



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

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS MATEUS LOPES SÁ LUZ COSTA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS, VISANDO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVANDERIAS
INDUSTRIAIS**

PALMAS

2019

LUCAS MATEUS LOPES SÁ LUZ COSTA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS, VISANDO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVANDERIAS
INDUSTRIAIS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito final 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

2019

Costa, Lucas Mateus Lopes Sá Luz

Produção de carvão ativado a partir de resíduos sólidos urbanos, visando tratamento de efluentes de lavanderias industriais. /

Lucas Mateus Lopes Sá Luz Costa. – Palmas, 2019.

70 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação do Tocantins, *Campus* Palmas, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Pirólise 2. Poda de árvore 3. Tratamento de efluentes
I. Produção de carvão ativado a partir de resíduos sólidos urbanos, visando tratamento de efluentes de lavanderias industriais.

LUCAS MATEUS LOPES SÁ LUZ COSTA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS, VISANDO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVANDERIAS
INDUSTRIAIS**

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

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Dr. Marcelo Mendes Pedroza
IFTO – *Campus* Palmas

Dra. Aline Maria Costantin
IFTO – *Campus* Palmas

Me. Octaviano Sidnei Furtado
IFTO – *Campus* Palmas

*‘A “Esperança” é a coisa com penas –
Que se empoleira na alma –
E canta uma melodia sem palavras –
E nunca – nunca para –*

*Soa bem – na ventania –
E só a forte tormenta –
Há de calar a Passarinha
Que a tantos acalenta –*

*Ouvi-a na terra mais fria–
E nos Mares sem fim –
Mas nunca, em Extremidade,
A mim pediu – uma migalha.’*

(Emily Dickinson)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar todos os meus passos e me dar forças para vencer cada dificuldade.

A minha família, meus pais e minha namorada, pelo amor, incentivo e pelo conforto nos momentos de maior adversidade.

Aos meus amigos, que estiveram sempre ao meu lado.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Mendes Pedroza, pelos conselhos, ensinamentos e apoio, que contribuíram para a conclusão deste trabalho e do meu aprendizado.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta monografia.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a produção de carvão ativado a partir da degradação térmica da poda de árvore encontrada nas proximidades do IFTO – Campus Palmas, sendo este aplicado na confecção de filtros para tratamento de efluentes de lavanderias industriais. Após o processo de poda, a biomassa é, na sua maioria descartada de maneira irregular, causando poluição ao meio ambiente. A biomassa e o carvão foram analisados através de métodos clássicos (análise imediata e elementar, Microscopia Eletrônica de Varredura). Para o processo de pirólise, foram estudadas temperaturas entre 360 e 640 °C e taxas de aquecimento entre 13 e 27°C/min. A biomassa apresentou teor de carbono igual a 41,5 %, justificando sua aplicação para produção de carvão. O carvão obtido na pirólise apresentou superfície com porosidade, indicando sua utilização em sistemas de adsorção. A eficiência do filtro de areia e carvão ativado foi de 100 % durante 2 horas, aproximadamente. Além disso, o carvão ativado foi eficiente no processo de remoção de poluentes de efluente de lavanderia industrial, como Cloro, Sólidos e Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Palavras-chave: Carvão ativado, poda de árvore, pirólise, tratamento de efluentes, filtração.

ABSTRACT

This work aims the production of activated charcoal from the thermal degradation of tree prunes found near the IFTO – Campus Palmas, which is applied in the manufacture of filters for wastewater treatment of industrial laundries. After the pruning process, the biomass is mostly disposed irregularly, causing pollution to the environment. Biomass and charcoal were analyzed by classical methods (immediate and elemental analysis, Scanning Electron Microscopy). For the pyrolysis process, temperatures between 360 and 640 °C and heating rates between 13 and 27°C/min were studied. The biomass presented a carbon content of 41.5%, justifying its application for charcoal production. The charcoal obtained in the pyrolysis presented surface with porosities, indicating its use in adsorption systems. The efficiency of the sand and activated charcoal filter was 100% for approximately 2 hours. Also, the activated charcoal was efficient in the process of removing industrial laundry wastewater pollutants such as Chlorine, Solids and Chemical Oxygen Demand (COD).

