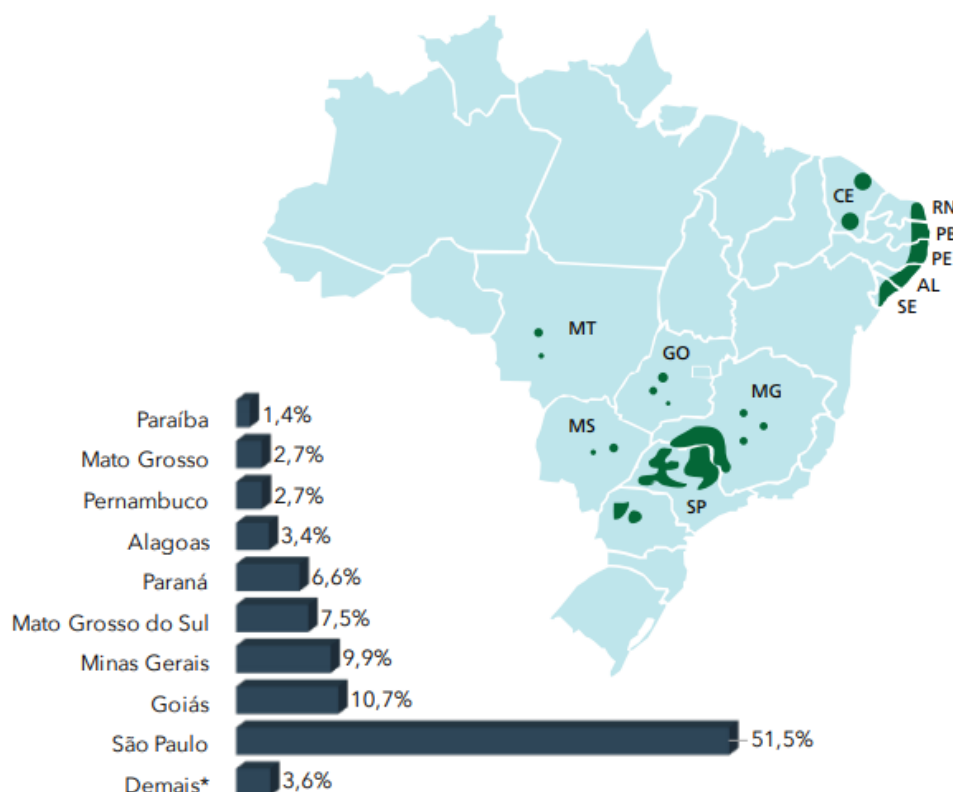
A expectativa com a expansão das exportações, motivada pelo aumento da demanda por energia limpa e renovável, além da expansão do mercado doméstico, aquecido pelo inovador carro bicomcombustível, significam, em termos macroeconômicos, um expressivo aumento do investimento, além de maior geração de renda e emprego. (MORAES, 2007. p.557)

Segundo projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDEE-2022) produzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), calcula-se que a produção de etanol hidratado¹ passe de 11,6 bilhões de litros em 2013 para 32,8 bilhões em 2022 e do etanol anidro de 7,9 bilhões de litros em 2013 para 14,3 bilhões de litros em 2022 (BRASIL, 2013).

O consumo de açúcar para a próxima década está previsto crescer a uma taxa anual de 1,7%. Isso equivale a passar de um consumo de 10,6 milhões de toneladas em 2018/19 para 12,6 milhões no final da projeção em 2022. O volume exportado em 2028/29 está projetado em 24,4 milhões de toneladas e corresponde a um aumento de 32,8% em relação às exportações de 2018/19 e a uma taxa anual de 2,9% (BRASIL, 2019). A Figura 1 demonstra onde estão localizadas as principais regiões produtoras de açúcar no Brasil, estando São Paulo com mais da metade da produção no país.

¹ O etanol hidratado é o etanol comum vendido nos postos, enquanto o etanol anidro é aquele misturado à gasolina. A diferença entre os dois diz respeito à quantidade de água presente em cada um deles. O etanol hidratado combustível possui em sua composição entre 95,1% e 96% de etanol e o restante de água, enquanto o etanol anidro (também chamado de etanol puro ou etanol absoluto) possui pelo menos 99,6% de graduação alcoólica. Dessa forma, o álcool anidro é praticamente etanol puro. Disponível em: <<https://www.novacana.com/etanol/anidro-hidratado-diferencas>> Acesso em 20 abr. 20.

Figura 1 - Regiões produtoras de açúcar no Brasil



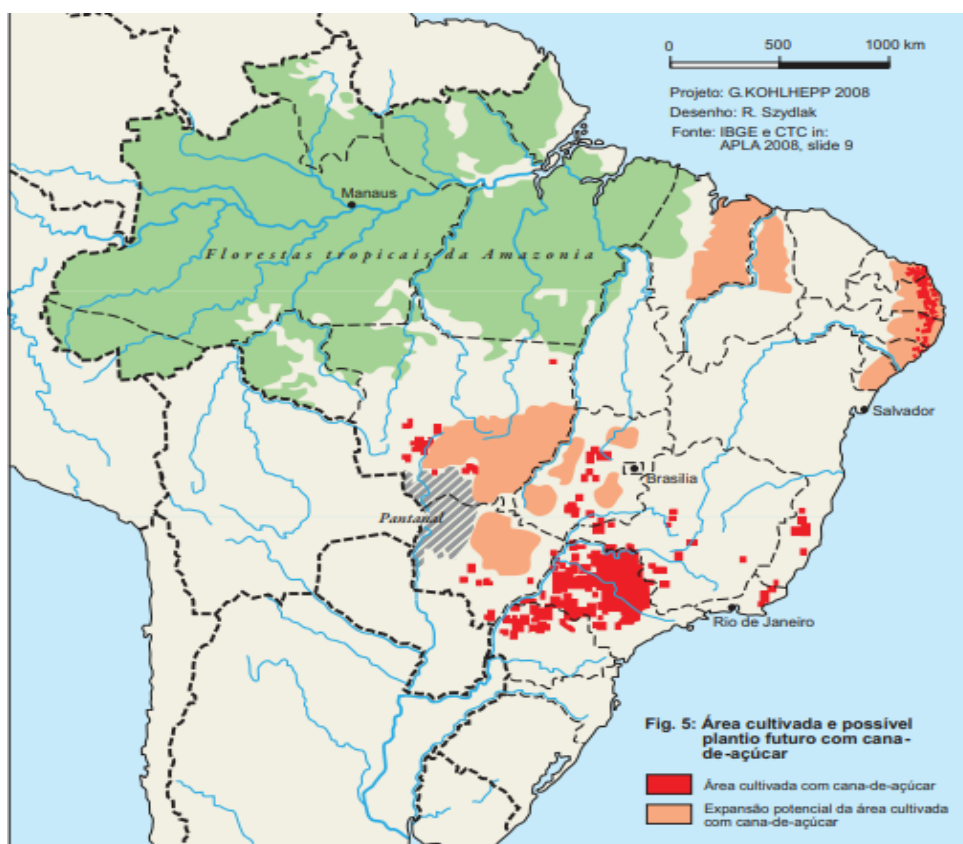
Fonte: Brasil (2019).

E ainda, conforme relatório do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) projeta-se no período de 2018/19 a 2028/29 um acréscimo de mais de 1,6 milhões de hectares de área cultivada para a cana-de-açúcar (BRASIL, 2019) sendo a segunda maior expansão, atrás apenas da soja.

A produtividade média prevista para a cana-de-açúcar (para açúcar e álcool) no Brasil ao final de 2029 está projetada em 83,4 toneladas por hectare. A média de 2018/19 é de 73,2 toneladas por hectare. (BRASIL, 2019).

Com as projeções apresentadas dos dois principais produtos gerados a partir da produção de cana-de-açúcar, observa-se o grande potencial existente para o aumento do plantio dessa importante *commoditie* nacional, como se verifica na Figura 2, extrai-se a possibilidade de expansão das fronteiras agrícolas tendo ainda amplo espaço para acréscimo da produção projetado pelos organismos governamentais tanto para produção de energia como é o caso do Etanol tanto para produção de alimento como o caso do açúcar.

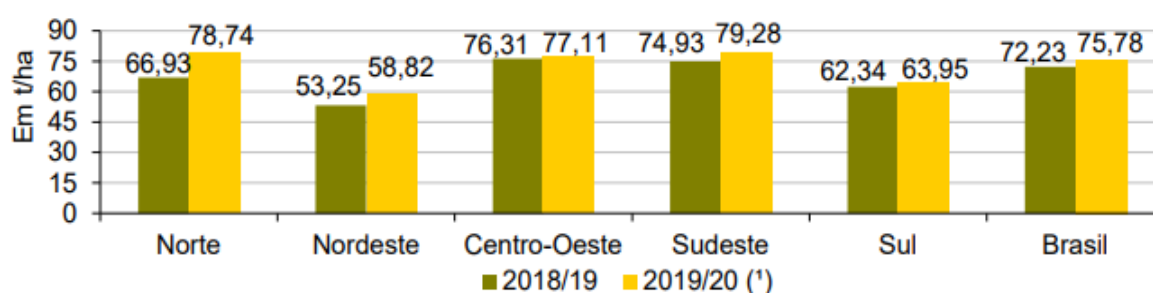
Figura 2 - Área cultivada e área para expansão do plantio de cana-de-açúcar



Fonte: Kohlhepp (2010).

Apesar do estado de Tocantins possuir pouco espaço no cenário nacional de produção de cana-de-açúcar, como demonstram as Figuras 1 e 2, segundo o mesmo relatório da CONAB (2019) a região Norte do país representa aproximadamente 1% da produção nacional de cana-de-açúcar, porém, a região e o estado do Tocantins se destacam por apresentarem produtividade média acima da média nacional, ficando atrás apenas da região Sudeste maior produtora do país. A Figura 3 apresenta o grande potencial para expansão agrícola do produto.

Figura 3 - Comparativo de produtividade de cana-de-açúcar por Região.



Fonte: Conab (2019).

Além da produtividade média acima da média nacional, o Tocantins é o maior produtor de cana da região norte e 14º na produção nacional, possui aproximadamente 28,2 mil hectares de área plantada para o cultivo de cana-de-açúcar, sendo a região do município de Pedro Afonso -TO a principal produtora, tendo a empresa BUNGE instalada para a produção de álcool a partir da cana-de-açúcar.

