



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

YAN SOUSA FERNANDES

**USO DE PIRÓLISE COMO ALTERNATIVA DE REUTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR PARA A APLICAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO NO
TRATAMENTO DE EFLUENTE DO IFTO-CAMPUS PALMAS.**

PALMAS

2018

YAN SOUSA FERNANDES

**USO DE PIRÓLISE COMO ALTERNATIVA DE REUTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR PARA A APLICAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO NO
TRATAMENTO DE EFLUENTE DO IFTO-CAMPUS PALMAS.**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

PALMAS

2018

Fernandes, Yan Sousa

Uso de pirólise como alternativa de reutilização do bagaço de cana-de-açúcar para a aplicação do carvão ativado no tratamento de efluente do IFTO – *Campus Palmas* /

Yan Sousa Fernandes. – Palmas, 2018.

60 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação do Tocantins, *Campus Palmas*, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Pirólise 2. Cana-de-açúcar 3. Tratamento de efluentes

I. Uso de pirólise como alternativa de reutilização do bagaço de cana-de-açúcar para a aplicação do carvão ativado no tratamento de efluente do IFTO - Campus Palmas.

FOLHA DE APROVAÇÃO

YAN SOUSA FERNANDES

USO DE PIRÓLISE COMO ALTERNATIVA DE REUTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A APLICAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DO IFTO-CAMPUS PALMAS

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: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Dr. Marcelo Mendes Pedroza
IFTO – *Campus Palmas*

Me. Adriana Soraya Alexandria Monteiro
IFTO – *Campus Palmas*

Me. Sylvia Salla Setubal
IFTO – *Campus Palmas*

DEDICATÓRIA

A Deus

Aos meus pais, Sebastião e Raimunda

A minha irmã, Yanne

Aos meus mestres

Aos amigos dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala, que me proporcionaram momentos incríveis e me incentivam a não desistir.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, aos meus queridos amigos e a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Esse projeto de pesquisa teve como objetivo produzir carvão ativado a partir da pirólise do bagaço da cana-de-açúcar encontrado nas feiras livres de Palmas – TO, para assim aplicá-lo no tratamento do efluente do IFTO – Campus Palmas. Após extração e moagem da cana, o bagaço muitas vezes é descartado de forma inadequada causando poluição ao meio ambiente. Nessa pesquisa as amostras da biomassa foram caracterizadas através de algumas variáveis analíticas como umidade, material volátil e cinzas. Após, iniciou-se o processo de pirólise com planejamento multivariável, baseado em dois fatores: temperatura e taxa de aquecimento. Com o produto final do processo (carvão), foi montado um sistema de filtros para testes de adsorção de corantes e para remoção de poluentes contidos no efluente em questão. Após coletadas as amostras de sobrenadante de fossa séptica, foi alimentado o sistema para monitoramento. Os resultados obtidos sugerem que o carvão obtido através da pirólise do bagaço da cana é uma alternativa promissora no tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Pirólise. Cana-de-açúcar. Testes de adsorção. Tratamento de efluentes.

ABSTRACT

This research project aimed to produce activated carbon from the pyrolysis of the sugarcane bagasse found in the Palmas - TO free trade fairs, in order to apply it in the treatment of the IFTO - Campus Palmas effluent. After extraction and milling of sugarcane, the bagasse is often disposed of inappropriately causing pollution to the environment. In this research the biomass samples were characterized by some analytical variables such as humidity, volatile material and ash. After that, the pyrolysis process was started with multivariate planning, based on two factors: temperature and heating rate. With the final product of the process (coal), a system of filters was set up for dye adsorption tests and for the removal of pollutants contained in the effluent in question. After collection of the septic tank supernatant samples, the monitoring system was fed. The results obtained suggest that the coal obtained through the pyrolysis of sugarcane bagasse is a promising alternative in the treatment of effluents.

Keywords: Pyrolysis. Sugar cane. Adsorption tests. Wastewater treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes da cana-de-açúcar	17
Figura 2 - Principais produtores de cana-de-açúcar no mundo de acordo com as toneladas produzidas	18
Figura 3 - Produção de cana-de-açúcar no Brasil, por região (t)	18
Figura 4 – Etapas do reator pirolítico	24
Figura 5 – Superfície do carvão ativado	26
Figura 6 – Representação esquemática da rede de poros de um carbono adsorvente.....	27
Figura 7 – Esquema da metodologia aplicada.....	32
Figura 8 – Densidade aparente.	33
Figura 9 – Representação do planejamento experimental utilizado na pirólise de bagaço de cana-de-açúcar (Delineamento composto central rotacional 2 ²).	38
Figura 10 – Esquema representativo dos filtros	42
Figura 11 – Determinação do valor de densidade da biomassa em estudo.	45
Figura 12 – Determinação de perda de massa do bagaço da biomassa em estudo cinético realizado a 50° C.....	46
Figura 13 – Representação do Diagrama de Pareto obtido do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) obtidos para a produção de carvão durante a pirólise.....	49
Figura 14 – Valores observados versus valores previstos, para a obtenção de carvão a partir da pirólise de bagaço da cana.....	52
Figura 15 – Superfície de resposta para obtenção de carvão, com os fatores de temperatura e taxa de aquecimento.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do bagaço da cana-de-açúcar	20
Tabela 2 – Condições experimentais empregados nos testes de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.	37
Tabela 3 – Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a pirólise de bagaço de cana.	38
Tabela 4 – Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2 ²	39
Tabela 5 – Métodos analíticos aplicados na caracterização físico-química da água do efluente do IFTO – Campus Palmas.	43
Tabela 6 – Resultados obtidos durante a caracterização do bagaço da cana-de-açúcar.	43
Tabela 7 – Resultado da análise da densidade aparente do bagaço da cana.....	45
Tabela 8 – Dados de rendimento de carvão obtido durante os ensaios de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.....	47
Tabela 9 - Análise estatística através do Teste-t simulando variâncias equivalentes para a produção de carvão em ensaios de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar...47	
Tabela 10 – Resultados do Planejamento 2 ² Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) obtidos para a produção de carvão durante a pirólise de bagaço da cana-de-açúcar.	48
Tabela 11 – Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2 ² obtidos da produção de carvão de pirólise, em intervalo de 95% de confiança.....	50
Tabela 12 – ANOVA para a produção de carvão em processo de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.	51
Tabela 13 – Resultados experimentais obtidos durante o monitoramento do sistema de filtração de águas de sobrenadante de fossa séptica.	55

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Cana-de-açúcar	17
Fotografia 2 – Concreto ecológico	23
Fotografia 3 – Bagaço de cana-de-açúcar em feiras livres de Palmas, TO.	31
Fotografia 4 – Cinética da biomassa <i>in natura</i>	35
Fotografia 5 – Briquetes obtidos do bagaço de cana-de-açúcar.....	36
Fotografia 6 – Reator de leito fixo empregado nos experimentos de pirólise de biomassa.....	37
Fotografia 7 – Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.....	39
Fotografia 8 – Sistema de filtração de corante.....	40
Fotografia 9 – Análise espectrofotométrica do corante após sistema de filtração....	41
Fotografia 10 – Sistema de filtros em série em fluxo descendente.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Problema da pesquisa.....	15
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo Geral.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Produção da cana-de-açúcar.....	16
2.2 A produção da cana-de-açúcar no Tocantins	18
2.3 O bagaço da cana-de-açúcar	20
2.4 Aproveitamentos alternativos do bagaço da cana-de-açúcar	22
2.5 Tratamentos termoquímicos	23
2.6 Contextualização da pirólise	24
2.7 Produtos da pirólise	25
2.8 Carvão ativado.....	26
2.9 Características qualitativas do esgoto	27
2.9.1 Características físicas.....	28
2.9.2 Características químicas	29
2.9.3 Características biológicas.....	30
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
3.1 Preparação das amostras.....	31
3.2 Caracterização da Biomassa	32
3.2.1 Cálculo da Densidade Aparente	32
3.2.2 Teor de Cinzas.....	33
3.2.3 Teor de Umidade	34
3.2.4 Material Volátil	34
3.2.5 Teor de Carbono fixo	34
3.2.6 Cinética de secagem do bagaço da cana-de-açúcar <i>in natura</i>	35
3.2.7 Análise elementar-CNH	35
3.3 Elaboração de Briquetes da biomassa bagaço de cana-de-açúcar em pó	36

3.4 Pirólise da Biomassa	36
3.4.1 Pirólise de bagaço de cana-de-açúcar em reator de leito fixo – Testes Iniciais.....	37
3.4.2 Pirólise de bagaço de cana-de-açúcar – Planejamento Experimental DCCR	38
3.5 Testes de Adsorção de Corante em filtro de carvão	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 Caracterização da biomassa	43
4.1.1 Análises imediata e elementar da biomassa em estudo	43
4.1.2 Cinética de perda de massa da biomassa em estudo	45
4.2 Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de bagaço de cana-de-açúcar (testes iniciais).....	46
4.3 Planejamento experimental 2^2 – Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).....	48
4.4 Teste de adsorção de corante em filtro de carvão	53
4.5 Polimento do efluente em filtro de areia e carvão	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	57

1. INTRODUÇÃO

Diariamente, várias toneladas de efluentes sem tratamento adequado, são despejados nas águas em todo o mundo. Além disso, outra questão preocupante no planejamento urbano é que não há condutas suficientes que trabalham a destinação final de resíduos sólidos urbanos proporcionalmente à demanda de produção desses resíduos, causando a degradação e contribuindo com a contaminação dos recursos naturais (ABRELPE, 2015). Com isso, considerando uma maior conscientização social de proteção ao meio ambiente, a busca por soluções imediatas se faz necessário.

A cana-de-açúcar é uma matéria-prima que tem grande importância pela múltipla utilidade que possui. A princípio, os portugueses fizeram do Brasil um grande exportador de açúcar produzido a partir dos canaviais. Atualmente a cana-de-açúcar pode ser empregada como forragem, para alimentação animal, fabricação de rapadura, álcool (etanol) dentre uma variedade de usos. Seus resíduos também têm grande importância econômica, e inclusive pode ser utilizado como matéria-prima na produção de carvão ativado (PEDRESCHI, 2009).

O bagaço da cana-de-açúcar proveniente da produção de diversos derivados tornou-se disponível cada vez em maior quantidade. Geralmente esse produto é queimado para produzir energia e gerar, em reservatórios de vapor, outra forma de energia para o uso industrial. Entretanto, não sendo consumido na totalidade dentro a indústria (PEDRESCHI, 2009).

Para solucionar a questão do descarte incorreto do referido resíduo, foi proposto a aplicação da degradação térmica do material em atmosfera inerte de oxigênio para a geração de produtos de valor agregado, carvão ativado, bio-óleo e gases, diminuindo assim os impactos negativos à natureza. Nessa pesquisa foi investigado a produção de carvão, obtido a partir de pirólise de fibra de cana-de-açúcar em reator de leito fixo, destacando a importância dessa investigação quanto aos aspectos de ordem ambiental, com a disposição adequada do resíduo como também a aplicação do mesmo no tratamento de efluente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Campus Palmas.

1.1 Problema da pesquisa

Qual a importância de se tratar os efluentes para o meio ambiente? Como o carvão ativado pode ser utilizado no âmbito de Saneamento Básico?

1.2 Justificativa

Todos os dias, várias toneladas de efluentes sem tratamento adequado são despejados em mananciais, causando a contaminação dos recursos hídricos, prejudicando a fauna e flora e também contribuindo significativamente para um cenário de poluição do solo, da água, do ar e de riscos à saúde pública.