Keywords: Activated charcoal, tree prune, pyrolysis, wastewater treatment, filtration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de RSU no Brasil	17
Figura 2 - Coleta de RSU no Brasil.....	17
Figura 3 - Geração de RSU na região Norte.....	18
Figura 4 - Coleta de RSU na região Norte	18
Figura 5 - Disposição final de RSU na região Norte (t/dia)	18
Figura 6 - Classificação dos tipos de resíduos de madeira.	19
Figura 7 - Poda de árvore	20
Figura 8 - Depósito de podas trituradas em aterro sanitário.....	20
Figura 9 - Alternativas tecnológicas de uso de resíduos de madeira.....	21
Figura 10 – Produtos da conversão térmica de biomassa.....	23
Figura 11 - Microscopia eletrônica do carvão ativado	25
Figura 12 - Tamanho de poros para carvão ativado, sílica gel, alumina ativada, carbonos de peneira molecular (PMC) e zeólito 5A.....	26
Figura 13 - Esquema da metodologia.....	31
Figura 14 - Podas de árvores coletadas no IFTO	32
Figura 15 - Amostras trituradas e peneiradas	32
Figura 16 – Biomassa hidratada	35
Figura 17 - Briquete hidratado e seco.....	36
Figura 18 - Reator de pirólise.....	36
Figura 19 - Subprodutos da pirólise	37
Figura 20 - Representação do planejamento experimental empregado na pirólise de resíduos da poda de árvore	37
Figura 21 - Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore	40
Figura 22 - Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore	40

Figura 23 - Análise espectrofotométrica do corante após sistema de filtração	41
Figura 24 - Efluente de lavanderia industrial	41
Figura 25 - Coagulação/Filtração do efluente utilizando aparelho JAR Test	42
Figura 26 - Sistema de filtração de águas cinzas, contendo dois filtros em série	43
Figura 27 – Métodos analíticos empregados: a) Temperatura e Condutividade; b) Turbidez; c) pH; d) Cloro; e) DQO; f) Sólidos	44
Figura 28 - Gráfico de dispersão em função da densidade da poda de árvore	48
Figura 29 - Cinética de secagem da poda de árvore à 50 ° C	49
Figura 30 - Diagrama de Pareto obtido do planejamento fatorial DCCR – 22 para a obtenção de carvão a partir da pirólise de resíduos da poda de árvore.	50
Figura 31 - Valores experimentais versus valores preditos, para a obtenção de rendimento de carvão a partir da pirólise de resíduos da poda de árvore.....	51
Figura 32 - Superfície de Resposta para a obtenção de carvão a partir da pirólise de resíduos da poda de árvore, com os fatores Temperatura (°C) e Taxa de aquecimento (°C/min).....	53
Figura 33 - Condições de produção de carvão	53
Figura 34 - Microscopia eletrônica do carvão ativado	56
Figura 35 - Curva de calibração	57
Figura 36 - Eficiência de remoção do azul de metileno em filtro de carvão obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variantes do processo pirolítico	22
Tabela 2 - Possíveis contaminantes da água cinza por fonte produtora	28
Tabela 3 - Tecnologias empregadas para tratamento de águas cinzas.....	29
Tabela 4 - Fatores e níveis empregados no planejamento experimental 2 ²	38
Tabela 5 - Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial 2 ²	38
Tabela 6 - Métodos analíticos para caracterização físico-química de efluente	43
Tabela 7 - Análise imediata da poda de árvore e outros.....	45
Tabela 8 - Análise elementar da poda de árvore e outros.....	46
Tabela 9 - Densidade volumétrica aparente da poda de árvore	48
Tabela 10 - Resultados do planejamento 2 ² para a fração sólida (carvão) durante a pirólise de resíduos da poda de árvore.....	49
Tabela 11 - Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR – 2 ² obtidos da produção de carvão em sistema de pirólise em intervalo de 95% de confiança.....	51
Tabela 12 – Análise de Variância (ANOVA) para a produção de carvão em processo de pirólise	52
Tabela 13 - Análise Imediata do carvão ativado da poda de árvore e outros	54
Tabela 14 - Análise Elementar do carvão ativado da poda de árvore e outros.....	55
Tabela 15 - Parâmetros analíticos da água cinza bruta após processo de coagulação/floculação	58
Tabela 16 - Parâmetros analíticos da água decantada antes e após filtração em filtro de areia e carvão ativado	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. PROBLEMA DE PESQUISA.....	16
3. JUSTIFICATIVA	16
4. OBJETIVOS.	16
4.1. OBJETIVO GERAL	16
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
5.REVISÃO DE LITERATURA.....	17
5.1.Resíduos Sólidos Urbanos	17
5.2. Produção de poda de árvore no Tocantins	19
5.2.1. Destinação final desse resíduo	20
5.3. Processo de pirólise	21
5.3.1. Tipos de pirólise	22
5.3.2. Reator pirolítico	23
5.4. Produção de carvão ativado a partir da pirólise de resíduos da poda de árvore ..	23
5.5. Tratamento de efluente com carvão ativado	26
5.6. Reuso de águas cinzas	27
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	31
6.1. Tipos de resíduos e preparação de amostras.....	31
6.2. Caracterização da biomassa.....	33
6.2.1. Cinética de secagem da poda de árvore	33
6.2.2. Teor de umidade	33
6.2.3. Densidade aparente	33
6.2.4. Teor de cinzas	34
6.2.5. Material volátil.....	34
6.2.6. Carbono Fixo	34
6.2.7. Análise elementar – CHN	35