Como pode ser observado na Figura 4, não só o Tocantins como todo o país possui forte tendência ao aumento da área cultivada de cana-de-açúcar, com isso “planejamento é necessário neste setor, para que todas as oportunidades possam ser alcançadas e seus pontos fracos combatidos, visando ao equilíbrio e à sustentabilidade” (NEVES; CONEJERO, 2007) Decorre desse cenário a necessidade de se pensar em meios alternativos de utilização dos resíduos gerados pela cana-de-açúcar tendo em vista seu crescimento produtivo.

Figura 4 - Comparativo de área, produtividade e produção de cana-de-açúcar no Brasil

REGIÃO/UF	Área (em mil ha)			Produtividade (em kg/ha)			Produção (em mil t)		
	Safra 2018/19	Safra 2019/20	VAR. %	Safra 2018/19	Safra 2019/20	VAR. %	Safra 2018/19	Safra 2019/20	VAR. %
NORTE	49,6	46,3	(6,6)	66.932	78.741	17,6	3.317,83	3.644,15	9,8
RO	1,3	0,0	-	45.669	-	(100,0)	58,0	-	(100,0)
AM	3,5	3,5	(0,4)	67.294	83.620	24,3	236,9	293,5	23,9
PA	14,4	14,5	0,8	69.329	77.846	12,3	999,0	1.131,1	13,2
TO	30,4	28,2	(7,0)	66.642	78.596	17,9	2.023,9	2.219,5	9,7
NORDESTE	834,1	850,5	2,0	53.254	58.823	10,5	44.416,1	50.030,0	12,6
MA	35,3	34,0	(3,5)	55.692	66.156	18,8	1.964,3	2.251,9	14,6
PI	19,0	19,3	1,5	61.397	64.270	4,7	1.167,2	1.240,4	6,3
RN	53,1	55,2	4,0	45.741	49.784	8,8	2.429,3	2.749,6	13,2
PB	122,1	122,5	0,3	45.771	54.863	19,9	5.589,1	6.719,6	20,2
PE	231,3	237,3	2,6	49.407	54.243	9,8	11.425,4	12.869,8	12,6
AL	293,2	297,3	1,4	55.258	60.677	9,8	16.201,8	18.039,3	11,3
SE	36,6	37,9	3,6	51.810	55.019	6,2	1.896,3	2.086,9	10,1
BA	43,5	47,0	8,0	86.044	86.687	0,7	3.742,9	4.072,5	8,8
CENTRO-OESTE	1.793,3	1.840,9	2,6	76.313	77.106	1,0	136.855,1	141.941,9	3,7
MT	228,9	229,8	0,4	75.789	75.945	0,2	17.348,9	17.454,5	0,6
MS	647,4	661,0	2,1	76.472	73.537	(3,8)	49.504,7	48.604,2	(1,8)
GO	917,1	950,1	3,6	76.332	79.870	4,6	70.001,4	75.883,3	8,4
SUDESTE	5.342,2	5.205,7	(2,6)	74.934	79.281	5,8	400.312,1	412.717,1	3,1
MG	848,0	824,3	(2,8)	74.525	82.594	10,8	63.199,8	68.081,3	7,7
ES	46,7	48,6	4,2	68.027	59.940	(11,9)	3.174,1	2.914,3	(8,2)
RJ	21,4	30,6	43,2	49.509	27.787	(43,9)	1.057,5	850,0	(19,6)
SP	4.426,2	4.302,2	(2,8)	75.207	79.231	5,4	332.880,6	340.871,6	2,4
SUL	570,1	537,8	(5,7)	62.335	63.954	2,6	35.534,3	34.393,8	(3,2)
PR	569,1	537,1	(5,6)	62.370	63.972	2,6	35.495,2	34.361,5	(3,2)
RS	0,9	0,7	(30,0)	41.581	48.939	17,7	39,1	32,3	(17,4)
NORTE/NORDESTE	883,6	896,8	1,5	54.021	59.851	10,8	47.734,0	53.674,1	12,4
CENTRO-SUL	7.705,6	7.584,4	(1,6)	74.323	77.666	4,5	572.701,4	589.052,9	2,9
BRASIL	8.589,2	8.481,2	(1,3)	72.234	75.783	4,9	620.435,4	642.727,0	3,6

Fonte: Conab (2019).

5.2. O bagaço de cana-de-açúcar e seu uso como resíduo industrial.

Devido ao potencial já apresentado, deve-se discutir formas de se utilizar os resíduos produzidos por essa indústria de forma que a torne ainda mais sustentável, garantindo que o bagaço produzido não seja descartado de forma errônea agredindo o meio ambiente.

O bagaço de cana é o resíduo da cana após a moagem. É um material fibroso obtido após a extração do caldo num terno de moendas. Ao sair da moenda, o bagaço tem aproximadamente 30% da massa da cana e uma umidade em torno de 50%. (SILVA et al. 2007, p. 28)

Conforme Silva et al (2007) o tipo de cana, o solo, o manuseio e as formas de colheita da cana são fatores influenciadores para a composição química da biomassa gerada pela cana-de-açúcar. A Tabela 1 apresenta a composição química e física média do bagaço de cana.

Tabela 1 - Composição média do bagaço de cana

Composição química média	
Carbono	39,7 – 49%
Oxigênio	40 – 46%
Hidrogênio	5,5 – 7,4%
Nitrogênio e cinzas	0 – 0,3%
Propriedades físico-químicas	
Umidade	50%
Fibra	46%
Brix	2%
Impurezas Minerais	2%
Composição média da fibra do bagaço	
Celulose	26,6 – 54,3%
Hemicelulose	14,3 – 24,4%
Lignina	22,7 – 29,7%

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2007).

O PDEE-2022 destaca que as próprias usinas de álcool e de açúcar utilizam a maior parte do bagaço de cana produzindo energia elétrica para seu próprio consumo e estima que a quantidade de biomassa de cana passe de 140,8 milhões de toneladas em 2013 para 203,9 milhões de toneladas em 2022, devendo superar os 8,4GW médio de energia elétrica produzida até 2022. (BRASIL, 2013. p.86) sendo o excedente exportado para o Sistema Interligado Nacional (SIN) levando energia para

outras regiões. Cada tonelada de cana-de-açúcar produz em média 250kg de biomassa, considerada a maior quantidade de resíduos gerados na agroindústria brasileira (SILVA, 2007. p. 28).

Grande parte do bagaço produzido, é utilizado pelas próprias usinas no aquecimento de caldeiras e na geração de energia elétrica. É bem verdade que o bagaço de cana hoje tem sido alvo de vários estudos visando seu potencial energético no que diz respeito a geração de energia elétrica, porém, seu uso não está restrito a esse fim. Devido à grande quantidade produzida e a suas características físicas e químicas, esse material encontra um vasto campo de utilização, dentre eles na produção de ração animal, na indústria química, na fabricação de papel, papelão e aglomerados, como material alternativo na construção civil, e na produção de biomassa microbiana. Além de tudo isso, estudos têm sido realizados utilizando o bagaço de cana como biomassa adsorvente de contaminantes orgânicos com resultados satisfatórios. (SANTOS, 2005 apud SILVA et al, 2007)

Passando por processos termoquímicos o bagaço de cana, a partir de processos como pirólise e gaseificação, pode ser utilizado para a produção do carvão ativado, óleo e gás (NIÑO, 2014). Contudo, este trabalho possui como foco principal a utilização do bagaço para manufatura de carvão ativado a partir de sua pirólise em reator de leito fixo.

5.3. Carvão ativado: produção e seus usos.

Conforme Reinoso (2006 apud Macedo, 2012. p. 33) o carvão ativado se caracteriza por ser um material carbonáceo que possui alta porosidade que lhe confere a capacidade de adsorver moléculas, tanto em fase líquida como gasosa bem como impurezas no interior dos seus poros, Worch (2012 apud LIMA; WANDERLEY, 2016) complementa:

O carvão ativado é um material carbonoso que passa por um processo físico e químico para o aumento da sua porosidade. Sua elevada área porosa e seu poder de adsorção diferenciam do carvão comum. É o adsorvente mais significativo empregado em tratamento de água em virtude de remover substâncias orgânicas em diferentes tipos de água, como potável, residual, subterrânea, água de lixiviados de aterros sanitário e outras. Peculiaridades físicas e químicas do carvão determina a capacidade de adsorção e o diferencia dos carvões comuns como, por exemplo, a presença de micro e mesoporos em grande quantidade. Quanto maior quantidade de poros e mais finos, maior é a capacidade de adsorção. O tamanho dos poros também influencia no processo de adsorção pois atua diretamente na filtração de partículas e moléculas com concentrações baixas.

A busca pelo carvão ativado “ideal” tem sido objeto de diversos estudos no intuito de se poder aliar a produção de melhor custo/benefício, bem como uso de matérias primas disponíveis na natureza e que não terão outra utilidade senão o despejo em locais incongruentes e que possam causar prejuízos ambientais, como é o caso dos resíduos urbanos e industriais.

O processo de produção do carvão ativado envolve especificamente duas etapas, consistindo na carbonização da matéria-prima e a ativação (BORGES et al. 2003 apud MACEDO, 2012).

A carbonização consiste de uma decomposição térmica (pirólise) do material carbonáceo (temperaturas acima de 500°C), eliminando espécies não carbônicas e produzindo uma massa de carbono fixa com uma estrutura porosa rudimentar e uma área superficial normalmente de algumas dezenas de m²/g, onde muitos poros, extremamente fino e fechados, são formados nesta etapa. (BAÇAOUI et al., 2001; ZHONGHUAHU, 2001; SOUSA, 2007 apud MACEDO, 2012)

Beenackers e Bridgwater (1989 apud MARIN MESA, 2011) destaca que a pirólise é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas entre 500°C e 800°C em meio não oxidante formando resíduo sólido (carvão) e uma fração volátil composta de gases incondensáveis e vapores orgânicos (bio-óleo). As proporções desses compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características do material a ser tratado.