Nesse contexto, diversos estudos são realizados para aperfeiçoar a gestão dos resíduos sólidos, visando o aproveitamento desses em tratamento de efluentes. A pirólise de resíduos sólidos urbanos tem sido estudada extensivamente, a fim de avaliar as influências de parâmetros de funcionamento (ou seja, temperatura, tempo de residência das fases, diâmetro da partícula do resíduo e influência de catalisadores).

Entre os vários tipos de tratamento de efluentes, o processo de adsorção utilizando carvão ativado (CA) apresenta vantagens econômicas além de vasta eficiência. Tais materiais possuem elevada área superficial específica e um grande volume de poros, conferindo ao CA nobre potencial em adsorver moléculas. Além disso, podem ser utilizados em caldeiras e fornos tubulares, fornos comerciais como pizzaria, padaria e uso doméstico, a exemplo das lareiras e churrasqueiras (PEDROZA *et al.*, 2014).

Assim, a pesquisa da aplicação do processo de pirólise do bagaço de cana-de-açúcar para produção de carvão, mostra-se como uma importante alternativa de aproveitamento e agregação de valor ao resíduo ao transformá-lo em matéria-prima de processos através da rota termoquímica. A partir disso, espera-se reduzir o impacto ambiental da disposição final dessa matéria-prima, além de principalmente reduzir os poluentes orgânicos e inorgânicos compostos nos efluentes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Verificar o potencial do processo de pirólise no tratamento do bagaço-da-cana de açúcar e aplicação do carvão ativado, produto final do processo, na redução de poluentes orgânicos e inorgânicos do efluente do IFTO – Campus Palmas, agregando valor ao resíduo e reduzindo o impacto ambiental da disposição final dessa matéria-prima.

1.3.2 Objetivos Específicos

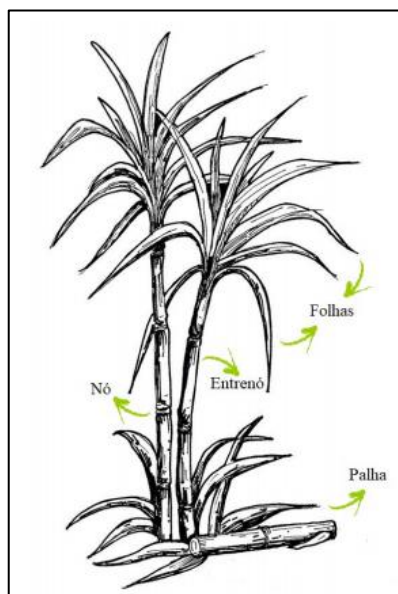
- a) Revisar bibliografia sobre o tema, abrangendo livros, revistas, periódicos, dissertações, teses, artigos e publicações; dentro e fora do Brasil.
- b) Determinar as características químicas do RSU usado no experimento;
- c) Efetuar a pirólise do RSU com e sem a presença de catalisador;
- d) Verificar e estudar a eficiência na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos em filtro de carvão ativado produzido a partir do bagaço da cana-de-açúcar;

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Produção da cana-de-açúcar

Pertencente à família das angiospermas, Poaceae, a cana-de-açúcar (Fotografia 1) é perene, típica de países tropicais (OGATA, 2013), herbácea e possui colmo cilíndrico composto por nós (de onde saem as gemas) e entrenós, epiderme característica, raiz fasciculada e flores monóclinas. Suas folhas são alternas ou opostas e presas aos nós, têm nervuras paralelinérveas e largas bainhas e sua altura pode chegar a 140 centímetros de comprimento (SILVA, 2015). Na Figura 1, podem ser observadas as partes da planta.

Figura 1 – Partes da cana-de-açúcar



Fonte: MONTES (2017).

Fotografia 1 – Cana-de-açúcar

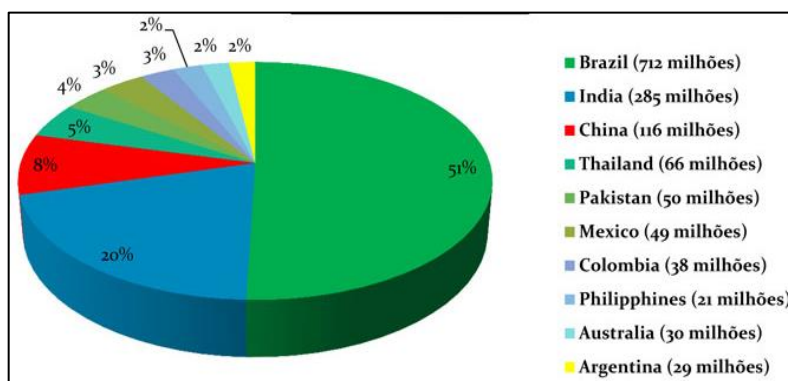


Fonte: Discovery Agro Brazil (2012).

O cultivo da cana-de-açúcar e a produção de seus derivados tem grande ligação com a história e o desenvolvimento do Brasil. Essa planta desembarcou pelas mãos dos portugueses, no início do século XVI. Ela prosperou principalmente no Nordeste deste país, sendo responsável por esta nação se converter na melhor criadora e exportadora de açúcar neste período, que se estendeu até o século XVII (KAUA, 2015).

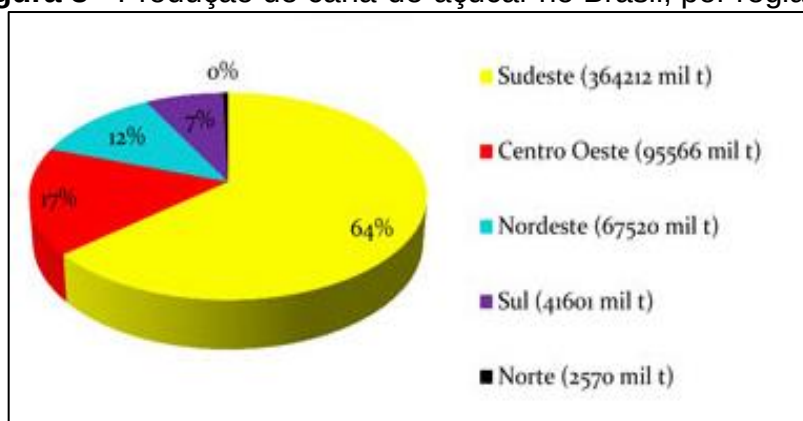
Esse cultivo comercial de cana-de-açúcar e de suas variedades ocorre em mais de 70 países e territórios. Brasil, Índia e China são os maiores produtores, conforme demonstra a figura 2. No Brasil, o cultivo está relacionado ao desenvolvimento econômico e o país é responsável por 61,8% das exportações mundiais de açúcar (MAPA, 2016).

Figura 2 - Principais produtores de cana-de-açúcar no mundo de acordo com as toneladas produzidas



Fonte: Discovery Agro Brazil (2012)

Figura 3 - Produção de cana-de-açúcar no Brasil, por região (t)



Fonte: Discovery Agro Brazil (2012).

2.2 A produção da cana-de-açúcar no Tocantins

Como pode ser observado, o cultivo dessa planta vem crescendo consideravelmente. Com isso, se faz necessário a ocupação de novas áreas para o cultivo, visto que as áreas onde essa cultura já é tradicionalmente produzida, tendem

ao esgotamento. Nas últimas décadas, tem-se procurado desenvolver e ocupar novas áreas, também denominadas de “novas fronteiras agrícolas”.

Nesse contexto a expansão do agronegócio foi direcionada para as regiões Centro-Oeste e Norte do país, e em 1960 foi intensificada por políticas públicas voltadas à ocupação de terras e ao desenvolvimento regional. Os dados da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (2014) confirmam a representação da Figura 3, onde a região Centro-Oeste, a partir da safra 2009/10, passou a ocupar a posição de segundo maior da região produtora de cana.

Assim, a área mais recente de ocupação é conhecida pela sigla MATOPIBA, que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Esses estados apresentam terras de valor econômico viável e ainda tem grande potencial para a cultura da cana mesmo apresentando oscilações de preços não perdendo sua atratividade. (FERRO; CASTRO, 2013; NASSAR et al., 2008).

Dentre os estados das “novas fronteiras agrícolas” se encontra o Tocantins, onde o cerrado ocupa a maior parte do território e vem sendo considerado uma riqueza para o agronegócio. Isso por que o estado apresenta a disponibilidade de terras a baixo custo e o potencial energético e hídrico, se comparado a outras regiões. Soma-se a isso características físicas adequadas à produção e ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, tais como solos, declividade e pluviosidade (ABREU, Y. V.; NASCIMENTO, H. R., 2015).

A Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) apresenta dados atualizados da safra 2017/18 no estado do Tocantins, onde a área cultivada foi de 30,6 mil hectares, e produtividade média de 71.467 kg/ha, números bastante significativos, visto que a região apresentou condições pluviométricas normais durante a fase de desenvolvimento das lavouras, com chuvas bem distribuídas ao longo da estação, porém sem deixar de ocorrer pequenos veranicos.

Como destaque dos produtores de Bioenergia temos a usina Bunge, localizada no município de Pedro Afonso. Ela foi inaugurada em julho de 2011 e atualmente produz etanol e bioenergia, a partir do processo de cogeração da cana-de-açúcar, com capacidade de processamento de 2,5 milhões de toneladas por ano. A Bunge também tem uma usina implantada em Porto Nacional, porém com produção voltada para a soja.

2.3 O bagaço da cana-de-açúcar

Um dos subprodutos da indústria da cana é o seu bagaço, um resíduo lignocelulósico. Compõe aproximadamente 28% do peso da cana-de-açúcar e é composto de 44,6% de carbono, 44,5% de oxigênio, 5,8% de hidrogênio, 0,6% de nitrogênio, 0,1% de enxofre e 4,4% de outros elementos. Em base úmida, possui mais de 20% de hexoses e 10% de pentoses (SANTOS, 2012). A tabela 1 mostra a composição química do bagaço da cana.

Tabela 1 – Composição química do bagaço da cana-de-açúcar

Composição Química	(%)
Glicose	19,50
Arabinose	10,50
Galactose	1,50
Lignina	0,55
Organossolúveis	9,91
Outros AR*	2,7
Cinzas	1,60
Umidade	50,00
Hexoses totais	20,04
Pentoses totais	12,00

*AR: açúcares redutores

Fonte: SANTOS (2012).

Ressalta-se ainda que os resíduos têm grande importância econômica, o vinhoto, que é transformado em adubo e o bagaço de cana, que é o resíduo da cana após a moagem. Com o processo da moagem, a fibra é separada do caldo, sendo o resíduo bagaço de cana constituído de 46% de fibras, 50% de água e 4% sólidos dissolvidos. Já composição química varia de acordo com os diversos fatores como: o tipo de cana, o tipo de solo e as técnicas de colheita (PEDRESCHI, 2009).

Kawa (2015) afirma que desde o ano 2000 a produção de cana-de-açúcar não parou de crescer, mesmo que a produção tenha sofrido altos e baixos na década de 1990. O setor sucroalcooleiro tem apresentado um grande potencial de geração de energia, apresentando atrativos econômicos e ambientais, principalmente devido à

queima de bagaço de cana-de-açúcar na produção como combustível. Segundo o Boletim da Agência de Informações da EMPRAPA, projeções de médio e longo prazo indicam que o consumo mundial de açúcar continuará aumentando, atingindo 176 milhões de toneladas.