6.3. Preparo de briquetes da biomassa poda de árvore em pó	35
6.4. O reator pirolítico e o planejamento experimental	36
6.5. Caracterização química do carvão	38
6.5.1. Umidade.....	39
6.5.2. Teor de cinzas	39
6.5.3. Material volátil.....	39
6.5.4. Carbono fixo	39
6.5.5. Análise Elementar – CHN	39
6.5.6. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	39
6.6. Teste de Adsorção de Corantes em filtro de carvão	39
6.7. Remoção de poluentes de águas cinzas com filtro de areia e carvão	41
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
7.1. Caracterização da biomassa	45
7.1.1. Análise Imediata e Elementar da biomassa	45
7.1.2. Densidade aparente	47
7.1.3. Cinética de secagem	48
7.2. Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de resíduos da poda de árvore	49
7.3. Caracterização do carvão	54
7.3.1. Análise Imediata e Elementar do carvão	54
7.3.2. Microscopia Eletrônica do carvão ativado	56
7.4. Teste de adsorção de corante em filtro de carvão.....	56
7.5. Polimento do efluente em filtro de carvão e areia	58
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
9. REFERÊNCIAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem precioso, essencial para os seres vivos e recentemente vem se tornando vulnerável, com problemas de escassez e contaminação. Com isso, é necessária a aplicação de tecnologias para minimizar os impactos e controlar a qualidade da água (BUSS et al., 2015).

A água oriunda de lavagem de roupas representa 10 % aproximadamente de toda água consumida, sendo necessário o estudo desse efluente e formas de reutilizá-lo (MENEZES, 2005).

No Brasil, os resíduos sólidos urbanos apresentaram um aumento de 1% entre 2016 e 2017 e a região Norte apresentou uma geração de 15634 toneladas diárias com coleta de 81,27% destes resíduos (ABRELPE, 2017).

A urbanização acelerada na cidade de Palmas acaba favorecendo a geração de ainda mais resíduos. Na última década, a capital teve um acréscimo de 5,2 % da sua população, que contribuiu para um déficit na coleta e descarte desses materiais, contaminando efluentes e contribuindo para a proliferação de doenças e prejudicado a fauna e flora da região (CASTRO, 2008; MOURA e FERNANDEZ, 2012).

Um dos resíduos que vem crescendo no Tocantins é a poda de árvore, com estimativa de produção de 23 t/dia no ano de 2014 só na capital Palmas e muitas vezes apresenta uma destinação irregular, ocupando lixões e aterros sanitários (SILVA et al., 2009; RODRIGUES et al., 2015). A reutilização de poda de árvore podem trazer benefícios ambientais, além de promover um melhor gerenciamento deste resíduo (ANGELIS et al., 2007).

Para a produção de carvão ativado são necessários materiais carbonáceos, incluindo os resíduos de poda urbana, altamente lenhosos. A poda de árvore se mostra uma alternativa ampla, podendo ser aproveitada pela sua característica físico-química até mesmo sua capacidade tecnológica (CORTEZ, 2011; MARTINS, 2013).

A pirólise convencional, com temperaturas na faixa de 600 ° C e tempo de residência entre minutos e horas são ideais para se produzir o carvão. A pirólise de resíduos sólidos urbanos é utilizada para avaliar a temperatura, tempo de residência e a influência de catalisadores. Existem diversos tipos de reatores para pirólise da biomassa, sendo o reator em leito fixo o mais utilizado para produção de carvão, não necessitando de catalisadores (BRIDGWATER, 2011; PEDROZA 2014; PEDROZA et al., 2017).

Os carvões ativados podem ser empregados no tratamento de efluentes de lavanderias, pelo seu alto teor de adsorção e recomendado pra remoção de corantes, amenizar odores, remover sólidos coloidais e dissolvidos. Também pode ser aplicados para remover metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003; COELHO, 2008; PEDROZA et al., 2014).