As etapas observadas quando a temperatura da biomassa aumenta são basicamente três:

- A primeira acontece à temperatura de até 180°C, nessa etapa a biomassa absorve calor, liberando a umidade em forma de vapor de água e apresentando caráter endotérmico. Entre 110°C e 180°C ocorrem reações de desidratação que envolvem os grupos –OH presentes nas moléculas dos polissacarídeos;
- A segunda etapa ocorre entre 180°C e 370°C, quando começam as reações da pirólise. Entre 180°C e 290°C ocorre a degradação da hemicelulose, e parcialmente degradadas a celulose e a lignina. A 290°C é alcançada a taxa máxima de degradação da hemicelulose e entre 290°C e 370°C, ocorre a degradação total da celulose atingindo a taxa máxima a 370°C. Nessa fase ocorre a quebra das ligações glicosídicas dos polissacarídeos. O alcatrão começa a se tornar predominante com o aumento da temperatura;
- A terceira etapa desenvolve-se acima de 370°C, quando se completa a degradação da lignina, ocorrendo a formação dos alcatrões pesados e a formação de alguns hidrocarbonetos. A degradação da lignina é responsável pela formação de cerca de 50 % do carbono fixo no material sólido. (LUENGO, 2008 apud MARIN MESA, 2011.p.25)

A ativação é um processo posterior à pirólise, quando o material carbonizado é submetido a novas reações de forma secundária a fim de se ampliar a

área superficial do material, nele aumenta-se a porosidade e cria-se outros poros no carvão, a ativação se dá por processo químico ou físico conforme explica Macedo (2012, p. 38):

- Ativação química: consiste na impregnação de agentes ativantes como cloreto de zinco ($ZnCl_2$), ácido fosfórico (H_3PO_4), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxidos de metais alcalinos no material ainda não carbonizado, com um aquecimento moderado entre $400^{\circ}C$ e $600^{\circ}C$, onde estes agentes proporcionarão a formação de ligações cruzadas, tornando o material menos propenso à volatilização, quando aquecido à temperatura elevada. Ocorre a ligação de valências livres das moléculas do adsorvente no adsorbatos.
- Ativação física: a ativação física consiste na reação do carvão com vapores de águas, dióxidos de carbono (CO_2), ou uma mistura destes dois gases a temperaturas acima dos $800^{\circ}C$, após a carbonização, onde as moléculas se ligam fracamente ao adsorvente, não alterando suas características físicas.

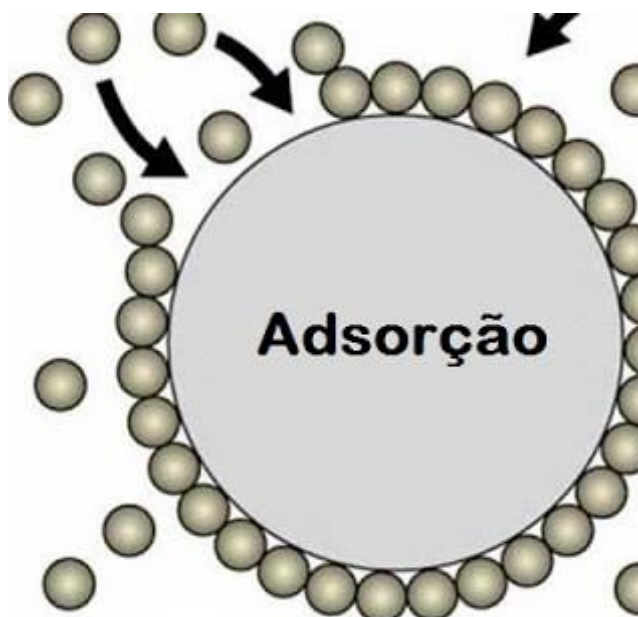
Neste trabalho, se realizou a ativação do carvão proveniente da biomassa da cana a partir do processo físico, conforme Macedo (2012) é a distribuição dos poros e o seu tamanho, aliado à sua área superficial interna são as mais importantes propriedades que influenciam no processo de adsorção, sendo melhor discutido posteriormente

Como já destacado, é preciso otimizar a produção de carvão ativado tendo vista seu melhor aproveitamento, tanto ao se pensar nos resíduos gerados pela produção agroindustrial brasileira como para tornar viável o seu uso a fim de se garantir a reutilização ou o lançamento adequado das águas residuais.

5.4. Adsorção de águas residuárias.

O processo de adsorção, representado na Figura 5, caracteriza-se pela transferência de um ou mais elementos presentes em uma fase fluida para uma superfície em fase sólida, ou seja, as moléculas de um fluido adere a uma superfície devido ao não balanceamento de forças, sendo seus principais elementos o fluido considerado como adsorativo, a superfície na qual ocorre a aderência da molécula, chamado de adsorvente e os componentes aderidos chamados de adsorbatos, podendo ser adsorção física ou química (PAZ, GARNICA, CURBELO, 2018).

Figura 5 - Processo de adsorção das moléculas em um fluido.



Fonte: Morelli² (2015).

Na adsorção física a força entre o adsorbato e a superfície adsorvente é relativamente fraca, possuindo semelhança com as forças de atração presentes na condensação de vapores, já na adsorção química, os elétrons podem ser transferidos ou compartilhados entre o adsorvente e o adsorbato formando uma ligação química entre eles (DI BERNADO e DANTAS, 2002; MULLER, 2008 apud MACEDO, 2012. p.40).

A adsorção física e química é diferenciada por parâmetros como calor de adsorção, intervalo de temperatura da adsorção, energia de ativação, especificidade do processo, além do número de camadas adsorvidas (MACEDO, 2012). O Quadro 1 apresenta um comparativo para melhor visualização dos dois processos:

Quadro 1 - Comparativo entre o processo físico e químico de adsorção.

Parâmetro	Adsorção Física	Adsorção Química
Calor de Adsorção	Mesma ordem de grandeza do calor de condensação do adsorbato	Maior e de valor equivalente a uma energia de ligação química
Intervalo de Temperatura	Ocorre até atingir à temperatura máxima de ebulição do adsorbato	Pode ocorrer a temperaturas superiores a temperatura de ebulição do adsorbato
Energia de ativação	Independente de temperatura e não requer energia de ativação	Velocidade do processo varia com a temperatura
Especificidade do processo	Não é específica	É específica
Número de camadas adsorvidas	Multimolecular	Monomolecular

Fonte: Adaptado de Macedo (2012).

² Disponível em: <<https://betaeq.com.br/index.php/2015/08/28/adsorcao/>> Acesso em Ago. 2020.

Com a utilização do carvão ativado o processo é realizado pela adsorção física, e nesse trabalho ele foi utilizado para a contenção de moléculas do cloro residual presente em águas industriais visando a melhoria da qualidade da mesma para o seu adequado descarte ou para reutilização em meios específicos.

5.5. Adsorção de cloro residual em águas industriais.

A água no meio industrial é de suma importância, pois, se encontra presente em diversas etapas da produção e nisso deve obedecer diversos padrões de qualidade conforme os fins para que é utilizada. Ao se tratar de indústrias alimentícias, de bebidas, produção cosmética ou farmacêutica o seu uso adquire outros patamares que, se não forem atendidos em seus mais elevados padrões de qualidade, pode acarretar não só prejuízos financeiros como prejuízos humanos quando seu uso for de maneira imprópria.

Entre todos os insumos utilizados na fabricação de cervejas, refrigerantes e bebidas em geral, a água é o que se encontra em maior quantidade, com um total aproximado de 90% do volume líquido. A água deve apresentar um padrão estável em sua composição e não pode conter substâncias que possam alterar o sabor, o aspecto ou a consistência do produto. [...] Os processos de tratamento da água captada de poços artesianos, mananciais ou outras fontes, devem restabelecer as características físico-químicas originais da água pura e garantir o padrão microbiológico adequado. (REVISTA MEIO FILTRANTE, 2009)

Quando se fala na produção de medicamentos o uso da água se reveste de ainda maior importância devendo ser analisada sua composição, pois, se houverem substâncias indesejadas pode comprometer a qualidade e propriedades farmacológicas dos medicamentos causando redução da eficácia de tratamentos, por isso:

Conhecer os contaminantes da água e sua origem para removê-los eficazmente, através da combinação de tecnologias apropriadas, representa um desafio constante na rotina do processo produtivo na indústria farmacêutica. (MURADIAN FILHO, 2004 apud WANCZINSKI et al, 2011, p. 213)

No Brasil, a Portaria Nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde, rege quanto aos padrões de potabilidade da água para consumo humano sendo que as empresas responsáveis pela captação, tratamento e distribuição de água para população utilizam de diversos tipos de tratamento para que possam

atender os requisitos de potabilidade previstos na norma, porém, não garante que a mesma seja adequada para uso na indústria que a possuem como principal matéria prima, como é o caso, por exemplo, da indústria de bebidas.

Por isso, deve-se buscar metodologias que possam garantir a purificação dessa água de forma que se atenda aos padrões de qualidade para uso como matéria prima de alimentos, bebidas, produção de cosméticos e medicamentos, entre elas, manterem-na livre do cloro residual proveniente das estações de tratamento o que pode alterar as propriedades do produto.

Além disso, a água bruta que passou pelo processo de cloração pode reagir em conjunto com outros compostos orgânicos formando os denominados trihalometanos, estes são produtos resultantes da reação entre substâncias químicas que se utilizam no tratamento oxidativo (cloro livre) e matérias orgânicas (ácidos húmicos e fúlvicos) naturalmente presentes na água. Sua formação está relacionada ao uso do cloro e possui caráter de nocividade quando presente na água para consumo humano (TOMINAGA; MIDIO, 1999).

O uso do carvão ativado pode ser considerado uma importante ferramenta para a purificação dessas águas, pois,

A adsorção em carvão ativado promove a remoção da matéria orgânica solúvel e é utilizada quando se necessita de **tratamento com qualidade mais elevada**, após o tratamento biológico ou após o tratamento físico-químico por coagulação/floculação, sedimentação e filtração, sendo considerado um processo de polimento. (ANDRES JUNIOR, 2015, p. 26, *grifo nosso*)

Conforme Santos; Alsina; Silva (2007) diversos materiais adsorventes têm sido utilizados para a retirada de compostos presentes na água ou em resíduos industriais, sendo o carvão ativo o de maior empregabilidade devido a sua alta capacidade de adsorção, porém, quando se fala em escala industrial ele possui um elevado custo o que permite a abertura de espaço para a pesquisa de métodos alternativos como o caso da adsorção com a utilização de resíduos agrícolas entre eles o bagaço de cana-de-açúcar.

Estudos tem demonstrado o uso satisfatório do bagaço de cana como método para remoção de compostos orgânicos presentes na água (SANTOS, 2005 apud MORAIS, ALSINA, GOMES, 2007).

O cloro é utilizado nos sistemas de tratamento de água como oxidante de compostos orgânicos e inorgânicos presentes e como desinfetante, destruindo ou inativando os microrganismos patogênicos, algas e bactérias de vida livre. O cloro é o desinfetante de água de uso mais amplo e difundido por apresentar baixo custo, longa experiência de uso, domínio das técnicas de aplicação e de controle de dosagem, confiabilidade e eficiência de desinfecção comprovadas, manutenção de residual desinfetante, importante para garantir a qualidade da água na rede de distribuição (GORZA, 2012).