De todos os resíduos da unidade industrial sucroalcooleira, o bagaço é um dos mais atrativos, apesar de não ser o de maior volume, por causa de seu poder calorífico, o que faz dele o principal combustível de todo o processo produtivo da fabricação do açúcar e do álcool. Atualmente, a destinação das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar é um dos problemas enfrentados pelos administradores das usinas.

Quanto aos resíduos provenientes do cultivo e industrialização da cana-de-açúcar, muitos estudos têm explorado formas de reaproveitá-los, de maneira a evitar o desperdício e contribuir para sustentabilidade do setor sucroenergético, bem como fornecer matéria-prima para outros setores. Assim, pode-se dizer que o setor sucroenergético tem contribuído para práticas mais amigáveis ao meio ambiente, especialmente devido ao investimento em novas tecnologias, como melhoramento genético e aproveitamento dos resíduos (SANTO; ALMEIDA, 2007). Assim, para que essa linha de produção seja efetivamente sustentável, há a necessidade em se priorizar os aspectos sociais e ambientais, de maneira que os danos associados à ascensão e expansão do setor sucroalcooleiro sejam mitigados e evitados.

O Brasil, maior produtor global de açúcar e segundo de etanol, gera cerca de 140 milhões de toneladas de bagaço de cana todo ano (TEIXEIRA, 2012), volume que pode alimentar unidades de geração acopladas às usinas, dentre outras alternativas de reuso e aglomerados. Entretanto, a energia produzida pela queima de bagaço de cana perdeu espaço para o setor de energia eólica quando, a primeira, ficou com apenas 4 por cento do total de energia comercializada no leilão do governo. Projetos alimentados com gás natural ficaram com 56 por cento, energia eólica com 27 por cento e hidrelétricas com 14 por cento (VEJA, 2012).

Pedreschi (2009) afirma ainda que o número crescente das atividades de destilarias autônomas e a melhoria do balanço energético das antigas usinas aumentou a porcentagem de sobras consideravelmente. Sem dúvida o resíduo agroindustrial obtido apresenta maior quantidade no Brasil, que para cada tonelada de cana-de-açúcar podem ser gerados 280 kg de bagaço (MONTES, 2017), provavelmente em decorrência das características climáticas.

A cana-de-açúcar possui inúmeras aplicações, dentre elas forragem, alimentação animal e matéria-prima para a produção de melaço, aguardente, açúcar e etanol. Há alguns anos, a atenção está voltada para o uso da cana para a produção de energia. Ao ser processada, a cana é separada em caldo e bagaço. O caldo é usado para a produção de açúcar e etanol, enquanto o bagaço pode ser utilizado tanto para geração de calor e eletricidade para autossuficiência da usina ou para comercialização quanto para a produção de etanol de segunda geração (OGATA, 2013).

2.4 Aproveitamentos alternativos do bagaço da cana-de-açúcar

Parte do bagaço produzido é utilizada em caldeiras, para aquecimento de caldeiras e na geração de energia elétrica, porém, com a grande quantidade produzida, além das características físicas e químicas, esse material encontra um vasto campo de utilização: na produção de ração animal, na indústria química com a produção de plástico biodegradável, fabricação de papel, papelão e aglomerados como material alternativo na construção civil (PEDRESCHI, 2009). Estudos são realizados, utilizando-se o bagaço da cana como biomassa adsorvente de contaminantes orgânicos com resultados satisfatórios (Silva et al, 2007; Anselmi, 2007). Dentre outros aproveitamentos, lista-se alguns comumente usados:

- Forragem: utilizados para nutrição animal, para os ruminantes;
- Fibrocimento e concreto: A cinza proveniente da queima do bagaço da cana tem comportamento de cimento pozolânico, formando um composto aglomerante;
- Substituição da areia por resíduos: Por conta desses resultados promissores acerca da substituição de cinzas pelo agregado miúdo, alguns artigos propõem discutir a troca parcial de areia por CBC na confecção de concretos;
- Cogeração de energia: uma tonelada de cana gera cerca de 280 kg de bagaço, dos quais 90% são usados na produção de energia;
- Papel: o bagaço de cana possui grande quantidade de fibras de alta qualidade, pureza elevada e biodegradabilidade, o que está tornando o papel 100% reciclável;

- Madeira: as propriedades físico-mecânicas das fibras de celulose permitem fabricar painéis aglomerados.
- Etanol de 2ª geração: produzido a partir da biomassa vegetal (celulose), através da quebra dessa por micro-organismos.
- Cosméticos: na indústria farmacêutica e de cosméticos são utilizados para produção de géis hidrofílicos.
- Bioplásticos: As bactérias se alimentam do bagaço da cana e formam dentro de si um polímero, o polihidroxibutirato que pode ser usado na fabricação de vasos, colheres e sacolas plásticas.
- Concreto ecológico: estudos tendem para uso do bagaço como aglomerantes e agregados sendo conscientemente econômicos como os concretos, blocos, tijolos mostrados na Fotografia 2.

Fotografia 2 – Concreto ecológico



Fonte: Blog Química, MA e Edificações

2.5 Tratamentos termoquímicos

Os resíduos sólidos podem ser tratados em altas temperaturas, antes do encaminhamento à disposição final, sejam lixões, aterros ou afins. E isso, promove valorização econômica de teor energético, e acaba reduzindo impactos ambientais (FULANO, 2000).

Segundo Belgiorno et al. (2002), existem três tipos de tratamentos termoquímicos:

- Combustão: (700 °C a 1400 °C), queima através de oxigênio com produto final CO_2 e H_2O em vapor de água;

- Gaseificação: (500 °C a 1300 °C), através de um agente químico, com produto final gás de síntese, syngas;
- Pirólise: total ausência de oxigênio com produtos finais carvão, óleo pirolítico (ou bio-óleo) e gás.

2.6 Contextualização da pirólise

Blatzsó (1997) explica que a pirólise é um processo de decomposição térmica que ocorre em uma atmosfera ausente de oxigênio ou que contém uma concentração deficiente de oxigênio abaixo do nível estequiométrico de combustão. É utilizada para transformação de polímeros, ou materiais contendo polímeros em produtos líquidos, gasosos ou sólidos, quando submetidos à condições de altas temperaturas.

Esse processo tem sido estudado há algumas décadas devido a valoração energética promovida à matéria-prima. BASU, 2010 confirma a ideia da total ausência de oxigênio, e vem definir a pirólise como o aquecimento de um dado resíduo a determinada taxa de aquecimento até atingir uma temperatura máxima denominada temperatura de pirólise. E assim, deve-se mantê-la por um tempo específico gerando por fim componentes líquidos, gasosos, vapor d'água e carbono. O mesmo ainda define a equação da pirólise abaixo:

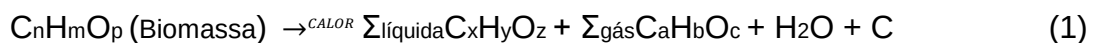
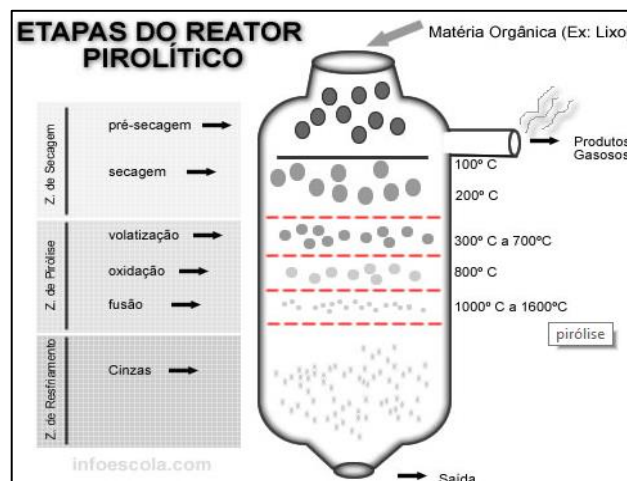


Figura 4 – Etapas do reator pirolítico



Fonte: InfoEscola Adriano Leal (2010).

2.7 Produtos da pirólise

Segundo Vieira (2004), o principal objetivo no processo de pirólise é a obtenção de produtos com densidade energética mais alta e melhores propriedades do que àquelas da biomassa inicial. Além disso, esses produtos são gerados em proporções diferentes, à depender da temperatura final do processo, pressão de operação do reator, tempo de residência das fases sólidas, líquidas e gasosas dentro do reator, o tempo de aquecimento e a taxa de aquecimento das partículas de biomassa, o ambiente gasoso e as propriedades iniciais da biomassa.

Os produtos da pirólise são sólidos, líquidos e gasosos. A fração sólida é propriamente o carvão, estrutura de carbono porosa (aprox. 85% de carbono), e pode ser utilizado para produção de carvão ativado, que é bastante eficaz na adsorção de compostos orgânicos e inorgânicos. Esse carvão ativado é amplamente utilizado na extração de metal, purificação de água, na medicina (absorção do veneno), limpeza de gases e na indústria de alimentos, com remoção de impurezas orgânicas (MENEDEZ et al., 2004).

A fração líquida denominada bio-óleo, ou óleo de pirólise, é uma mistura entre água, oxigênio e diversos compostos hidrocarbonados de estruturas complexas, entre eles os hidroxialdeídos, hidroxicetonas, açúcares, ácidos carboxílicos e compostos fenólicos. Podem ser aprimorados em combustíveis e diversos produtos químicos (SÁNCHEZ et al., 2009). Vieira (2004), complementa ainda que o óleo pode ser transportado e armazenado para geração de calor em caldeiras como óleo combustível. É usado na substituição de fenol petroquímico ou pode ser fracionado para produzir derivados da química fina.

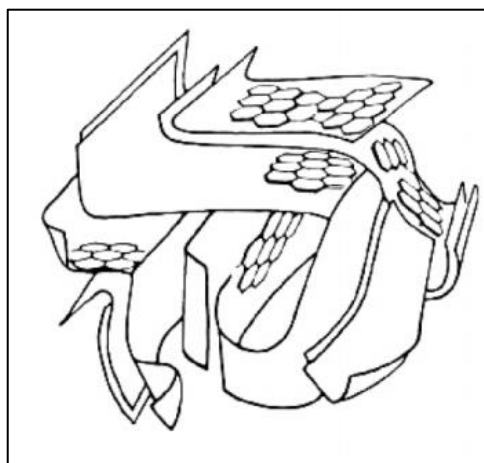
Já a fração gasosa é composta por dois tipos de gases, os gases condensáveis que ao serem resfriados se condensam formando compostos que fazem parte da fração líquida dos produtos da pirólise, e os gases não condensáveis, como CO_2 , H_2 , CH_4 e CO . Esses gases podem ser utilizados para produção de calor e geração de energia, mas em geral são usados para produzir energia no próprio processo de pirólise de biomassa ou para secagem das matérias-primas (SÁNCHEZ et al., 2009).

2.8 Carvão ativado

O carvão ativado é um termo que inclui uma vasta gama de materiais carbonosos amorfos que apresentam elevado grau de porosidade e uma extensa área superficial interparticular. A principal importância do carvão é sua capacidade de adsorção de superfície, e por isso tem sido utilizado em esquemas de purificação por séculos, principalmente em indústrias químicas (ROOP CHAND BANSAL, 1988).