Após o tratamento do efluente, a água pode ser reutilizada para descargas de vasos sanitários, irrigação de jardins e limpeza de pisos. A utilização potável ainda não é recomendada, pois muitas normas ainda não estão adequadas, oferecendo certo risco à saúde humana (BOYJOO, 2013; RAMPELOTTO, 2014).

Este trabalho tem como objetivo a reutilização das podas de árvores como fonte de produção de carvão ativado e tratar efluentes de lavanderias, principalmente a adsorção de corantes. Após o tratamento da água, serão analisados parâmetros para verificar a possibilidade do seu reuso.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

Quais as disposições finais das podas de árvores? O carvão proveniente das podas de árvores pode ser utilizado para tratamento de efluentes?

3. JUSTIFICATIVA

Este trabalho busca dar uma utilização para as podas de árvores, muitas vezes mal descartadas, ocupando aterros e outras vezes queimadas, favorecendo a poluição do ar. No âmbito das lavanderias, muitas empresas ainda não aderiram métodos de pós-tratamento, o que acaba gerando despejos cada vez menos sustentáveis. A pesquisa buscará transformar um resíduo (poda) em um produto com valoração (carvão ativado), eficiente na remoção de poluentes. A sociedade deve-se preocupar com o sistema sanitário, buscando meios de cuidar da água.

4. OBJETIVOS

4.1.OBJETIVO GERAL

Produzir carvão ativado visando aplicação no tratamento de águas cinzas em lavanderias, através da pirólise de resíduos sólidos urbanos (podas de árvores) da cidade de Palmas, Tocantins.

4.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a)Determinar as características químicas do resíduos sólidos urbanos (RSU) usado no experimento;
- b)Efetuar a pirólise de RSU com obtenção do modelo estatístico;
- c)Avaliar e caracterizar a fase sólida (carvão) produzida na reação de pirólise de RSU;
- d)Estudar a remoção de corantes (e outros poluentes) em filtro de adsorção empregando-se o carvão da pirólise;

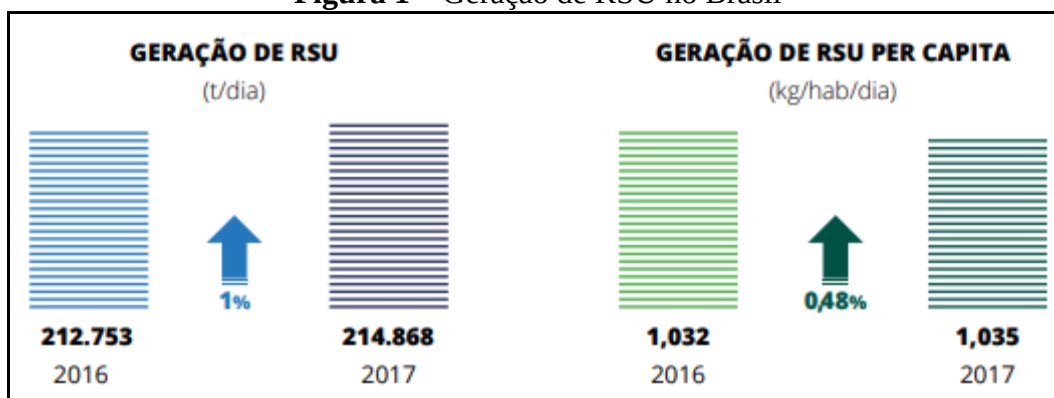
5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. Resíduos Sólidos Urbanos

A norma ABNT NBR 10004:2004 define os resíduos sólidos como qualquer resíduo oriundo de atividades industriais, domésticas, comerciais, hospitalares, agrícolas, de serviços e varrição, nos seus estados sólidos e semi-sólidos (ABNT, 2004). Os resíduos sólidos urbanos são quaisquer materiais gerados pela ação do homem em todo o âmbito urbano.