A desinfecção da água com cloro é um importante meio de garantir a potabilidade da água, porém, como já discutido anteriormente pode apresentar perda da qualidade de produtos no meio industrial. Assim, o uso do carvão ativado para purificação destas águas mostra-se um meio menos oneroso, principalmente quando se pensa em escala industrial, como é o caso do uso do bagaço de cana.

A descloração da água, que consiste na retirada do cloro da água, pode ser obtida basicamente por meio de três métodos: a adição de produtos químicos para a redução, passagem através de filtros de carvão ativado e a aeração (SCHMIDT, 2019).

Devido ao espaço, nos atemos a discussão neste trabalho do processo com o uso do carvão ativado, “tendo em vista o fato de que os carvões ativados têm tendências de adsorção em geral” sendo de interesse de saber que os halogênios são adsorvidos devido ao seu comportamento como agentes oxidantes (SCHMIDT, 2019).

Quando a água contendo os compostos de cloro livre é passada pela superfície do carvão ativado, o mesmo é o primeiro a ser removido por adsorção na superfície ativa e depois de adsorvido o cloro livre é reduzido (SCHMIDT, 2019).

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

6.1. Preparação de amostras

Nesta pesquisa foi realizada a pirólise de bagaço de cana-de-açúcar, com a finalidade de obtenção de carvão ativado. As amostras do resíduo foram coletadas nas dependências da Empresa BUNGE na cidade de Pedro Afonso (TO) e transportadas em sacos plásticos identificados para as dependências do LARSEN

(Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética). A secagem dos resíduos foi feita a 50°C. Todas as amostras foram trituradas em liquidificador e peneiradas em peneira com abertura de 0,85 mm (ABNT 30, Tyler 20) para garantir a homogeneidade e facilitar os procedimentos analíticos, conforme sugerido por Vieira et al. (2009).

6.2. Procedimentos de análise utilizados para caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar.

As amostras foram caracterizadas por meio das seguintes variáveis analíticas: umidade (Método ASTM D 3173-85), Material volátil e Cinzas (Método ASTM D 2415-66) e análise elementar (C, N, H e S). A caracterização das amostras foi realizada nos laboratórios LARSEN (IFTO – Palmas e no Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo (USP).

6.2.1. Umidade

A umidade da biomassa de cana, de acordo com a norma ASTM D 3173-85, foi determinada adicionando cerca de 1g de biomassa a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Em seguida a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 110°C por um período de 1 hora. Posteriormente o cadinho foi colocado em um dessecador por 10 minutos e pesado. Este procedimento foi realizado em triplicata. O teor de umidade foi determinado segundo a Equação descrita abaixo:

$$Umidade (\%) = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] \times 100$$

Onde: A = Peso do cadinho + Amostra (em gramas)

B = Peso do cadinho + Amostra após o aquecimento (em gramas)

C = Peso da amostra (em gramas)

6.2.2. Teor de Cinzas

De acordo com o método sugerido por SANCHEZ et al. (2009). Uma massa de aproximadamente 1g de biomassa de cana foi adicionada a cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi aquecida em mufla de marca Coel

modelo Hm, a uma temperatura de 915°C durante 30 minutos. Na sequência o cadinho foi colocado em um dessecador por 1 hora e pesado. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a Equação descrita abaixo:

$$Umidade (\%) = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] \times 100$$

Onde: A = Peso do cadinho + Amostra (em gramas)

B = Peso do cadinho + Amostra após o aquecimento (em gramas)

C = Peso da amostra (em gramas)

6.2.3. Material Volátil

De acordo com SÁNCHEZ, et al. (2009), a determinação do teor de material volátil da biomassa de cana-de-açúcar foi realizada adicionando aproximadamente 1g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Em seguida a amostra foi aquecida em uma mufla à temperatura de 900° C, na ausência de oxigênio durante 20 minutos. O teor de material volátil foi determinado pela Equação descrita a seguir.

$$Material\ Volátil (\%) = \left[\frac{(P + P0) - P1}{P0} \right] \times 100$$

Onde: P = Peso do Cadinho

P0 = Peso da Amostra Inicial

P1= Peso do cadinho + Amostra Final

6.2.4. Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo foi definido por diferença, por meio da equação descrita abaixo.

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

6.2.5. Análise elementar

As amostras de biomassa da cana foram analisadas por meio do método de ignição em um analisador elementar Perkin- Elmer CHNS/O 2400 series II com o objetivo de determinar os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre da biomassa. Esta análise foi realizada no Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo (USP) – (Central Analítica).

6.3. Cinética de secagem do bagaço da cana-de-açúcar *in natura*

Com finalidade de verificar as divergências de massas nas mesmas condições, foi realizada a cinética de secagem do bagaço de cana-de-açúcar em duplicata. A análise foi feita em estufa SP-200 (Figura 6) na temperatura de 50°C durante um período de 24 h. Desta maneira pôde-se estabelecer a comparação da perda de água e materiais voláteis existentes na composição do resíduo *in natura*.

Figura 6 - Cinética da biomassa *in natura*.



Fonte: O autor (2019).

6.4. Preparação de Briquetes da biomassa bagaço de cana-de-açúcar em pó

A Figura 7 apresenta o processo de preparação e produção dos briquetes, os mesmos foram produzidos a partir de um volume de biomassa de 700 mL do resíduo *in natura* previamente seca na forma de pó a uma granulometria de 0,85mm.

Para pesagem do volume foi empregada uma balança analítica, obtendo-se um valor de aproximadamente 45g. Posteriormente foi adicionado a essa biomassa cerca de 50 mL de água destilada para hidratação. A biomassa ficou em repouso por

30 minutos. Para obtenção do formato de briquetes a biomassa hidratada foi prensada dentro de uma tubulação de 20 cm de comprimento e 28 mm de diâmetro.

Figura 7 - Preparação da amostra (a) Processamento do bagaço de cana (b) bagaço in natura e após o processamento (c) Biomassa com adição de água (d) Briquete produzido



Fonte: O autor (2020).

Os briquetes obtidos foram secos na estufa SP 200 a 40 °C por um período 48 horas, após o processo a biomassa rendeu briquetes com aproximadamente 16,06g (Figura 8).

Figura 8 - Processo de secagem dos briquetes



Fonte: O autor (2020).

6.5. Pirólise de bagaço de cana-de-açúcar em reator de leito fixo

A biomassa foi introduzida ao reator na forma de briquete. A conversão térmica foi efetuada em um reator de leito fixo (Figura 9) de quartzo, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. O reator foi operado em regime de batelada, sendo empregado vapor de água como gás de arraste. A temperatura foi ajustada conforme tratamento estatístico adotado nessa etapa da pesquisa.

Figura 9 - Reator de leito fixo empregado nos experimentos de pirólise de biomassa



Fonte: O autor (2020).

A temperatura foi ajustada para uma taxa de aquecimento de 25°C por minuto até atingir 500°C permanecendo nesta temperatura por 15 minutos, após, continuando a subir na mesma taxa até atingir 750°C permanecendo nesta temperatura por 20 minutos (Figura 10).

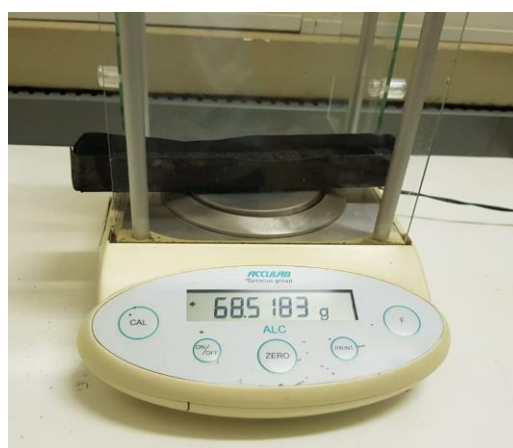
Figura 10 - Processo de pirólise da biomassa de cana



Fonte: O autor (2020).

Para fins de balanço de massa, após a reação e o resfriamento da unidade de pirólise, todos os produtos do processo (líquido e sólido) foram coletados e pesados. O material sólido foi recuperado diretamente do reator e os líquidos pirolíticos foram coletados após o sistema de condensação dos vapores em funil de separação de fases, o rendimento de carvão ativado após o processo de pirólise foi de aproximadamente 6,5g (Figura 11).

Figura 11 - Carvão ativado produzido a partir do processo de pirólise da biomassa de cana-de-açúcar

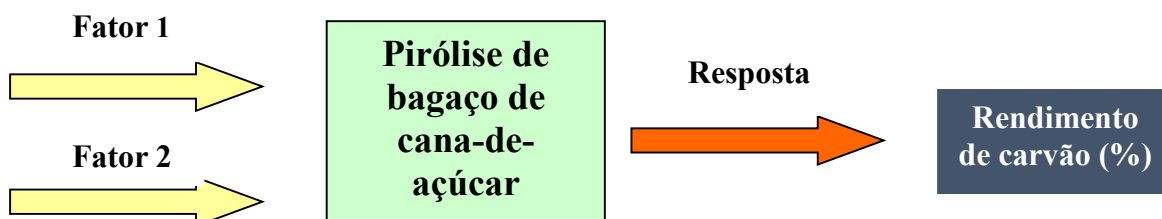


Fonte: O autor (2020).

Foi verificado por meio de planejamento multivariável o efeito de dois fatores no sistema de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar (Figura 12). Foi aplicado

um planejamento experimental 2 – Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), com 3 experimentos no ponto central, com 11 tipos de combinações entre os fatores. Os fatores estudados foram: temperatura de pirólise e taxa de aquecimento.

Figura 12 - Representação do planejamento experimental utilizado na pirólise de bagaço de cana-de-açúcar (Delineamento composto central rotacional 22)



Fonte: O autor (2020).

Os valores mínimos e máximos são apresentados na Tabela 2. Esses ensaios foram realizados na mufla MODELO W-One, MARCA EDG Equipamentos.

Onde:

Fator 1 – temperatura (°C) e Fator 2 – tempo de reação (min).