A estrutura do carvão ativado, sob visão microscópica tem aparência de fitas amassadas juntas, misturadas com lasca de madeira, conforme pode ser observado na Figura 5 a seguir:

Figura 5 – Superfície do carvão ativado

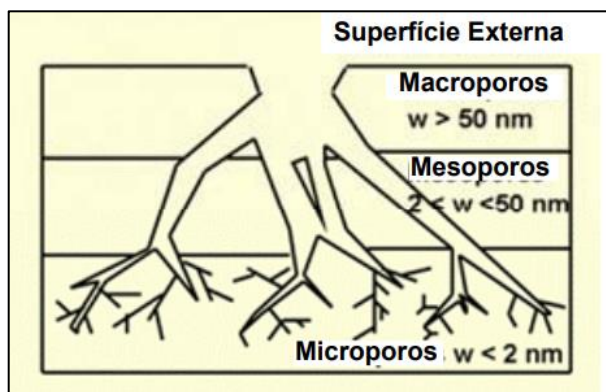


Fonte: Fritz Stoeckli Active Carbon (1988).

Muitas áreas de superfície de material correm paralelas umas às outras, separadas por poucos nanômetros. A estrutura de poros é quem garante ao carvão ativado a característica de adsorção, uma vez que material adsorvente pode interagir com muitas superfícies simultaneamente (ROOP CHAND BANSAL, 1988).

Os poros possuem dimensões que variam de menos de um nanômetro a vários milhares de nanômetros. A classificação dos poros em carvão se baseia na distância entre as paredes de um poro em forma de fenda ou o raio de um poro cilíndrico, mostrados na Figura 6. Esses divididos em grupo de microporos, mesoporos (ou poros de transição) e macroporos. O último não tem papel fundamental para a adsorção (BOKROS, 1969).

Figura 6 – Representação esquemática da rede de poros de um carbono adsorvente.



Fonte: Fritz Stoeckli Active Carbon (1988) – Adaptado.

Os microporos têm dimensões menores do que 2nm. A adsorção nesses poros ocorre através do preenchimento do volume, e não há condensação capilar ocorrendo. Sua área superficial específica constitui cerca de 95% da área superficial total do carvão ativado. Já os mesoporos tem dimensões efetivas de 2 a 50nm, e seu volume varia geralmente entre 0,1 e 0,2 cm³/g. Sua superfície não excede 5% da área superficial total do material (BOKROS, 1969).

As aplicações previstas para o carvão ativado são dependentes das características da matéria-prima, como densidade, concentração de material volátil, quantidade de inorgânicos e grafitização ou não grafitização do carbono. Qualquer material orgânico de baixo custo e com baixo teor de inorgânicos pode ser usado como matéria-prima desse material (JANKOWSAKA, 1989).

2.9 Características qualitativas do esgoto

O esgoto doméstico é definido na Norma Brasileira, NBR 9648/1986 - Estudos de Concepção de Sistemas de Esgoto Sanitário, como despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas. Segundo Jordão e Pessoa (1995), o esgoto é constituído essencialmente de despejos domésticos, uma parcela de águas pluviais, água de infiltração, e eventualmente uma parcela não significativa de despejos industriais, tendo características bem definidas.

Os efluentes domésticos são compostos em grande parte de água e junto a ela mistura-se materiais sólidos suspensos ou sólidos dissolvidos, matéria orgânica

e organismos patogênicos como bactérias, helmintos e protozoários, como também nutrientes como o nitrogênio e o fósforo (PADILHA, 2014). Chernicharo (1997) diz que a porcentagem de água no esgoto é de aproximadamente 99,9% e 0,1% dele é composto de sólidos.

A produção de esgoto pode sofrer alterações em diferentes estações do ano, dias da semana e horas do dia pois está relacionada ao consumo de água (MACKENZIE, 2010). As alterações dos esgotos sanitários, não só estão relacionados a taxa de fluxo, mas também em termos de composição e concentração, devido as atividades humanas, industriais e condições climáticas, especialmente em redes de esgotos combinados, onde o esgoto é misturado com escoamento de telhados, calçadas, etc (POTIER; PONS, 2006).

As características podem ser divididas em três categorias: parâmetros físicos, químicos e biológicos (SPERLING, 1996). De acordo com a FUNASA (2004), as principais características químicas dos esgotos são matéria orgânica, onde cerca de 70% dos sólidos no esgoto são de origem orgânica, geralmente esses compostos orgânicos são uma combinação de carbono, hidrogênio e oxigênio, e algumas vezes com nitrogênio; e matéria inorgânica que é formada principalmente pela presença de areia e de substâncias minerais dissolvidas.

Nesse trabalho foram abordadas as características usadas como parâmetro no estudo de remoção de compostos orgânicos e inorgânicos em testes de adsorção por carvão ativado, dispostos a seguir:

2.9.1 Características físicas

Tem-se como parâmetro físico a ser analisado, a turbidez que é causada por uma grande variedade de sólidos em suspensão (SPERLING, 1996) e a temperatura, que condiciona proporcionalmente a velocidade de decomposição do esgoto. Geralmente associado à cor, a turbidez indica de imediato o estado de decomposição do esgoto. Quando apresenta tonalidade acinzentada acompanhada de alguma turbidez, indica que o esgoto está fresco. Já a cor preta mostra que o esgoto está velho (FUNASA, 2004).

Associados aos efluentes industriais, os esgotos domésticos influenciam nas elevações na turbidez das águas. Quando ela está muito alta acaba reduzindo a

fotossíntese de vegetação enraizada submersa e algas. O manual da CETESB (2013) mostra que a turbidez pode vir a prejudicar as comunidades biológicas aquáticas por que as plantas acabam se desenvolvendo menos.

2.9.2 Características químicas

A características químicas que serão analisadas são: a DBO– Demanda Bioquímica de Oxigênio, que mede a quantidade de matéria orgânica oxidável por ação de bactéria (NETTO et al. (1997); os Nutrientes (nitrogênio e fósforo), os Sólidos Totais, pH e Alcalinidade.

A DBO é um dos parâmetros mais utilizados no que se refere ao tratamento de esgotos. É utilizada para indicar o grau de poluição de um esgoto, ou seja, um índice de concentração de matéria orgânica por uma unidade de volume de água residuária.

Segundo Nuvolari (2003), a DBO é a quantidade de oxigênio dissolvido, necessária aos micro-organismos, na estabilização da matéria orgânica em decomposição, sob condições aeróbias. Num efluente, quanto maior a quantidade de matéria orgânica biodegradável maior é este índice. No teste de medição, a amostra deve ficar incubada a 20° C, durante cinco dias.

Agudo (1998) ressalta que em saneamento, sólidos nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado. Os Sólidos Totais é o resíduo que resta na cápsula após a evaporação em banho-maria de uma porção de amostra e sua posterior secagem em estufa a 103-105°C até peso constante. Ele também pode ser denominado resíduo total.

Em processos biológicos aeróbios, as concentrações de sólidos em suspensão voláteis nos lodos dos reatores têm sido utilizadas para se estimar a concentração de microrganismos decompositores da matéria orgânica. Ou seja, a fração de sólidos é uma informação preliminar importante no controle operacional de sistemas de tratamento de esgotos (AGUDO, 1998). Salienta-se ainda que a determinação das frações de sólidos é muito mais recomendada para águas fortemente poluídas e esgotos do que para águas limpas.

De acordo com Cheis (2014), quando o nitrogênio é descarregado no corpo receptor juntamente com o fósforo, eles enriquecem o meio tornando mais fértil para o desenvolvimento das algas, o que caracteriza a eutrofização pelo acúmulo de nutrientes. Esse desenvolvimento acentuado traz prejuízo aos usos que se possa fazer dessas águas, causando poluição, morte de peixes e prejudicando o abastecimento público.

O pH é uma medição físico-química do potencial hidrogeniônico, que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução aquosa. É uma importante característica a ser avaliada no tratamento de esgoto. A acidez no esgoto é causada principalmente pela presença de gás carbônico, já a alcalinidade é provocada principalmente por íons bicarbonatos (NEISSNER, 2015).

Várias reações são dependentes do pH no tratamento de efluentes: a precipitação química de metais pesados assim como a oxidação química de cianeto ocorre em pH elevado; a oxidação química de fenóis ocorre em pH baixo; a quebra de óleos acontece mediante acidificação. Sendo assim o parâmetro pH se faz importante nos processos físico-químicos de tratamento de efluentes.

2.9.3 Características biológicas

Como parâmetro biológico a ser avaliado, temos os coliformes totais. Esses quando presentes no efluente podem causar doenças de veiculação hídrica, como cólera, hepatite, esquistossomose, amebíase, ascaridíase, ancilostomose, poliomielite e diarreias infecciosas (IMHOFF & IMHOFF, 2002 e CESAN, 2005).

De acordo com a SANEAGO (2005), os organismos do grupo coliforme são indicadores de poluição de águas típicas do intestino do homem e de outros animais de sangue quente (mamíferos em geral). E o fato de estarem sempre presentes no excremento humano (100 a 400 bilhões de coliformes por habitante ao dia) e serem de simples determinação, são adotadas como referência para indicar e medir a grandeza da poluição.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Preparação das amostras

Nessa pesquisa foi realizada a pirólise de bagaço de cana-de-açúcar em diferentes temperaturas, com a finalidade de obtenção de carvão. Para isso, as amostras do resíduo foram coletadas em feiras livres do município de Palmas, Tocantins (Fotografia 3) e transportadas em sacos plásticos identificados para as dependências do LARSEN (Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética), localizado no IFTO (Campus Palmas).

Fotografia 3 – Bagaço de cana-de-açúcar em feiras livres de Palmas, TO.



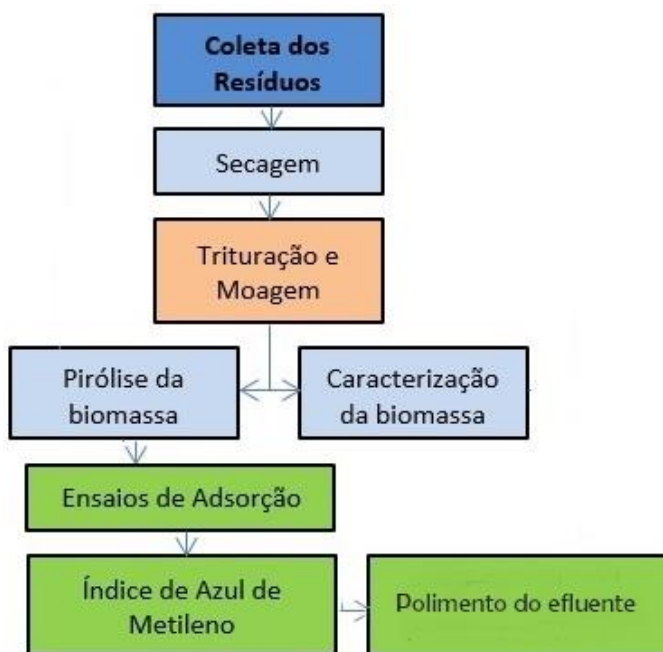
Fonte: O autor (2018).

Ao longo do desenvolvimento do projeto, foi apresentado um sistema de secagem de biomassa (bagaço da cana de açúcar), em escala de laboratório, visando a utilização em planejamento experimental. A secagem dos resíduos é feita a 60 °C. Todas as amostras foram trituradas em moinho de facas e peneiradas em peneira com abertura de 0,59 mm (ABNT 30, Tyler 28) para garantir a homogeneidade e facilitar os procedimentos analíticos, conforme sugerido por Vieira *et al.* (2009).