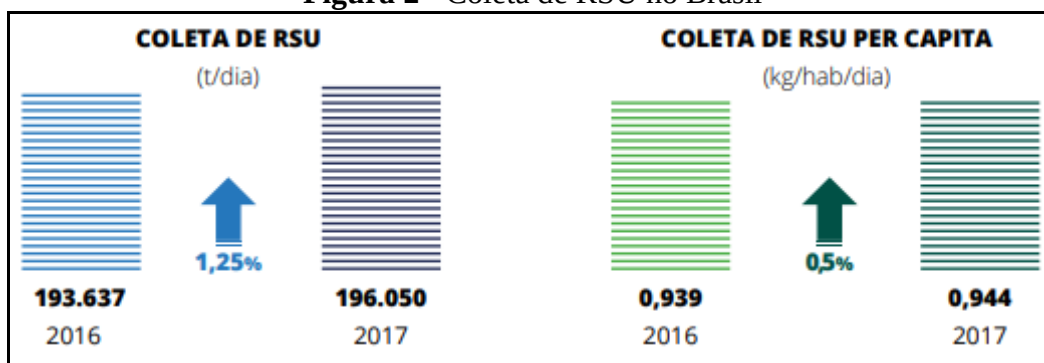
No Brasil, a população aumentou 0,75 % entre 2016 e 2017 e com isso, a quantidade de resíduos sólidos urbanos também incrementou, conforme Figura 1. A coleta deste resíduo cresceu em todas as regiões, mantendo um alcance nacional de 90% (ABRELPE, 2017). A Figura 2 retrata esta situação.

Figura 1 – Geração de RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE (2017).

Figura 2 - Coleta de RSU no Brasil

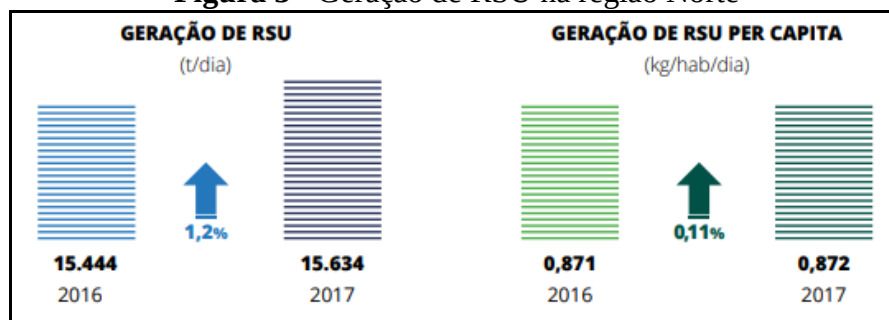


Fonte: ABRELPE (2017).

Na região Norte, entre 2016 e 2017, os municípios coletaram 81,27 % das 15634 toneladas de RSU produzidas diariamente. Destes resíduos coletados, apenas

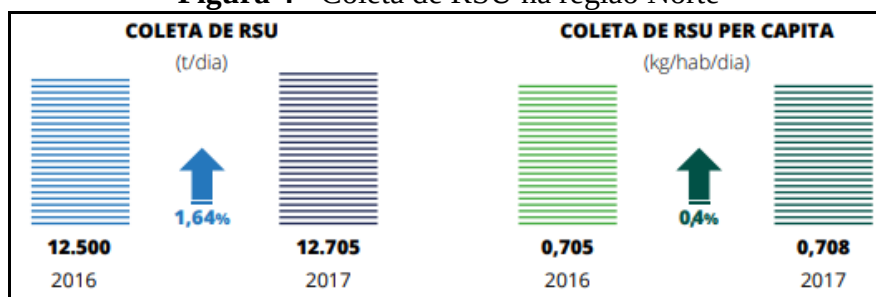
34,7 % foram encaminhados para aterros sanitários (ABRELPE, 2017). As Figuras 3, 4 e 5 representam a geração, coleta e disposição final do resíduo sólido urbano.

Figura 3 - Geração de RSU na região Norte



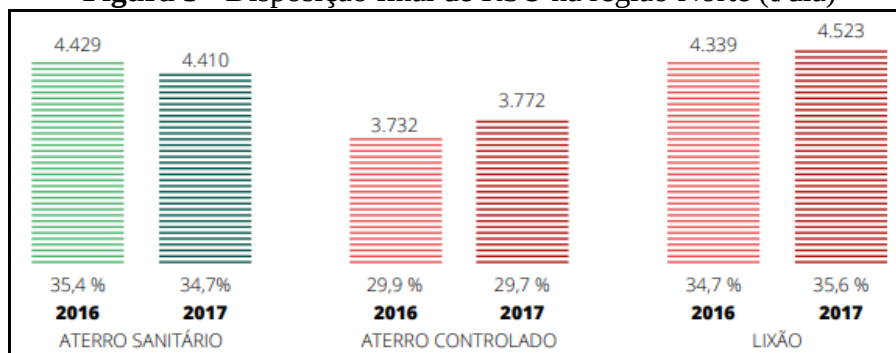
Fonte: ABRELPE (2017).