Tabela 2 - Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a Pirólise de bagaço de cana-de-açúcar

Fatores	Níveis				
	(-1,4)	(-1)	(0)	(+1)	(+1,4)
Temperatura final do processo (°C)	360	400	500	600	640
Taxa de aquecimento (°C/min)	24	30	45	60	66

Fonte: O autor (2019)

Os experimentos foram realizados de forma aleatória, com três repetições realizadas também de forma aleatória, descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR

Experimento	Fatores	
	Temperatura (°C)	Tempo de reação (min)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1,4	0
9	0	1,4

10	1,4	0
11	0	-1,4

Fonte: O autor (2019).

Para o teste de adsorção foi selecionado o carvão que apresentou resultados nas condições que se enquadravam no ponto central dos experimentos realizados. Os gráficos apresentados para demonstração dos resultados dos experimentos foram obtidos a partir do Software Protimiza Experimental Design.

6.6. Teste de adsorção de azul de metileno em coluna de carvão ativado

O teste foi feito em filtro descendente contendo como meio filtrante o carvão da pirólise da cana-de-açúcar. Realizou-se o experimento de fluxo contínuo, utilizando a solução do corante a uma concentração de 4 mg/L com pH ajustado a 7,0.

As dimensões dos filtros são: altura total da tubulação 20 cm, altura do carvão e areia na tubulação 12 cm, diâmetro da tubulação 2,0 cm. Durante a montagem do sistema foi utilizada aproximadamente uma massa de 10 gramas do carvão em cada experimento. A alimentação realizada por gravidade foi mantida a uma vazão média de 6 mL/min.

A adsorção da solução do corante foi medida em espectrofotômetro (PERKIN ELMER, LAMBDA 750) em 665 nm.

6.7. Teste de Adsorção de Cloro residual em filtro de carvão

Com o intuito de investigar a aplicação industrial do carvão ativado obtido, foi realizada análise de adsorção do cloro residual presente em água de abastecimento para verificar a eficiência do carvão produzido nessa pesquisa frente a remoção de cloro residual. O teste foi realizado em filtros descendentes, fabricados artesanalmente no LARSEN – IFTO/Campus Palmas Tocantins.

O sistema de filtração foi constituído dos seguintes componentes: (a) reservatório de água bruta, (b) bomba peristáltica, (c) motor-agitador de água bruta e (d) filtro de carvão. O transporte de líquidos foi realizado por tubulação de silicone (Figura 13).

Figura 13 - Sistema de descloração de água de abastecimento obtido da pirólise de bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: O autor (2019).

O reservatório de água bruta tem uma capacidade de 100 litros. O motor-agitador tem como meta distribuir o cloro residual da água bruta para 2 mg/L, em todo o volume armazenado. A alimentação do filtro foi controlada pela vazão programável da bomba peristáltica, em que o sistema foi operado com vazão média constante de 6mL/min, durante 30 dias que permitirá avaliar a eficiência do filtro.

Os filtros foram fabricados a partir de uma tubulação de PVC com 20 mm de diâmetro e 12 cm comprimento, onde foram adicionados no mesmo 6g de carvão ativado.

O teor de cloro ativo nas amostras, antes e após a filtração através de carvão ativado, foi determinado pelo método DPD³ colorimétrico da marca YSI Water Testing.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Caracterização da biomassa

³ N,N-dietil-p-fenilendiamina: o composto (DPD) é usado como indicador. A cor rosada característica desenvolve-se em águas que não contêm iodeto e indica a presença de cloro residual livre. O DPD é oxidado por cloro livre, resultando numa solução com uma intensidade de cor proporcional à concentração de cloro livre. A medida da concentração pode ser realizada utilizando o disco colorimétrico ou o clorímetro digital. O primeiro emprega a comparação visual como método de análise e o segundo, a absorção da solução resultante é medida por fotometria. (SOARES, 2016)

As características químicas do bagaço de cana-de-açúcar são apresentadas a seguir, os resultados foram obtidos a partir da metodologia apresentada no capítulo anterior, a partir da Análise Imediata e da Análise Elementar da biomassa, conforme se observa na Figura 14.

Figura 14 - Processo de análise imediata biomassa de cana de açúcar.



Fonte: O autor (2020).

A Tabela 4 mostra os dados obtidos durante as análises imediata e elementar do bagaço da cana-de-açúcar.

Tabela 4 - Resultados obtidos durante a caracterização do bagaço da cana-de-açúcar

Biomassa	Análise Imediata (%)		
	Cinzas	Material Volátil	Carbono Fixo
	8,40	81,80	9,80
Bagaço de cana	Análise Elementar (%)		
	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio
	44,80	5,35	0,38
			Enxofre
			0,01

Fonte: O autor (2020).

Segundo McKendry (2002) o teor de voláteis é a parte da biomassa que evapora como um gás por aquecimento, sendo assim, o teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o processo de aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850°C. Sabemos que o material volátil está diretamente relacionado a ignição, haja vista que, quanto maior o teor de material volátil maior será a reatividade e consequentemente a ignição. Já o teor de carbono fixo (CF) foi determinado em 9,8%, representando a massa restante após a liberação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade. O teor de material volátil foi de 81,80% na biomassa aqui estudada.

As cinzas representam os minerais existentes na biomassa. Valores elevados de cinzas representam baixo poder calórico, e por consequência um carvão de má qualidade no qual pode provocar corrosão dos equipamentos utilizados na conversão energética. O teor de cinzas da amostra foi de 8,4%.

A umidade corresponde à perda, em peso, sofrida pelo produto quando é aquecido em condições na qual a água é removida. Na verdade, não é apenas água a ser removida, mas também outras substâncias voláteis nessas condições. O teor de umidade da amostra aqui estudada foi de 7,00%.

Sabe-se que para um processo de obtenção de energia, a determinação de material volátil e de carbono fixo é de fundamental importância, uma vez que, valores elevados de material volátil e baixo teor de carbono fixo correspondem a uma queima rápida do combustível.

O carbono fixo promove a estabilidade e resistência térmica do combustível. A quantidade de carbono fixo de acordo com Reis et. al. (2012) está diretamente relacionada ao poder calorífico superior do carvão vegetal, uma vez que a entalpia associada ao carbono é que determina o valor calorífico dos combustíveis submetidos à pirólise. Enquanto que valores de material volátil elevados sugerem que a estrutura do carvão vegetal apresente níveis de porosidade também elevados e densidade reduzida.

Os resultados apresentados encontram-se dentro da caracterização média definida por Silva et. al. (2007), conforme descrito na Tabela 1 do Tópico 5.2, portanto, a amostra caracteriza-se dentro dos parâmetros definidos para a biomassa utilizada nos ensaios.

Complementarmente pode-se realizar uma comparação dos dados obtidos com a biomassa de cana-de-açúcar com outros resíduos utilizados para a produção de carvão ativado para retenção de partículas de águas residuais (Tabela 5)

Tabela 5 - Resultados da caracterização da biomassa de cana-de-açúcar comparado a outros resíduos pesquisados para a produção de carvão ativado.

Variável analítica	Resultados com o bagaço de cana-de- açúcar	Resultados com casca de arroz (Rodrigues, 2019)	Resultados com sabugo de milho (Machado, 2019)
Umidade (%)	7,00	6,95	9,14
Cinzas (%)	8,40	9,54	1,98
Material Volátil (%)	81,80	82,32	88,12
Carbono Fixo (%)	9,80	1,19	9,90
Carbono (%)	44,80	49,94	43,81

Hidrogênio (%)	5,35	5,73	6,53
Nitrogênio (%)	0,38	1,54	1,27
Enxofre (%)	0,01	-	-

Fonte: O autor (2020).

O teor de umidade no bagaço de cana encontra-se próximo dos resultados apresentados por Rodrigues (2019) e Machado (2019), estando dentro dos parâmetros para sua combustão, quanto menor a umidade melhor a combustão do material, pois, a quantidade de energia convertida em calor é maior (RODRIGUES, 2019).

O teor de cinzas verificado no experimento foi bem acima do resultado encontrado por Machado (2019) com o sabugo de milho, tendo em vista que é importante que o teor de cinzas seja baixo, em razão do aumento do poder calorífico, redução da quantidade de resíduos e material particulado, no entanto, o teor de cinzas para o bagaço de cana-de-açúcar encontrados no experimento estão dentro dos parâmetros verificados por Lenço (2010) que estão entre 2,8% e 21,2%.

O material volátil encontrado está próximo dos resultados verificados por Rodrigues (2019) e Machado (2019) para casca de arroz e sabugo de milho, respectivamente. Quanto maior o teor de voláteis melhor será para a biomassa se incendiar e queimar, o bagaço de cana apresentou-se dentro dos resultados encontrados por outros autores sendo 79,7% a 98,6% (ROCHA, PEREZ E CORTEZ, 2004; JENKINS et al, 1998; PAULA et al 2011, apud VIEIRA, 2012).

Lenço (2010) apresenta resultados de diversos autores para o teor de carbono fixo estando entre 5,95% e 17,8%, estando a amostra desse estudo dentro dos resultados verificados. Sturion; Pereira; Chemin (1988, apud VIEIRA, 2012) destacam que o carbono fixo presente estabelece a quantidade calor gerado pela biomassa, sendo quanto maior esse valor, mais lento o material queimar.

O teor de carbono, hidrogênio e nitrogênio encontrado no experimento estão próximos dos resultados apresentados por Machado (2019) e Rodrigues (2019), destacando apenas o teor de nitrogênio que se apresenta bem abaixo dos demais resultados apresentando nesse caso menor potencial poluidor após a combustão, Lenço (2010, p.20) apresenta, para o bagaço de cana, resultados entre 42% e 48,64% para a presença de carbono, 5,52% e 6,58% para o hidrogênio e 0,25% e 0,40% para o nitrogênio estando nossa amostra dentro dos dados informados pelo autor.

7.2. Testes de pirólise da biomassa

Os resultados dos experimentos realizados no DCCR são os descritos na Tabela 6, sendo a partir dos dois fatores investigados, temperatura do reator e a taxa de aquecimento, obtém-se o percentual de rendimento no qual se visualiza o melhor comportamento da biomassa conforme os dois fatores empregados.

Tabela 6 - Resultados do planejamento DCCR obtidos da pirólise do bagaço de cana em reator de leito fixo.

Experimento	Fatores		Rendimento do Carvão (%)
	Temperatura (°C)	Tempo de reação (C°/min)	
1	-	-	47
2	+	-	41
3	-	+	46,80
4	+	+	40
5	0	0	40,50
6	0	0	41
7	0	0	40,34
8	-1,4	0	51
9	0	1,4	41,20
10	1,4	0	36
11	0	-1,4	42

Fonte: O autor (2020).