Basu (2010) também afirma que as amostras devem passar primeiramente por um pré-tratamento, onde quando triturada deve atender ao padrão de tamanho de partículas afim de garantir uma boa transferência de calor no resíduo e evitar a ocorrência de reações secundárias.

As amostras (biomassa) foram caracterizadas através das seguintes variáveis analíticas: Umidade (Método ASTM D 3173-85), Material volátil, Cinzas (Método ASTM D 2415-66). A caracterização química das amostras foi feita nos laboratórios LARSEN (IFTO – Palmas), seguindo o esquema da Figura 7 a seguir:

Figura 7 – Esquema da metodologia aplicada.



Fonte: O autor (2018).

3.2 Caracterização da Biomassa

A caracterização da biomassa objetiva obter informações acerca do bagaço de cana-de-açúcar que possibilitem justificar o seu tratamento termogravimétrico através do emprego da técnica de pirólise rápida para a produção de carvão ativado e bio-óleo.

3.2.1 Cálculo da Densidade Aparente

Acoplou-se uma proveta de 100 ml em uma balança analítica, conforme Figura 8. Zerou-se a balança e adicionou-se a biomassa in natura seca na forma em pó e obteve-se as massas(g) nas sucessivas adições nos respectivos volumes de

20mL, 40mL, 60mL, 80mL e 100mL. Determinou-se a densidade, média e o desvio padrão.

Figura 8 – Densidade aparente.



Fonte: O autor (2018).

3.2.2 Teor de Cinzas

De acordo com Sanchez *et al.*, (2009), o teor de cinzas foi obtido adicionando a massa de aproximadamente 1g de fibra de biomassa em triplicata a cadinhos de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi calcinada a uma temperatura de 915 °C durante 30 minutos em mufla de marca Coel modelo Hm. Na sequência o cadinho é colocado em um dessecador por 1 hora para esfriar e em seguida pesado. O teor de cinzas foi determinado pela Equação 2:

$$\% \text{ Cinza} = \frac{(P1-P2)}{(P0)} \times 100 \quad (2)$$

P1= peso do cadinho + amostra

P2= peso do cadinho + amostra após o aquecimento na presença de oxigênio

P0= peso da amostra

3.2.3 Teor de Umidade

A umidade da biomassa foi determinada em conformidade com a norma ASTM D 3173-85. A massa de aproximadamente 1g de resíduo foi adicionado a cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 110 °C por um período de 1 hora. Na sequência o cadinho foi colocado em um dessecador por 10 minutos e pesados. O procedimento foi realizado em triplicata. O teor de umidade foi determinado segundo a Equação 3.

$$\% \text{ Umidade} = \frac{(P1+P0)-P2}{(P0)} \times 100 \quad (3)$$

P1= peso do cadinho

P2= peso do cadinho + amostra após o aquecimento na estufa

P0= peso da amostra

3.2.4 Material Volátil

Em conformidade com Sanchez *et al.*, (2009), a determinação do teor de material volátil da biomassa foi obtida em triplicata pesando cerca de 1g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi aquecida em uma mufla à temperatura de 900° C, na ausência de oxigênio por um período de durante 20 minutos. O teor de material volátil foi determinado mediante a Equação 4.

$$\% \text{ Material Volátil} = \left[\frac{(P+P0)-P3}{(P0)} \right] \times 100 \quad (4)$$

P= peso do cadinho vazio

P0= peso da amostra inicial

P3= peso do cadinho + amostra final

3.2.5 Teor de Carbono fixo

O teor de carbono fixo será obtido através da diferença descrita segundo a Equação 5.

$$\text{Carbono Fixo} = 100 - (\% \text{ Umidade} + \% \text{ Cinzas} + \% \text{ Material Volátil}) \quad (5)$$

3.2.6 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, conforme Fotografia 4 na temperatura de 50 °C durante um período de 24 h. Desta maneira pode-se estabelecer a comparação da perda de água e materiais voláteis existentes na composição do resíduo *in natura*.

Fotografia 4 – Cinética da biomassa *in natura*.



Fonte: O autor (2018).

3.2.7 Análise elementar-CNH

Amostras de bagaço de cana-de-açúcar *in natura* foram avaliadas através do método de ignição em um analisador elementar Perkin- Elmer CHNS/O 2400 series II no laboratório Central Analítica da USP, com a intenção de determinar os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio da biomassa em concordância com a norma ASTM D 5373 (ASTM, 2002).

3.3 Elaboração de Briquetes da biomassa bagaço de cana-de-açúcar em pó

Os briquetes foram produzidos a partir de um volume de biomassa de 320 mL do resíduo in natura previamente seca na forma de pó a uma granulometria de 1,41mm. Para pesagem do volume utilizou-se uma balança analítica, obtendo-se um valor de aproximadamente 80g. Posteriormente foi adicionado a essa biomassa cerca de 70 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 32 mm de diâmetro. Os briquetes obtidos foram secos em uma estufa a 40 °C por um período 24 horas. O rendimento obtido foi de cerca de 3 briquetes para cada batelada experimental. A Fotografia 5 apresenta os briquetes obtidos através da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar para posterior pirólise em um reator pirolítico de leito fixo.

Fotografia 5 – Briquetes obtidos do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: O Autor (2018)

3.4 Pirólise da Biomassa

Os procedimentos empregados nesse estudo foram divididos em duas partes, cujas condições experimentais são encontradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições experimentais empregados nos testes de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.

Parâmetros	Testes iniciais	Planejamento experimental DCCR
Temperatura (°C)	500 e 550	360, 400, 500, 600 e 640
Tempo de reação (min)	30	30
Taxa de aquecimento (°C/min)	30	24, 30, 45, 60 e 66
Vazão de inerte (mL/min)	4	4

Fonte: O autor (2018).

3.4.1 Pirólise de bagaço de cana-de-açúcar em reator de leito fixo – Testes Iniciais

A biomassa foi introduzida ao reator na forma de briquete. A conversão térmica foi efetuada em um reator de leito fixo (Fotografia 6) 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.

Fotografia 6 – Reator de leito fixo empregado nos experimentos de pirólise de biomassa.



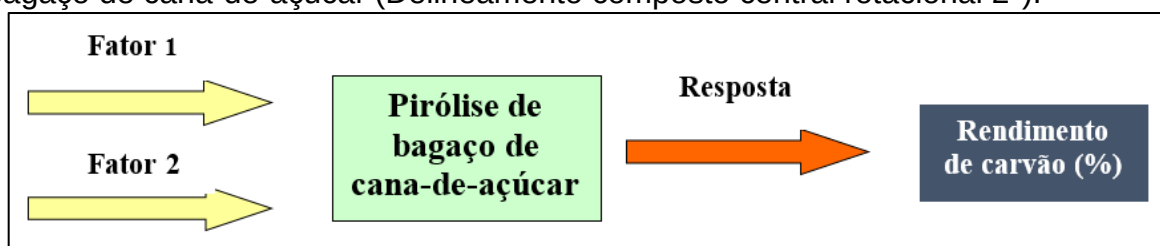
Fonte: O autor (2018).

Para fins de balanço de massa, após a reação e o resfriamento da unidade de pirólise, o produto final (carvão) do processo foi coletado e pesado. O material sólido foi recuperado diretamente do reator.

3.4.2 Pirólise de bagaço de cana-de-açúcar – Planejamento Experimental DCCR

Foi verificado através de planejamento multivariável o efeito de dois fatores no sistema de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar. Aplicou-se um planejamento experimental 2^2 – 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. Os valores mínimos e máximos são apresentados na Tabela 3. Esses ensaios foram realizados na mufla MODELO W-One, MARCA EDG Equipamentos. No planejamento descrito na Figura 9, o fator 1 representa a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e o fator 2 é a taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

Figura 9 – Representação do planejamento experimental utilizado na pirólise de bagaço de cana-de-açúcar (Delineamento composto central rotacional 2^2).



Fonte: O autor (2018).

Tabela 3 – Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a pirólise de bagaço de cana.

Fatores	Níveis				
	(-1,4)	(-1)	(0)	(+1)	(+1,4)
Temperatura final do processo ($^{\circ}\text{C}$)	360	400	500	600	640
Taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	24	30	45	60	66

Fonte: O autor (2018).

Os experimentos foram realizados de forma aleatória, com três repetições no ponto central, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2²

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	Temperatura (oC)	Taxa de aquecimento (°C/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 (2018).

3.5 Testes de Adsorção de Corante em filtro de carvão

O teste foi feito em filtro descendente contendo como meio filtrante o carvão da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar. Realizou-se o experimento de fluxo contínuo, mostrado na Fotografia 7 utilizando a solução do corante a uma concentração de 10 mg/L com pH ajustado a 7,0.

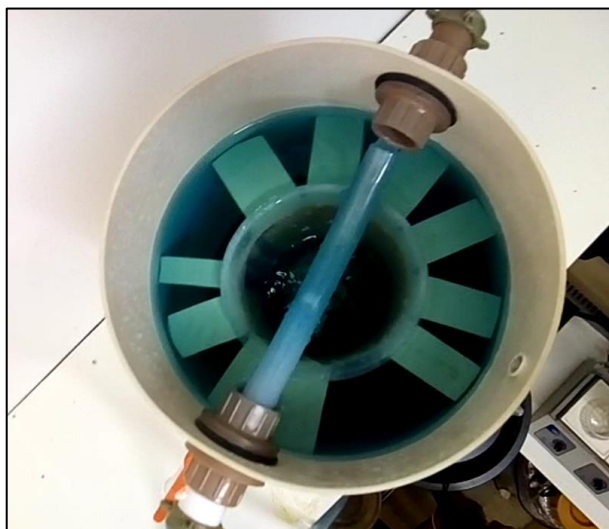
Fotografia 7 – Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: O autor (2018).

Foi empregado um sistema de filtração constituído das seguintes partes: (a) reservatório inferior de 50 litros, (b) reservatório superior de 20 litros com sistema de drenos e (c) filtro de carvão e areia. No reservatório inferior foi instalada uma bomba submersa para o transporte do corante para o reservatório superior. No reservatório superior foi inserido um sistema de drenos com o objetivo de manter o volume do líquido constante e evitar elevadas variações de vazão do líquido durante a etapa de filtração (Fotografia 8). No reservatório superior existem três tubulações para transporte de líquidos: (a) alimentação do reservatório inferior, (b) dreno para o reservatório inferior e (c) alimentação do filtro. A alimentação do filtro foi feita por gravidade. As dimensões dos filtros são: altura total da tubulação 40 cm, altura do carvão na tubulação 11 cm, diâmetro da tubulação 2,0 cm. Durante a montagem do sistema foi utilizada aproximadamente uma massa de 6 gramas do carvão em cada experimento. Foi testado o nível de vazão de 5 mL/min.

Fotografia 8 – Sistema de filtração de corante.



Fonte: O autor (2018).

A adsorção da solução do corante foi medida em espectrofotômetro (Fotografia 9) de duplo feixe (PERKIN ELMER, LAMBDA 750) em 650 nm, com o auxílio de uma curva de calibração externa, construída pela análise de soluções de concentrações iguais a: 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 80% e 100% partindo-se da solução inicial de azul de metileno.

Fotografia 9 – Análise espectrofotométrica do corante após sistema de filtração.



Fonte: O autor (2018).