Figura 4 - Coleta de RSU na região Norte



Fonte: ABRELPE (2017).

Figura 5 - Disposição final de RSU na região Norte (t/dia)



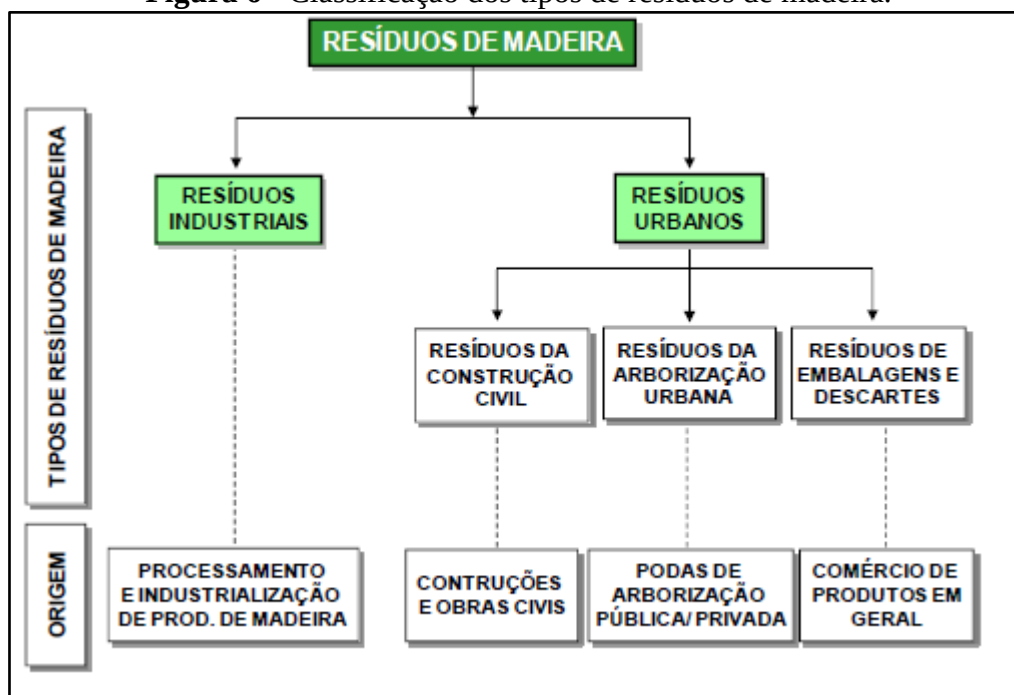
Fonte: ABRELPE (2017).

Dentre esses resíduos sólidos urbanos estão os resíduos de madeira. Eles podem ser subcaracterizados em industriais, derivados da serraria e compensado, da celulose e papel, de painéis de madeira e de móveis; e os urbanos.

Os resíduos de madeira urbanos são divididos (Figura 6) em resíduos da construção civil, destacados por tábuas, sarrafos e pontaletes, utilizados geralmente para formas e escoras; os resíduos da arborização urbana, citados através das podas e seus

galhos, raízes e gramas; e os resíduos de comércio de produtos, exemplificados por embalagens e caixas de madeiras. Estes resíduos apresentam uma dificuldade em se reciclar, geralmente por estarem contaminados com outros materiais ou por serem descartados em locais inadequados (BRASIL, 2009).

Figura 6 - Classificação dos tipos de resíduos de madeira.



Fonte: BRASIL (2009).

5.2. Produção de poda de árvore no Tocantins

As podas de árvores (Figura 7) são realizadas para a sua manutenção, devendo tomar cuidado para não comprometer a estrutura biológica da mesma. São obtidas folhas, galhos e ramos (ISA, 2013).

Para a capital, a produção vem crescendo no decorrer dos anos, com uma estimativa de 8396,16 t/ano e 23 t/dia (RODRIGUES, et al., 2015). É de responsabilidade das prefeituras de cada município realizar a poda das árvores. Caso as árvores entrem em contato com a rede de energia elétrica, a poda fica por conta da Energisa (PREFEITURA DE PALMAS, 2017).

Figura 7 - Poda de árvore



Fonte – Edu Fortes (2019).

5.2.1. Destinação final desse resíduo

Os resíduos sólidos derivados das podas de árvores são desprezados em sua maioria diretamente em aterros sanitários e em outra parte mal utilizados. Tais resíduos apresentam grande volume, não aceitando compactação, reduzindo a capacidade dos aterros e necessitando maiores custos de operação (SILVA et al., 2009). Também há a possibilidade de ocorrer incêndios derivados da má distribuição desses materiais (FERNANDES et al., 2001).