Da Tabela 6 se observa que o melhor rendimento obtido a partir da pirólise da biomassa de cana foi no ensaio 8, com 51% de rendimento a uma temperatura de 360°C e taxa de aquecimento de 45°C/min, enquanto o menor rendimento foi no ensaio 10 com temperatura de 640°C e taxa de aquecimento de 45°C/min, obtendo-se rendimento de 36% de carvão.

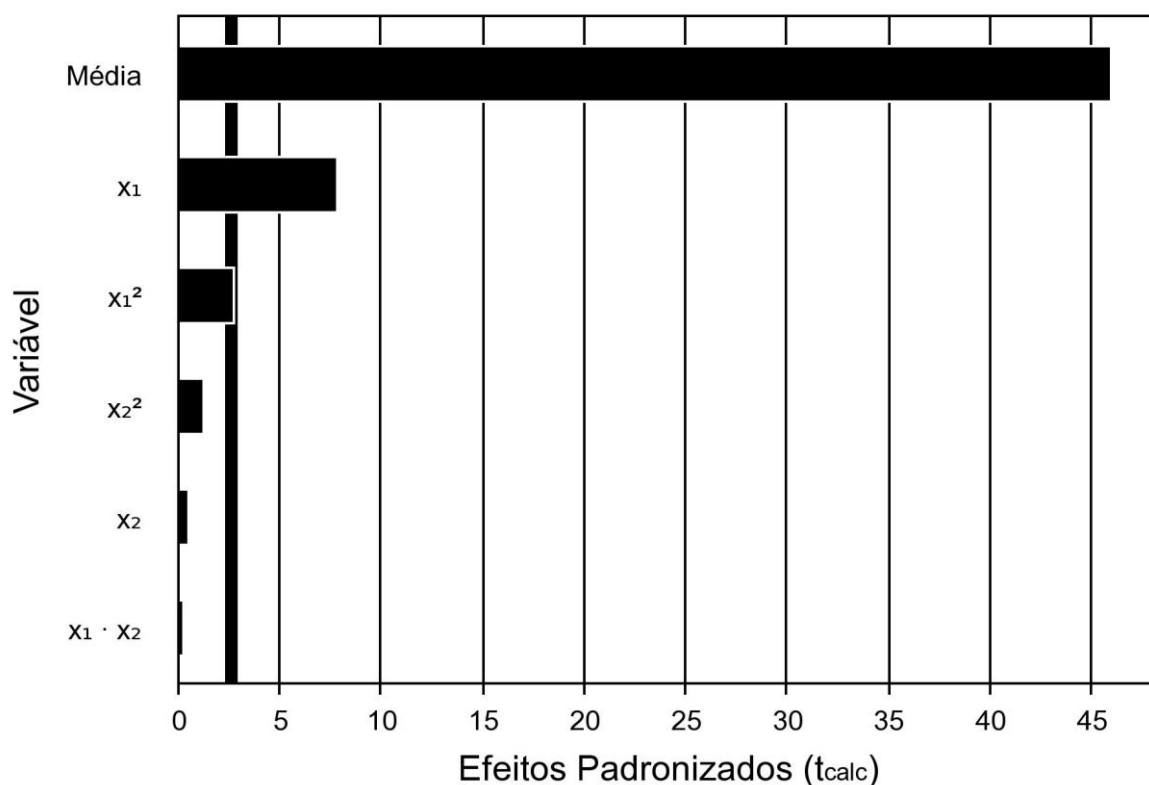
Conforme Andreoli (2008), para cada tonelada de cana-de-açúcar processada são geradas, aproximadamente, 250kg de bagaço de cana. Admitindo-se uma estimativa de produção de 2.219,9 mil toneladas de cana-de-açúcar processada no Tocantins na safra de 2019 (CONAB, 2019), e observando o rendimento médio aproximado da produção de carvão ativado (Tabela 6) de 43% a partir da pirólise em reator de leito fixo, podemos estimar uma produção de carvão ativado de até 238,6 mil toneladas a partir do bagaço de cana.

O diagrama de Pareto apresentado na Figura 15 foi gerado a partir dos dados obtidos no DCCR indicando que a temperatura (X1) possui um efeito negativo (-7,85) para o rendimento da biomassa para a produção de carvão, mostrando que com o aumento da temperatura ocorre a redução no rendimento de carvão, sendo

observado, por exemplo, quando a temperatura passa de 500°C para 640°C ocorre redução de aproximadamente 13% no rendimento do carvão.

Já a taxa de aquecimento (X_2), apesar de possuir efeito negativo (-0,54) sobre a amostra não representa efeito tão significativo na produção de carvão ativado.

Figura 15 - Diagrama de Pareto para a obtenção de carvão a partir da biomassa de cana



Fonte: O autor (2020).

Segundo Pedroza (2011, apud RODRIGUES, 2019), a redução do rendimento de carvão pelo aumento da temperatura ocorre em razão da liberação de materiais voláteis durante o aquecimento do combustível sólido, conhecido como desvolatilização.

Os efeitos das variáveis analisadas com a obtenção do carvão de biomassa de cana-de-açúcar estão demonstrados na Tabela 7:

Tabela 7 - Coeficientes de regressão do Planejamento DCCR obtidos da produção de carvão da biomassa de cana em sistema de pirólise com intervalo de confiança de 95%.

Fatores	Coeficiente de regressão	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	40,61	0,88	45,93	0,0000
Temperatura (X_1)	-4,25	0,54	-7,85	0,0005
Temperatura ² (X_1^2)	1,73	0,64	2,69	0,0435
Taxa (X_2)	-0,29	0,54	-0,54	0,6136

Taxa ² (X ₂ ²)	0,78	0,64	1,21	0,2799
Temp-Taxa (X ₁ -X ₂)	-0,20	0,77	-0,26	0,8044

Fonte: O autor (2020).

Com os coeficientes de regressão, obtidos por meio da matriz codificada, foi permitido traçar o modelo ajustado que descreve a obtenção de carvão durante a pirólise do bagaço de cana-de-açúcar empiricamente. Os efeitos da média (40,61) e temperatura (-4,25) foram significativos a um nível de confiança de 95%, conforme demonstrado na Tabela 6. Os demais efeitos não foram considerados significativos mesmo assim se faz necessário mantê-los na equação do modelo para preservação da hierarquia matemática (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2007 apud RODRIGUES, 2019).

$$\text{Rendimento do Carvão (\%)} = 40,61 - 4,25x_1 + 1,73x_1^2 - 0,29x_2 + 0,78x_2^2 - 0,20x_1x_2$$

Onde: X₁ = Temperatura; X₂ = Taxa de Aquecimento.

A Tabela 8 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a produção de carvão na pirólise do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 8 - ANOVA para a produção de carvão em processo de pirólise de bagaço de cana em reator de leito fixo.

Fonte de Variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Regressão	162,8	5	32,6	13,9	0,00591
Resíduos	11,7	5	2,3		
Falta de Ajuste	11,5	3	3,8	32,3	0,03016
Erro Puro	0,2	2	0,1		
Total	174,6	10			

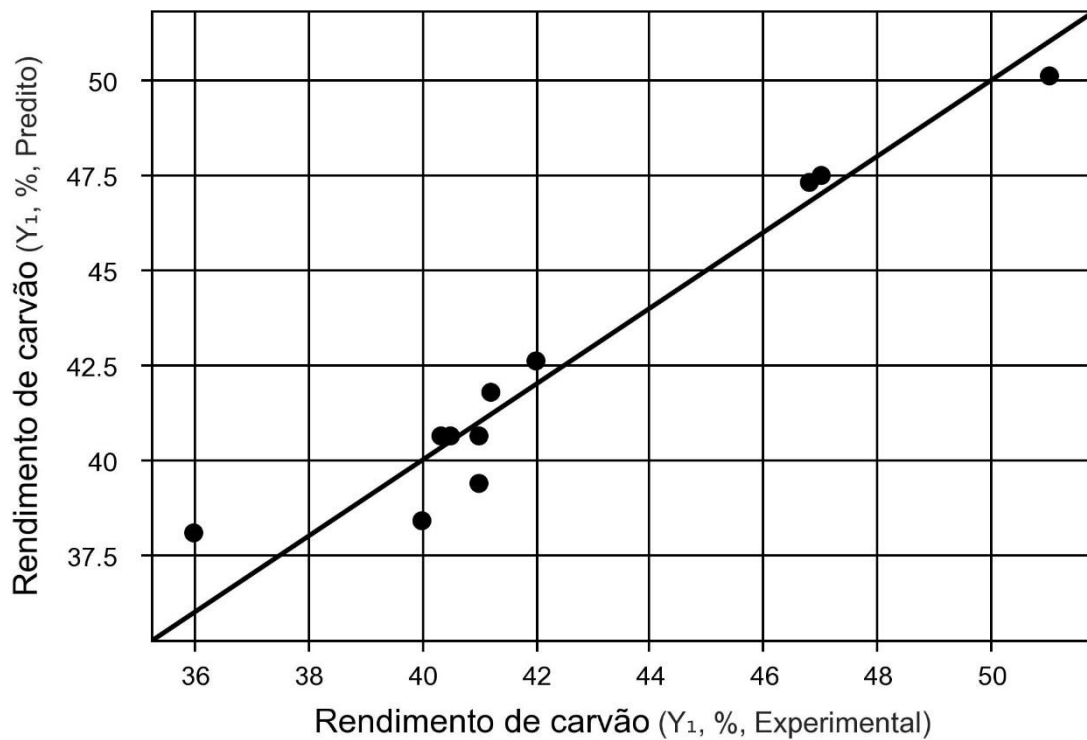
R² = 93,28, F_{tabelado} (5,5;0,05) = 5,05

Fonte: O autor (2020).

O valor de F_{calculado} foi determinado pela expressão, F_{calculado} = Quadrado médio/ Quadro médio erro. Comparando o valor de F_{calculado} (13,9) para regressão com o valor de F_{tabelado} (5,05), verifica-se uma regressão significativa.

O coeficiente R² atingido pela regressão foi de 0,9328, mostrando-se como modelo ideal, principalmente por se observar o acúmulo de dados próximos à reta como se observa na Figura 16, ou seja, conforme Rodrigues (2019) essa proximidade demonstra que a previsão a partir do planejamento experimental está de acordo com os valores observados após a pirólise, estando os dados representados pelo modelo ajustado.