3.6 Remoção de poluentes do efluente utilizando filtro de areia e carvão obtido da pirólise do bagaço da cana-de-açúcar

Foi empregado um sistema de filtração de águas de sobrenadante de fossas sépticas produzidas no Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas. Esse sistema consiste num tanque preenchido de areia e carvão obtido da pirólise de bagaço da cana-de-açúcar, com fundo drenante e com esgoto em fluxo descendente, onde ocorre a remoção de poluentes, tanto por ação biológica quanto física. O sistema foi operado em uma série de dois filtros em regime contínuo, conforme a Fotografia 10.

Fotografia 10 – Sistema de filtros em série em fluxo descendente.

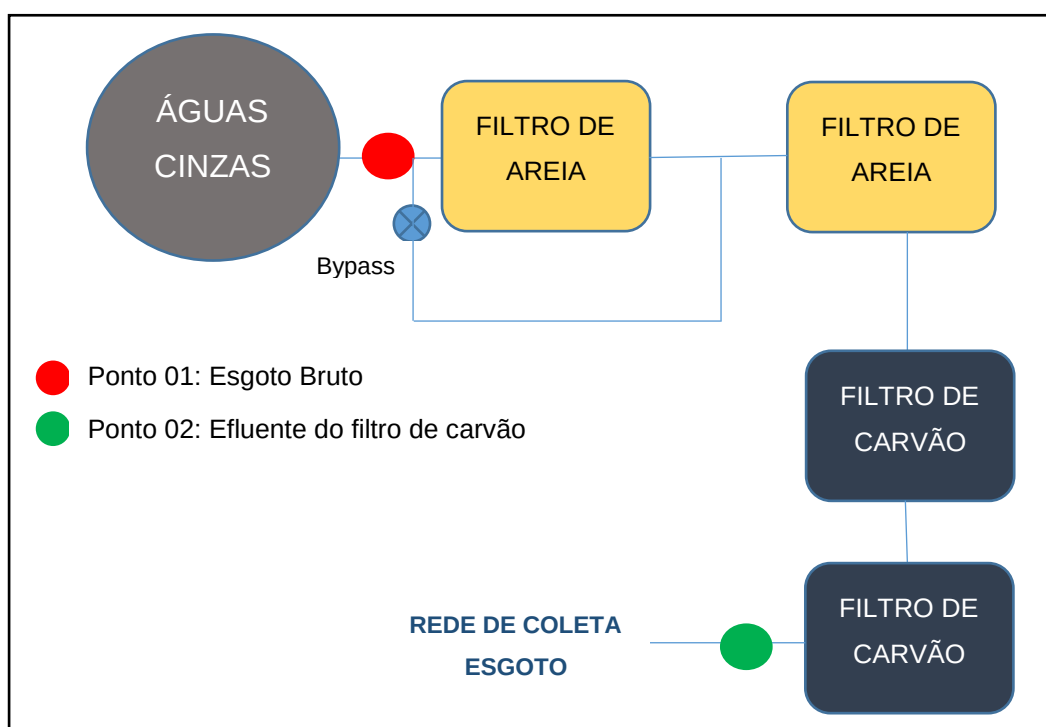


Fonte: O autor, 2018.

Foi realizado o monitoramento da qualidade do efluente filtrado. Para os testes foram coletadas amostras em dois pontos: P1 – tanque de alimentação de águas de sobrenadante de fossa séptica e P2 – Efluente final do sistema ou efluente do carvão ativado. As amostras foram coletadas a cada 2 horas da operação, em garrafas plásticas com capacidade de dois litros.

A Figura 10 representa de forma esquemática o sistema de filtro contínuo:

Figura 10 – Esquema representativo dos filtros



Fonte: O autor (2018).

As determinações seguiram os métodos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 19ª edição (APHA/AWWA/WEF, 1998), conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Métodos analíticos aplicados na caracterização físico-química da água do efluente do IFTO – Campus Palmas.

Parâmetros	Métodos	Referência
Temperatura (°C)	Termômetro de Filamento de Mercúrio	APHA, 1998
Turbidez	Nefelométrico	APHA, 1998
pH (-)	Potenciométrico	APHA, 1998
Alcalinidade (mg/L)	Titulométrico	APHA, 1998
DBO (mg/L)	Frascos padrões	APHA, 1998
Sólidos Totais (mg/L)	Gravimétrico	APHA, 1998
Nitrogênio Amoniacal (mgN/L)	Nesslerização Direta	APHA, 1998
Coliformes Totais (NMP/100mL)	Tubos múltiplos	APHA, 1998

Fonte: APHA (1998).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da biomassa

4.1.1 Análises imediata e elementar da biomassa em estudo

A Tabela 6 mostra os dados obtidos durante as análises imediata e elementar do bagaço da cana-de-açúcar.

Tabela 6 – Resultados obtidos durante a caracterização do bagaço da cana-de-açúcar.

Biomassa	Análise Imediata (%)			
	Cinzas	Material Volátil	Carbono Fixo	
	11,27	73,78	14,95	
Bagaço de cana	Análise Elementar (%)			
	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre
	44,80	5,35	0,38	0,01

Fonte: O autor (2018).

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) representa a massa restante após a libertação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade. O teor de material volátil foi de 73,78 % 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.

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.

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, elevado como também densidade reduzida.

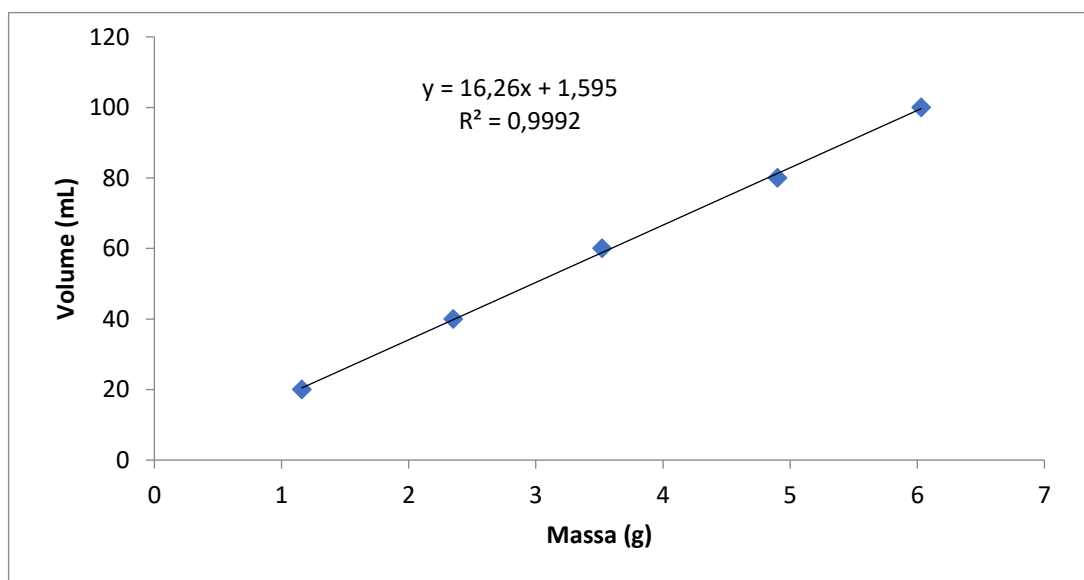
O valor da densidade de 0,059 g/ml foi determinado a partir da média dos valores encontrados na Tabela 7 e Figura 11, respectivamente.

Tabela 7 – Resultado da análise da densidade aparente do bagaço da cana

Experimento	Massa (g)	Volume (mL)	Densidade (g/mL)
1	1,16	20	0,058
2	2,35	40	0,058
3	3,52	60	0,059
4	4,9	80	0,061
5	6,03	100	0,060
Média			0,059
Desvio Padrão			0,001

Fonte: O autor (2018).

Figura 11 – Determinação do valor de densidade da biomassa em estudo.

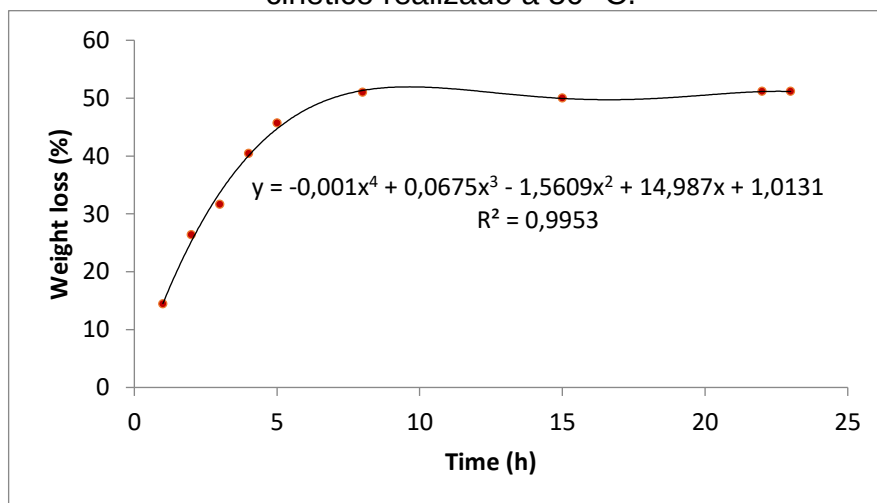


4.1.2 Cinética de perda de massa da biomassa em estudo

A Figura 12 mostra a curva de secagem do bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo, na temperatura de 50 °C. Observa-se que houve uma redução da umidade do material influenciado pela temperatura e do tempo de secagem. Segundo Shie *et al.*, (2003), o teor de água tem um impacto importante sobre o consumo de energia para secagem da biomassa. De acordo com Sánchez *et al.*, (2009), a etapa inicial de secagem da amostra é o estágio que se gasta mais energia durante o processo de pirólise e que a umidade interfere no deslocamento da

biomassa principalmente em reatores do tipo leito fluidizado ou do tipo cilindro rotativo podendo dificultar a passagem da amostra. É interessante ressaltar a importância de se realizar cinética de perda de água quando se propõe aplicar um processo de pirólise em uma biomassa, principalmente quando um dos fatores que se deseja conhecer os efeitos seja o tempo. De acordo com a Figura 12, os percentuais de perda de massa da amostra nos tempos de 5, 8 e 22 horas foram de respectivamente, 46, 50 e 51 %.

Figura 12 – Determinação de perda de massa do bagaço da biomassa em estudo cinético realizado a 50° C.



Fonte: O autor (2018).

4.2 Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de bagaço de cana-de-açúcar (testes iniciais)

Os dados experimentais obtidos nos testes iniciais da pirólise de bagaço de cana-de-açúcar são apresentados nas Tabelas 8 e 9, para a produção de carvão.

Tabela 8 – Dados de rendimento de carvão obtido durante os ensaios de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.

Experimentos	Temperaturas (°C)	
	500	550
1	45,32	44,17
2	42,20	44,17
3	45,57	42,87
4	42,63	37,06
Média	43,93	42,07
Desvio Padrão	1,80	3,40
Graus de Liberdade	3	3

Fonte: O autor (2018).

Tabela 9 - Análise estatística através do Teste-t simulando variâncias equivalentes para a produção de carvão em ensaios de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.

	500 °C	550 °C
Média	43,93	42,07
Variância	3,10	11,52
Observações	4	4
Variância agrupada	7,31	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	6	
Stat t	0,97	
P(T<=t) uni-caudal	0,18	
t crítico uni-caudal	1,94	
P(T<=t) bi-caudal	0,36	
t crítico bi-caudal	2,45	

Fonte: O autor (2018).