Em meio a essas situações, há medidas sendo tomadas para melhorar a utilização destes resíduos e minimizar o impacto ambiental. Segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins (PERS/TO, 2015), na capital Palmas os resíduos de podas são destinados ao aterro sanitário, onde são picados (Figura 8) e depois encaminhados ao viveiro municipal para serem compostados. As podas também estão sendo utilizadas como adubos orgânicos.

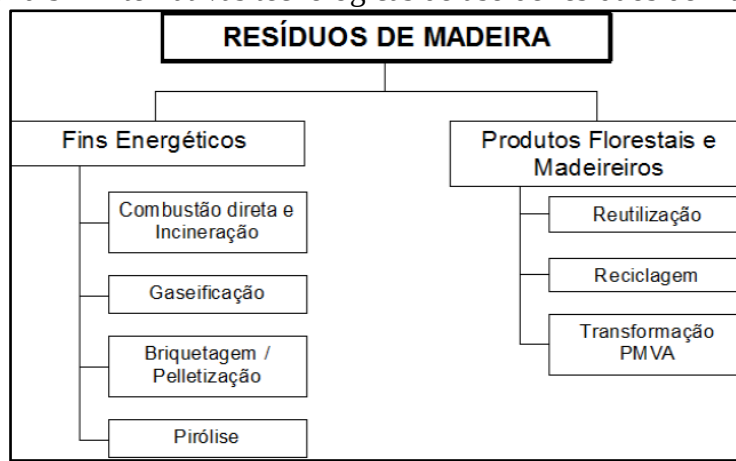
Figura 8 - Depósito de podas trituradas em aterro sanitário



Fonte: PERS/TO (2015).

Os resíduos de madeira como a poda de árvore apresentam duas finalidades: matéria prima para produtos e para fins energéticos (Figura 9). A primeira envolve a reutilização de pequenos objetos de madeira, assim como a reciclagem orgânica. A segunda aborda etapas físicas como briquetagem e peletização; processos termoquímicos como a combustão, incineração, gaseificação e pirólise; e processos biológicos como digestão anaeróbia (CORTEZ, 2011).

Figura 9 - Alternativas tecnológicas de uso de resíduos de madeira



Fonte: BRASIL (2009).

5.3. Processo de pirólise

A pirólise é uma decomposição térmica da biomassa em gás, líquido e sólido. Ela ocorre na ausência total de oxigênio, exceto nos casos em que a combustão parcial é permitida para fornecer a energia térmica necessária para este processo. Nela, grandes moléculas de hidrocarbonetos da biomassa são decompostas em menores moléculas (BASU, 2010).

Bridgwater (2011) demonstra que temperaturas de processamento mais baixas e tempos de residência mais longos favorecem a produção de carvão vegetal. Altas temperaturas e tempos de residência longos aumentam a conversão da biomassa para gás e temperaturas moderadas e tempos de residência curtos são ideais para produzir líquidos.

O teor de carbono do carvão aumenta a temperaturas de pirólise mais altas. Em média, o conteúdo de massa de oxigênio e hidrogênio é de 10,0 e 1,5%, respectivamente, a 700 ° C em uma base livre de cinzas secas (ANCA-COUCÉ, 2016).

5.3.1. Tipos de pirólise

Os processos de pirólise são classificados de acordo com seu tempo de residência, temperatura de processo, taxa de aquecimento e seus produtos finais (VIEIRA, 2004). A Tabela 1 demonstra as principais variantes.

Tabela 1 - Variantes do processo pirolítico

Variantes do processo	Tempo de Residência	Temperatura do processo, °C	Principais produtos obtidos
Carbonização	Horas/dias	400-450	carvão vegetal
convencional	5 - 30 min	até 600	bio-óleo, carvão e gás
rápida	0,5 - 5 seg	500-550	bio-óleo
flash-líquido	< 1 seg	<650	bio-óleo
flash-gás	< 1 seg	>650	gás combustível
vácuo	2 - 30 seg	400	bio-óleo
metano-pirólise	< 10 seg	>700	produtos químicos
hidro-pirólise	< 10 seg	<500	bio-óleo e produtos químicos