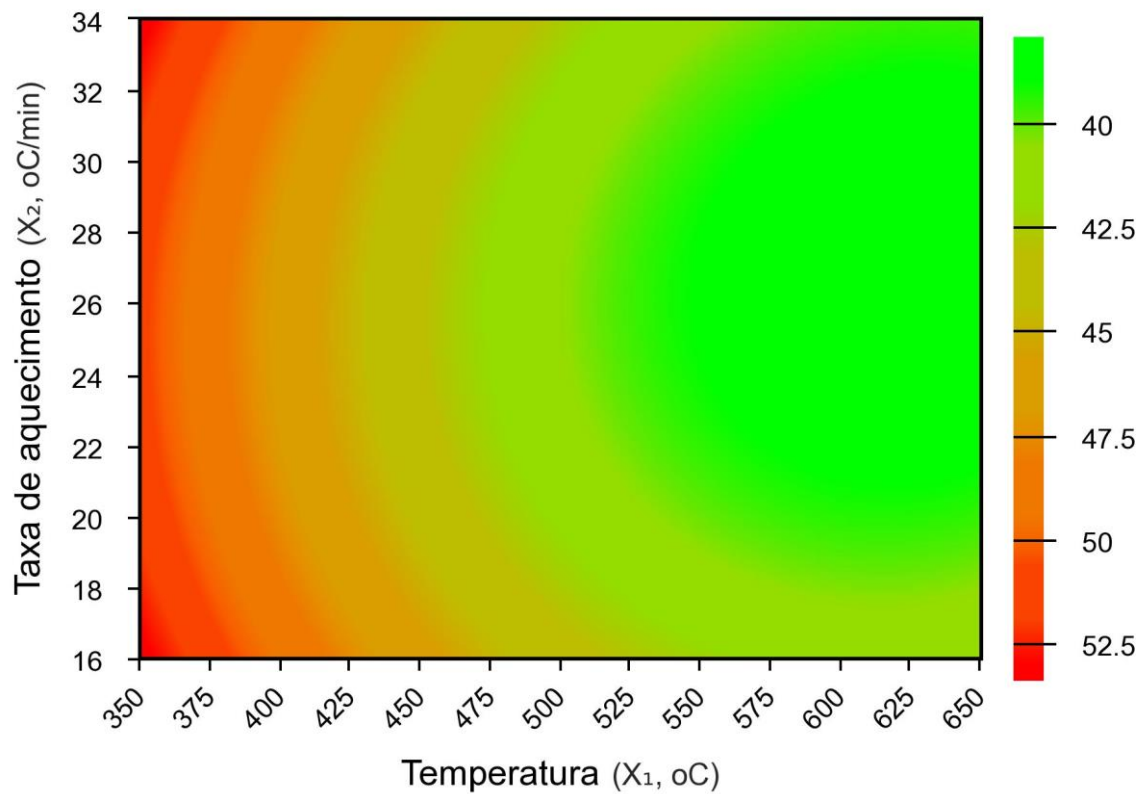
Figura 16 - Rendimento do Carvão (experimental) x Rendimento do Carvão (predito)



Fonte: O autor (2020).

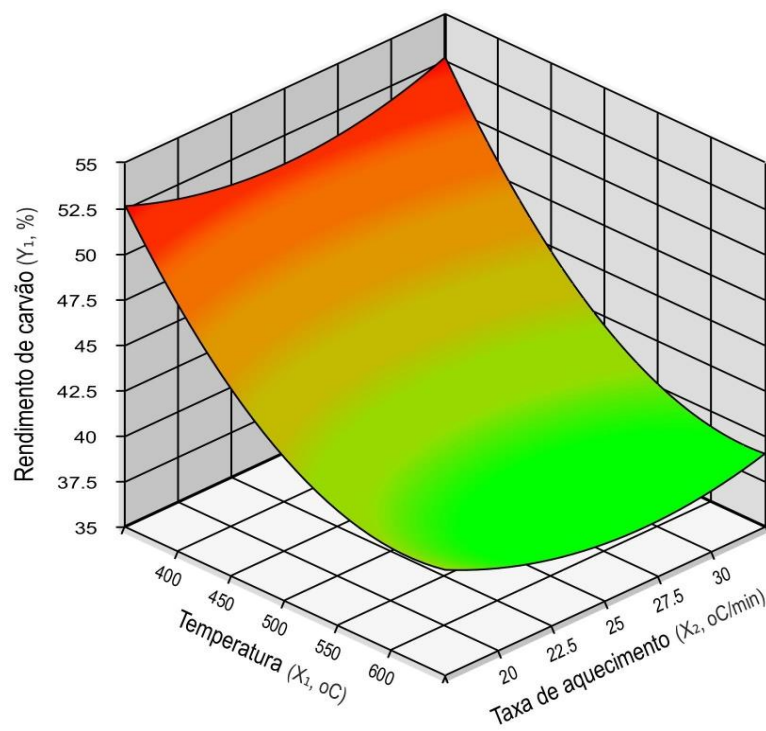
Conforme observado na superfície representada pelo modelo na Figura 17 observa-se que máxima quantidade de carvão pode ser conseguida em condições de baixa temperatura. As regiões em vermelho indicam as condições em que a produção de carvão seria maior. A partir da Figura 17 e Figura 18 observa-se que a produção de carvão está otimizada entre 350°C e 400°C com uma Taxa de Aquecimento entre 25°C e 27°C/min.

Figura 17 - Superfície para obtenção de carvão de bagaço de cana a partir das variáveis Temperatura e Taxa de aquecimento.



Fonte: O autor (2020).

Figura 18 - Superfície apresentada na Figura 17 em três dimensões



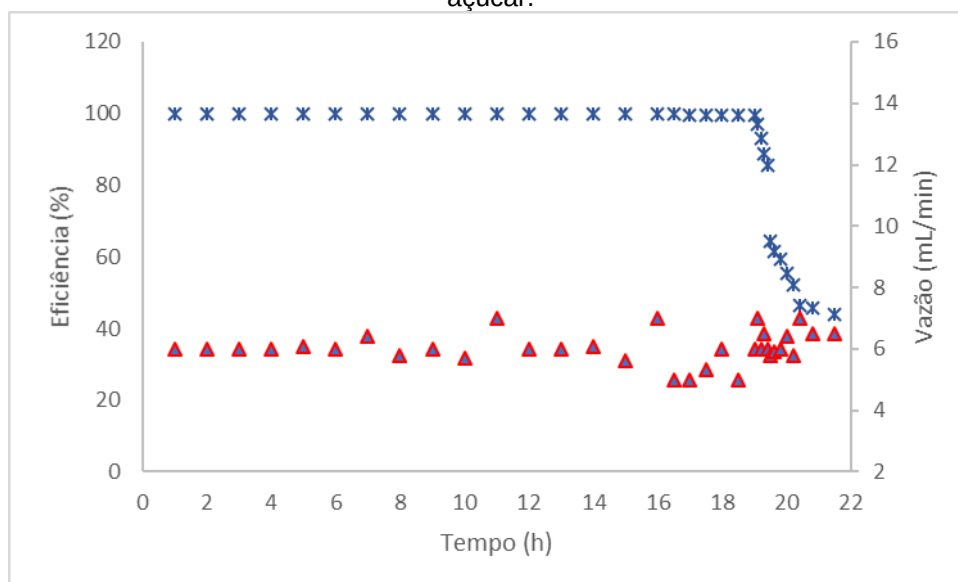
Fonte: O autor (2020).

7.3. Teste de adsorção de azul de metileno

O índice de Azul de Metileno se refere a capacidade que o carvão possui de para adsover partículas que tenham dimensões similares à do azul de metileno, referindo-se, a área superficial dos poros superiores a 1,5mm (VALCARENGHI e RIBEIRO, 2013, apud MACHADO, 2019), sendo importante devido a avaliação da eficiência que se faz do carvão produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

O experimento de adsorção foi realizado conforme descrito nos procedimentos metodológicos, Tópico 6.4 com concentração de 4mg/L, com 10 gramas de carvão disposto em tubulação de 20cm, sendo 12cm de areia e carvão com diâmetro de 2,0cm.

Figura 19 - Teste de azul de metileno empregando o carvão proveniente do bagaço de cana de açúcar.



Fonte: O autor (2020).

Conforme demonstrado na Figura 19, o sistema de adsorção do corante azul de metileno permaneceu em operação durante 22 horas, sendo medida a vazão média e a concentração do efluente filtrado a cada 1 hora nas primeiras 12 horas de experimento e nas 12 horas posteriores a medição foi efetuada a cada 30 minutos. A Figura 19 mostra a eficiência de remoção do corante azul de metileno em função do tempo de operação e da vazão do sistema.

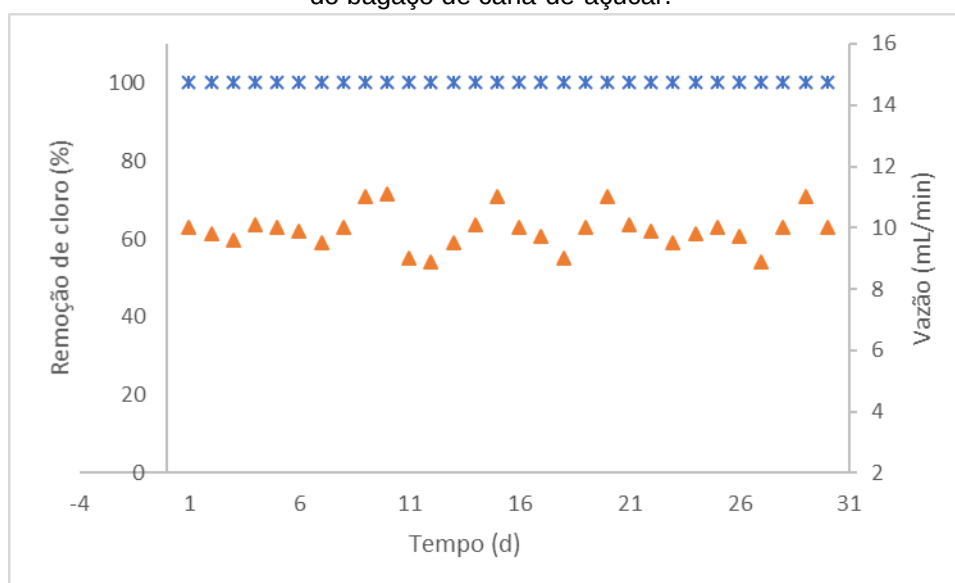
O filtro apresentou uma remoção máxima nos primeiros 4 litros da solução do corante em estudo, operando a uma vazão média de 6,2 mL/min. Observa-se também um decaimento da eficiência de remoção devido a saturação do carvão. A menor eficiência observada foi de 40% com o tempo de operação de 21h.