Os dados observados na Tabela 9 informam que não existem diferenças significativas de médias de produção de carvão no processo de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar nos dois tratamentos empregados (temperaturas de 500 e 550 °C), no nível de 95 % de confiança. Isso indica que o reator de pirólise pode ser operado em temperatura mais baixa, representando assim uma economia de energia do processo.

De acordo com Pedroza *et al.*, (2014), as reações que ocorrem durante o processo de pirólise estão totalmente correlacionadas com a temperatura que a biomassa é submetida. A temperatura é um parâmetro que influencia o rendimento em carvão, líquidos e gases não condensáveis, sendo que quanto maior a temperatura, maior o grau de decomposição térmica da biomassa, com consequente aumento na quantidade de líquidos pirolenhosos e gases e, consequentemente menor rendimento em carvão.

4.3 Planejamento experimental 2² – Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Os resultados experimentais obtidos no planejamento DCCR são apresentados na Tabela 10. Nesse planejamento foram investigados os seguintes fatores: temperatura do reator (° C) e taxa de aquecimento do reator (°C/min). Os rendimentos percentuais de carvão foram considerados as respostas do planejamento experimental.

Tabela 10 – Resultados do Planejamento 2² Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) obtidos para a produção de carvão durante a pirólise de bagaço da cana-de-açúcar.

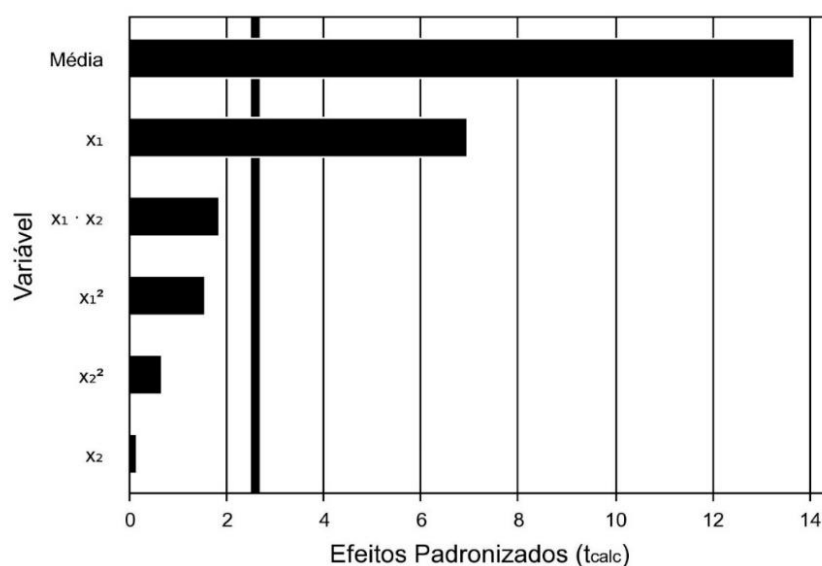
Ordem dos experimentos	Temp (°C)	Taxa (°Cmin)	Rendimento Carvão (%)
1	-	-	54,1
2	+	-	43,2
3	-	+	65,7
4	+	+	34,2
5	0	0	44,0
6	0	0	44,2
7	0	0	44,4
8	-1,4	0	72,0
9	0	1,4	37,8
10	1,4	0	24,5
11	0	-1,4	38,0

Fonte: O autor (2018).

O diagrama de Pareto (Figura 13) gerado a partir dos dados do planejamento fatorial já mencionado indica que a temperatura e a taxa de aquecimento tiveram um efeito negativo para a produção de carvão. Esses dados mostram que, o aumento da temperatura de 360 para 640 °C e a taxa de aquecimento de 24 a 66 minutos favoreceram a diminuição da geração de carvão no processo.

A redução no rendimento de sólidos com o aumento da temperatura pode ser atribuído à devolatilização dos compostos orgânicos sólidos (hidrocarbonetos, ácidos húmicos, proteínas) e gaseificação parcial de resíduos carbonosos no carvão em altas temperaturas. A devolatilização é o primeiro passo para a produção do carvão por processos térmicos. O comportamento dos compostos da biomassa, durante a devolatilização, é resultado da soma dos comportamentos dos componentes individuais da biomassa: celulose, hemicelulose, lignina, ácidos húmicos, hidrocarbonetos sólidos.

Figura 13 – Representação do Diagrama de Pareto obtido do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) obtidos para a produção de carvão durante a pirólise.



Fonte: O autor (2018).

O maior rendimento de carvão foi observado no ensaio 8 (62,3%), sendo esse experimento operado nas condições: (a) temperatura do sistema 360°C e (b) taxa de aquecimento de 45 min. O menor rendimento (24,9%) foi obtido com as condições experimentais (temperatura do sistema = 600 °C e taxa de aquecimento = 60min).

A Tabela 11 mostra os coeficientes de regressão das variáveis estudadas na obtenção de carvão durante a pirólise de bagaço de cana-de-açúcar. Foi

considerado também o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados em vermelho (a um nível de 95% de confiança).

Tabela 11 – Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2² obtidos da produção de carvão de pirólise, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coeficientes regressão	Erro Padrão	T _{calc}	p-valor
Média	44,18	3,22	13,73	0,0000
X1 (L)	-13,15	1,97	-6,67	0,0011
X1 (Q)	3,26	2,35	1,39	0,2227
X2 (L)	-0,29	1,97	-0,14	0,8905
X2 (Q)	-1,91	2,35	-0,81	0,4524
X1 x X2	-4,00	2,79	-0,14	0,2107

Fonte: O autor (2018).

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a obtenção de carvão durante a pirólise de biomassa empiricamente, conforme Equação 6.

$$\text{Rendimento de Carvão (\%)} = 44,18 - 13,15X_1 - 0,29X_2 + 3,26X_1^2 - 1,91X_2^2 - 4,00 X_1.X_2 \quad (6)$$

Onde: X_1 = Temperatura (°C);

X_2 = taxa de aquecimento (°C/min) (em valores codificados).

A Tabela 12 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a produção de carvão na pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 12 – ANOVA para a produção de carvão em processo de pirólise de bagaço de cana-de-açúcar.

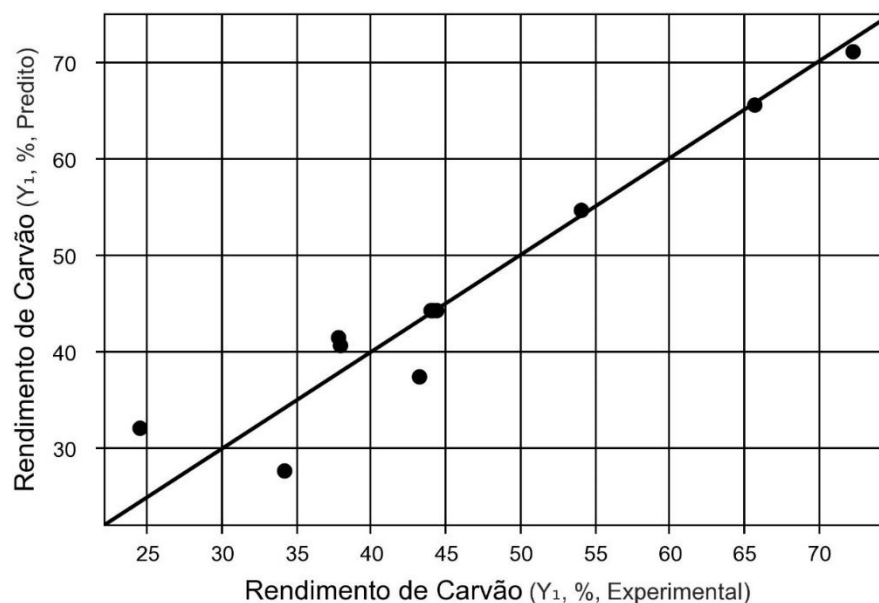
Fonte de variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Regressão	1738,6	5	347,7	11,1	0,00967
Resíduos	156,1	5	31,2		
Falta de ajuste	156,1	3	52,0	1687,1	0,00059
Erro puro	0,1	2	0,0		
Total SS	1894,7	10			

$R^2 = 0,9176$; $F_{\text{tabelado}} (5; 5; 0,05) = 5,05$.

Fonte: O autor (2018).

Verifica-se na Tabela 12 que o coeficiente de determinação (R^2) obtido pela regressão é de 0,9176. A Figura 14 apresenta a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado. Observa-se pela análise da Figura 14 um bom ajuste do modelo, justificado pela apreciável aglomeração de pontos próximos da reta representativa. Para confirmação da significância dos parâmetros do modelo pela análise da ANOVA (Tabela 12), foi realizado o teste F. Para ser significativo estatisticamente, o valor de F obtido da regressão deve ser maior que o valor de F_{tabelado} (Neto *et al.*, 2007; Rodrigues e Lemma, 2009). O valor de $F_{\text{calculado}}$ foi determinado pela expressão, $F_{\text{calculado}} = \text{Quadrado médio regressão} / \text{Quadrado médio erro}$. Comparando o valor de $F_{\text{calculado}}$ (11,1) para a regressão com o valor de F_{tabelado} ($F_{\text{tabelado}} = 5,05$), verifica-se uma regressão significativa. Portanto, os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados.

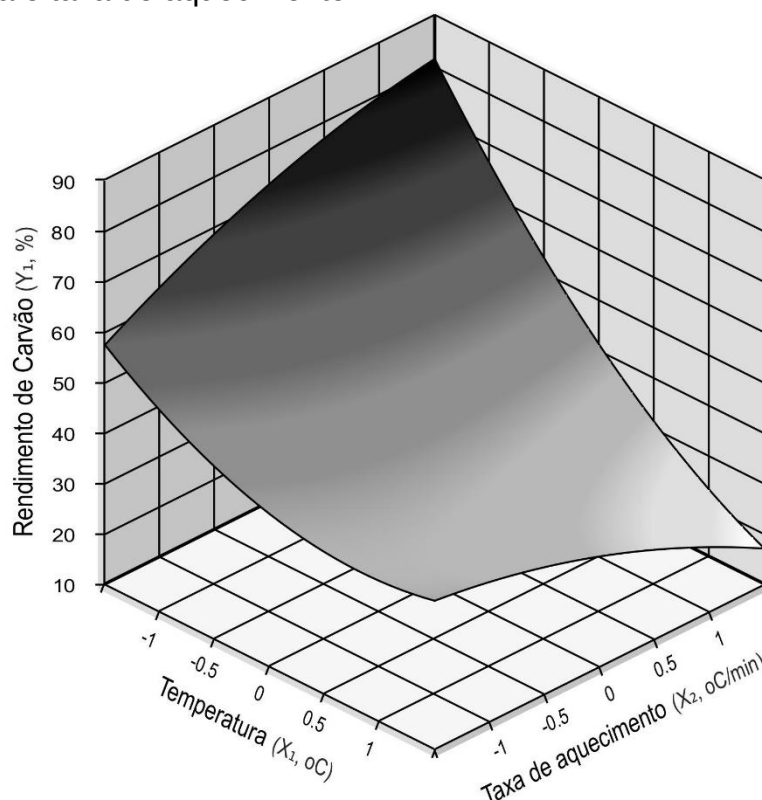
Figura 14 – Valores observados versus valores previstos, para a obtenção de carvão a partir da pirólise de bagaço da cana.



Fonte: O autor (2018).

Portanto, os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. A máxima quantidade de carvão foi obtida em condições de baixa temperatura, conforme observado na superfície de resposta gerada pelo modelo da Figura 15.