7.4. Remoção de cloro de água através da adsorção em carvão ativado

Como já destacado anteriormente, o cloro é utilizado para a desinfecção da água para deixá-la própria e potável para o consumo humano deixando-a dentro dos parâmetros definidos na Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011). A referida portaria define que o cloro residual no abastecimento deve estar entre 0,2 e 2mg/L em toda extensão da rede de distribuição, sendo esta a maneira mais econômica e eficiente para a desinfecção da água.

Porém, a depender do quantitativo de cloro utilizado, a água utilizada para fins industriais pode causar prejuízos ou alterar a composição dos produtos produzidos pelo meio industrial, devendo a água utilizada para esses fins estar praticamente com teores de cloro nos níveis mínimos para se evitar alteração de sabor e composição dos produtos.

Figura 20 - Remoção de cloro residual em água de abastecimento empregando o carvão proveniente do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: O autor (2020).

A eficiência de remoção do cloro residual foi de 100%, tratando um volume de 4320L de água de abastecimento bruta com cloro ajustado a 2mg/L em todo o período de monitoramento do sistema como demonstrado na Figura 20.

A partir desta análise foi demonstrada a capacidade do carvão ativado da biomassa de cana-de-açúcar de adsorver o cloro residual da água, tratando um volume considerável de água de abastecimento clorada no limite máximo permissível (2mg/L) estabelecido pelo Ministério da Saúde para água de abastecimento público, tornando-a isenta de aditivo clorado. Fica comprovando também a resistência e

validade do bagaço de cana-de-açúcar na adsorção, com a eficiência de 100% de remoção do cloro ativo em 30 dias de tempo de operação, sem a saturação do mesmo.

8. CONCLUSÕES

O maior rendimento de carvão ativado a partir da pirólise do bagaço de cana em reator de leito fixo foi de 51% em temperatura de 360°C e taxa de aquecimento de 45°C/min.

A temperatura teve efeito negativo para a parte sólida, desta forma, observa-se que com o aumento da temperatura ocorre a diminuição do rendimento de carvão. O efeito negativo da taxa de aquecimento na produção de carvão também foi observado, porém não tão significativo quanto a temperatura, no entanto, o recomendado é a manutenção da taxa de aquecimento nos padrões verificados para se evitar que o rendimento seja alterado.

O carvão ativado obtido da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar foi muito eficiente no processo de descloração da água de abastecimento. A eficiência na remoção de cloro em sistema de filtração com o carvão dessa pesquisa foi de 100% ao longo do período monitorado (30 dias ininterruptos de operação). Os resultados obtidos corroboram de forma positiva, indicando o potencial da utilização do carvão ativado do bagaço de cana-de-açúcar, para produção de filtros de carvão ativado em indústrias de bebidas e alimentos.

Cabe ainda destacar a possibilidade de uso do carvão ativado produzido para a remoção de cloro a fim de se evitar a produção de trihalometanos na água tratada, principalmente quando se reconhece seus efeitos toxicológicos para exposições a longo prazo, podendo assim, manter a água tratada com níveis reduzidos de cloro ao mínimo recomendado nas normas brasileiras.

Portanto, pode-se afirmar a viabilidade técnica do uso do carvão ativado, substituindo assim as matérias primas tradicionais empregadas na produção de material adsorvente.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, Claudinei. **Convergência de agricultura e energia: produção de biomassa celulósica para biocombustíveis e eletricidade**. Revista Economia e Energia, v. 11, n. 66, p. 3-13, 2008. Disponível em: <
https://ecen.com/eee66/eee66p/convergencia_de_agricultura_e_energia.htm>
Acesso em: 05 ago.2020.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2018/2019 a 2028/2029**, projeções de longo prazo. Brasília: MAPA/ACE, 2019.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022**. Brasília: MME/EPE, 2013.

CONAB, **Acompanhamento Da Safra Brasileira De Cana-De-Açúcar**, v. 6 - Safra 2019/20, n. 3 – Terceiro Levantamento, dezembro de 2019.

DE MORAES, Sandra Lúcia et al. **Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada**. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v. 1, n. 4, 2017.

FELIX, Camila Ribeiro de Oliveira et al. **Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador Al-MCM-41**. Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, e11915, 2017. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000500409&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 22 nov. 2019.

FUSATI Filtros, s/d, Disponível em: <<https://www.fusati.com.br/filtro-declorador-industrial/>> Acesso em 21 nov. 2019.

GALLETTI, Jean Paulo et al. **Qualidade de água de abastecimento na indústria de produtos de origem animal: revisão bibliográfica**. Enciclopédia biosfera, Goiânia, v. 6, n. 10, p. 1-10, 2010. Disponível em: <
<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2010b/qualidade.pdf>> Acesso em 08 nov. 2019.

GORZA, Nadja Lima. **Remoção de agrotóxicos em uma instalação piloto de tratamento de águas para abastecimento, do tipo convencional, associada à pré-oxidação e adsorção em carvão ativado granular**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

GUIMARÃES, Luiz Sérgio Pires. **Dinâmica Espacial da Cana-de-Açúcar no Brasil Contemporâneo**. Brasília, MMA, 2008.

JUNIOR, Décio Antônio Andres. **Tratamento de águas residuais de indústrias de bebidas utilizando tratamento convencional e processos de separação com membranas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, RS.

KAWA, Luciane. **Resíduos da produção de cana-de-açúcar**. 2015. Disponível em: <<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/sucroenergetico/156845-residuos-da-producao-de-cana-de-acucar.html#.Xyic76-SnIU>> Acesso em 03 ago. 2020.

KOHLHEPP, Gerd. **Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil**. Estud. av., São Paulo, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142010000100017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 06 nov. 2019.

LIMA, Glicicleide; WANDERLEY, Albaneide Fernandes. **O uso do carvão ativado para tratamento de águas cinza**. I Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido. 2016. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/revistas/conidis/trabalhos/TRABALHO_EV064_MD1_SA5_ID2377_21102016203612.pdf> Acesso em 07 nov. 2019.

LENÇO, Paulo César. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

MACÊDO, Lúcia Paula Martins Prado de. **Viabilidade da produção de carvão ativado a partir de resíduos alternativos**. 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2012.

MACHADO, Paulo Ricardo Silva. **Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando aplicação industrial**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO.

MARIN MESA, Liena del Rosario. **Estudo da pirólise de cana-de-açúcar integral**. 2011. 86 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264114>>. Acesso em: 23 abr. 2020.

MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias de. Introdução - **As profundas mudanças institucionais ao longo da história da agroindústria canavieira e os desafios atuais**. Econ. Apl., Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, p. 555-557, Dec. 2007. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-80502007000400005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 18 abr. 2020

NEVES, M.; CONEJERO, M. **Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica**. Economia Aplicada, v. 11, n. 4, p. 587-604, 1 dez. 2007. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/ecoa/article/view/967>> Acesso em 18 abr. 20.

NIÑO, Amanda Denisse León. **Caracterização da biomassa residual da cana-de-açúcar visando seu aproveitamento energético**; 2014; Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do ABC, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

PAZ, José Eduardo De Matos; GARNICA, Alfredo Ismael Curbelo; CURBELO, Fabíola Dias da Silva. **Estudo da adsorção de chumbo utilizando como adsorvente bagaço de cana de açúcar ativado**. HOLOS, v. 8, p. 3-18, 2018. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7544>>. Acesso em: 04 maio 2020.

RAMOS, P. Os mercados mundiais de açúcar e a evolução da agroindústria canavieira do Brasil entre 1930 e 1980: do açúcar ao álcool para o mercado interno. **Economia Aplicada**, v. 11, n. 4, p. 559-585, 1 dez. 2007. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/ecoa/article/view/966>> Acesso em 18 abr. 20.

REVISTA MEIO FILTRANTE, **Tratamento de água em indústrias de bebidas**. Edição Nº 40 - Setembro/Outubro de 2009 - Ano VIII. (*on line*).

RODRIGUES, Camila Ribeiro. **Degradação Térmica da Casca de Arroz e Utilização do Carvão Obtido no Processo para Polimento de Águas Cinzas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO

SANTOS, Elba Gomes dos; ALSINA, Odelsia Leonor Sanchez de; SILVA, Flávio Luiz Honorato da. **Desempenho de biomassas na adsorção de hidrocarbonetos leves em efluentes aquosos**. Quím. Nova, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 327-331, Apr. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000200017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 05 nov. 2019.

SCHMIDT, Cristine Grings. **Desenvolvimento de filtros de carvão ativado para remoção do cloro da água potável**. 2011. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/28835>> Acesso em: 08 nov. 2019.

SILVA, Vera Lúcia Meira; ALSINA, Odelsia Leonor Sánchez; GOMES, Wólíia Costa. **4. utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos**. Revista eletrônica de Materiais e processos, v. 2, n. 1, 2007.

SOARES, Samara Silva et al. Avaliação de métodos para determinação de cloro residual livre em águas de abastecimento público. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 37, n. 1, p. 119-130, 2016.

TOMINAGA, Maria Y; MIDIO, Antonio F. Exposição humana a trihalometanos presentes em água tratada. **Rev. Saúde Pública**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 413-421, Ago.1999. Disponível em :<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-89101999000400013&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 6 ago. 20.

VIEIRA, G. E. G.; ROMEIRO, G. A.; SELLA, S. M.; DAMASCENO, R. N.; PEREIRA, R. G. **Low temperature conversion (LTC)** – An alternative method to treat sludge

generated in an industrial wastewater treatment station – Batch and continuous process comparison. *Bioresource Technology*, v. 100, p. 1544 – 1547, 2009.

VIEIRA, Ana Carla. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel, PR.

WANCZINSKI, Bruna Juliana et al. **Revalidação de sistema para tratamento de água purificada na indústria farmacêutica**. *Rev. Bras. Farm*, v. 92, n. 3, p. 213-218, 2011. Disponível em: < <http://www.rbfarma.org.br/files/rbf-2011-92-3-22.pdf> > Acesso em: 08 nov. 2019.

WERLANG, Eliana Betina et al. **Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais**. *Revista Jovens Pesquisadores*, v. 3, n. 1, 2013. Disponível em: <<https://online.unisc.br/seer/index.php/jovenspesquisadores/article/view/3600>>. Acesso em: 14 maio 2020.