Figura 15 – Superfície de resposta para obtenção de carvão, com os fatores de temperatura e taxa de aquecimento.

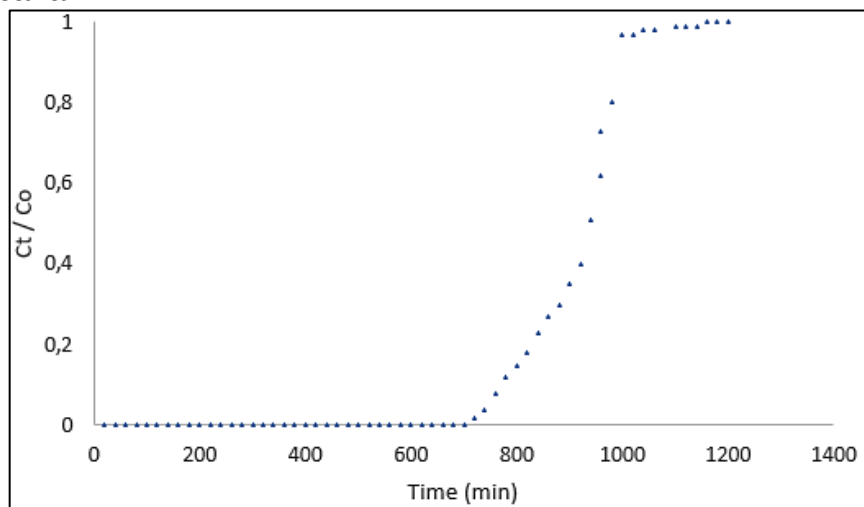


Fonte: O autor (2018).

4.4 Teste de adsorção de corante em filtro de carvão

O gráfico 1 mostra a eficiência da adsorção de corante em filtro de carvão. Notou-se que até o tempo de 700 minutos a remoção de corante por adsorção foi de 100%. No tempo de 900 minutos, por exemplo, a remoção foi de 65%. Já no tempo de 1160 minutos o filtro saturou totalmente, havendo necessidade de substituição do filtro de carvão.

Gráfico 1 – Remoção de corante em filtro de carvão obtido a partir da pirólise do bagaço de cana.



Fonte: O autor (2018).

4.5 Polimento do efluente em filtro de areia e carvão

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos através das análises físico-químicas dos parâmetros analíticos: pH, temperatura, DBO, sólidos e nitrogênio amoniacal no esgoto bruto e esgoto tratado. Os valores de pH analisados no esgoto bruto e esgoto tratado se situaram em torno do neutro, 7,1 a 7,4, indicando boas condições para o desenvolvimento bacteriano no sistema de tratamento, principalmente na adesão de microrganismos nas partículas de areia e carvão. Os valores da temperatura não sofreram muitas oscilações e se situaram entre 25,9 e 28,2°C.

A Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011, "*Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005*" (Brasil, 2011). Segundo esse documento, para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários deverão ser obedecidas as seguintes condições e padrões específicos:

- a) pH entre 5 e 9;
- b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- c) materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone *Inmhoff*;
- d) Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO₅, 20°C: máximo de 120 mg/L,

sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO;

e) substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg/L;

f) ausência de materiais flutuantes e;

g) as condições e padrões de lançamento relacionados na Seção II, art. 16, incisos I e II desta Resolução, poderão ser aplicáveis aos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, a critério do órgão ambiental competente, em função das características locais, não sendo exigível o padrão de nitrogênio amoniacal total.

Assim sendo, em se tratando da variável DBO, o sistema experimental apresentou boa remoção (80 %) e atendeu aos padrões de lançamento de efluentes, segundo a resolução brasileira.

As concentrações de nitrogênio amoniacal foram altas nas amostras das águas de sobrenadante de fossa séptica (102,2 mgN/L). O efluente final do filtro apresentou alta concentração de nitrogênio amoniacal (38,5 mg/L). A eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal foi de 62 %.

Tabela 13 – Resultados experimentais obtidos durante o monitoramento do sistema de filtração de águas de sobrenadante de fossa séptica.

Variáveis Analisadas	Metodologia	Resultados		Resolução
		P1	P2	430/2011 CONAMA
pH (-)	Eletrométrico	7,1	7,4	5 – 9
Temperatura (°C)	Eletrométrico	28.2	25,9	< 40°C
Sólidos Totais (mg/L)	Gravimétrico	650	350	-
Sólidos Fixos (mg/L)	Gravimétrico	450	310	-
Sólidos Voláteis (mg/L)	Gravimétrico	200	30	-
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	Volumétrico	0,3	0	≤ 1mL/L
Alcalinidade	Volumétrico	410	160	-
DBO (mg/L)	Frascos padrões	110	22	120
N. Amoniacal (mgN/L)	Nessler	102,2	38,5	< 20,0 mg/L N

Fonte: O autor (2018).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim, a pesquisa da aplicação do processo de pirólise do bagaço de cana-de-açúcar para produção de carvão, mostrou-se como uma importante alternativa de aproveitamento e agregação de valor ao resíduo ao transformá-lo em matéria-prima de processos através da rota termoquímica. A partir disso, é possível reduzir o impacto ambiental da disposição final dessa matéria-prima, além de principalmente reduzir os poluentes orgânicos e inorgânicos compostos nos efluentes.

O tratamento termoquímico apresentou bastante eficiência na decomposição da matéria prima (bagaço da cana) em carvão ativado, visto que esse apresentou maior rendimento satisfatório de 72,0%. A partir daí uma biomassa que seria descartada, passa a ter agregação de valor atribuída à capacidade de adsorção em seu produto final.

Quanto ao polimento de águas de sobrenadante de fossa séptica, os parâmetros atenderam aos padrões de lançamento de efluentes dispostos na Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011. Somente o nível de Nitrogênio Amoniacal, apesar da remoção de 62%, não apresentou apto para o devido lançamento, que pode ser explicado pelo efluente ser de uma dependência escolar. Sugere-se ainda para pesquisas futuras a utilização de mais um filtro em série, para que assim a eficiência atenda aos padrões mínimos.

Portanto, a propriedade de adsorção do carvão aliada a areia apresentou eficiência satisfatória na remoção de poluentes do efluente do IFTO – Campus Palmas, tornando-se assim uma alternativa promissora de tratamento de efluentes.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABREU, Y. V.; NASCIMENTO, H. R. **A produção da cana-de-açúcar e de etanol nas novas fronteiras agrícolas: o estado do Tocantins**. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 17, n. 27, p. 01-118, jan./jun. 2016.

AGÊNCIA BRASIL. **Crescimento de Produção de Resíduos em 2015**. Disponível em: < <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-10/producao-de-residuos-solidos-no-pais-cresceu-17-em-2015>> Acesso em 19 de junho de 2018.

AGUDO, E.G. Notas de Aula da Disciplina “**Fundamentos Químicos do Saneamento**”, Universidade Mackenzie, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>. Acesso em: 19 maio de 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1987. **Norma NBR 9898/1987 – Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores** – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, BR, 1987b.

BASU, Prabir. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**. BOKROS, J. C. in **Chemistry and Physics of Carbon**, vol. 5, Marcel Dekker, New York, 1969. Burlington: Ed. Elsevier, 2010.

CHEIS, Daiana. **Remoção de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, no tratamento de esgotos**. Revista TAE. Disponível em < <http://www.revistatae.com.br/7454-noticias>>. Acessado em 24 de julho de 2018.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim da Safra de Cana-de-Açúcar. Safra 2017/18**. Disponível em <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acessado em 03 de novembro de 2018.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Princípios do tratamento Biológico de águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997

FILHO, Artur Tôrres. **Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos**. Tese de pós graduação, 175p., 2014.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento**. Ministério da Saúde. Brasília, 2004.

IMHOFF, K. R; IMHOFF, K. R. **Manual de tratamento de águas residuárias**. São Paulo, E. Blücher, 2002

JANKOWSAKA, Helena; Swiatkowski, Andrei; Choma, Jerzy – **Active Carbon** – 1989.

JORDÃO, Eduardo P.; PESSÔA, Constantino A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3 ed, Rio de janeiro: ABES,1995.

KAUA, Luciana. **Resíduo da produção de cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/sucroenergetico/156845-residuos-da-producao-de-cana-de-acucar.html#.WyrMe9JKjIV>>. Acesso em 20 de maio de 2018.

MACKENZIE, L. D. **Water and wastewater engineering: Design principles and practice**. Ed. McGraw-Hill Companies. 2010.

MENEDEZ, J.A., INGUANZO, M., DOMINGUEZ, A., PIS, P.P. **Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 71, p.657-667, 2004.

MONTES, A. C. Rodrigues. **Avaliação do processo de obtenção de etanol de 2ª geração utilizando bagaço de cana**. Monografia, UFU, 53p., 2017.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. Edgard Blucher: São Paulo, 2003.

OGATA, B.H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias.** Tese de mestrado, Universidade de São Paulo, 2013.

PADILHA, Adriano. **O que são efluentes domésticos.** Significados. Disponível em: <<https://www.significados.com.br/efluentes-domesticos/>> Acesso em 20 de julho de 2018.

PEDRESCHI, Ricardo. **Aproveitamento do bagaço de cana da indústria sucroalcooleira na produção de painéis aglomerados.** Tese apresentada na Universidade Federal de Lavras – Minas Gerais, 2009.

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

POTIER, O; PONS, M. N. **Elements of modelling and control of urban wastewater treatment systems.** In.: QUEVAUVILLER, P; THOMAS, O; BEKEN, A. V. D. Wastewater Quality Monitoring and Treatment. Ed. John Wiley & Sons, Ltd, England, 2006.

ROOP CHAND BANSAL, Jean – **Baptiste Donnet, Fritz Stoeckli Active Carbon** (1988).

SANCHEZ, M. E., MENÉNDEZ, J. A., DOMÍNGUEZ, A., PIS, J. J., MARTÍNEZ, O., CALVO, L. F., BERNAD, P. L. **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge.** Biomass and Bioenergy, 33, p.933-940, 2009.

SANEAGO. **Esgoto.** Disponível em: <<http://www.saneago.com.br/>>. Acessado em 25 de julho de 2018.

SANTO, Z.N.E.; ALMEIDA, L.T. **Etanol: impactos sócio-ambientais de uma commodity em ascensão.** In: VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2007, Fortaleza. Anais... Fortaleza: International Society for Ecological Economics, 2007. 24 p

SANTOS, D.S. **Produção de etanol de segunda geração por *Zymomonas mobilis* naturalmente ocorrente e recombinante, empregando biomassa lignocelulósica.** Tese de Doutorado, UFRJ, 218 p., 2012.

SILVA, G. M. da. **Avaliação de diferentes configurações de hidrólise enzimática e fermentação utilizando bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol 2G.** 2015. 125 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) — Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

SILVA, M. de A.; GAVA, G.J. de C.; CAPUTO, M.M.; PINCELLI, R.P.; JERÔNIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S. **Uso de reguladores de crescimento como potencializadores do perfilamento e da produtividade em cana-soca.** *Bragantia*, v.66, p.545-552, 2007.

TEIXEIRA, Marcelo. **Energia a partir de bagaço de cana perde espaço.** *Revista VEJA*, 2012. Disponível em: < <https://veja.abril.com.br/economia/energia-a-partir-de-bagaco-de-cana-perde-espaco/> > Acesso em 14 de maio de 2018.

UNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo. **Setor Sucroenergético. 2015.** Disponível em: . Acesso em: 10 maio 2018.