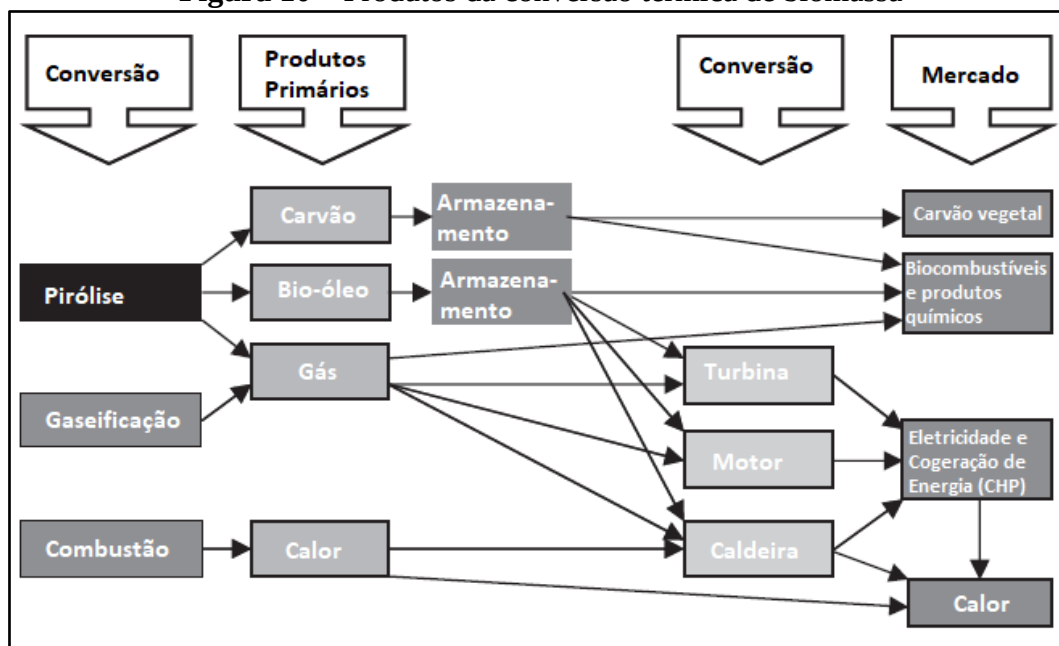
Fonte: Pedroza (2014).

Basicamente, elas podem ser categorizadas entre pirólise rápida e convencional. A pirólise rápida, que visa maximizar o rendimento de bio-óleo, é promovida pelo rápido aquecimento da biomassa a temperaturas próximas de 500 ° C e a rápida remoção dos vapores condensáveis (tempo de residência do vapor de alguns segundos) para prevenir futuras rachaduras e polimerização. Para permitir a rápida degradação da biomassa, pequenas partículas (<5 mm) são normalmente necessárias para permitir a penetração rápida do calor na partícula (NACHENIUS, 2013).

Já a pirólise lenta, visando um rendimento máximo do produto sólido, requer taxas de aquecimento mais baixas ou tempos de residência mais longos. O pico de temperatura de reação e o tempo de reação sólido têm uma influência significativa no rendimento e na qualidade do produto sólido (NACHENIUS, 2013).

Uma característica importante da pirólise é que os resíduos podem ser reaproveitados e suas condições de aproveitamento podem ser melhoradas para aumentar a produção de diversos subprodutos, como gases, óleos e carvões. Embora os rendimentos sejam importantes para a economia global do processo, também deve ser dada atenção à qualidade dos produtos (DOMINGUEZ, 2005; NACHENIUS, 2013). A Figura 10 mostra as principais técnicas de conversão e seus possíveis produtos.

Figura 10 – Produtos da conversão térmica de biomassa



Fonte: Bridgwater (2011).

Durante a pirólise, há um aumento na aromaticidade e uma redução nos grupos funcionais contendo oxigênio. A densidade de energia aumenta e o material se torna hidrofóbico (ANCA-COUCÉ, 2016).

5.3.2. Reator pirolítico

Vários tipos de reatores de pirólise de biomassa foram relatados na literatura: leito fixo, leito fluidizado, vortex e reatores a vácuo (PEDROZA, 2014). O reator de leito fixo será responsável por remover o material diluído em um fluido, através de colunas ou filtros que incluirão o sólido adsorvente (carvão) estacional (VOLTAN et al., 2016).

5.4. Produção de carvão ativado a partir da pirólise de resíduos da poda de árvore

A seleção de um adsorvente adequado para uma determinada separação é um problema complexo, devendo se considerar predominantemente a isoterma de equilíbrio e secundariamente a taxa de difusão. Os principais adsorventes disponíveis no mercado são: o carvão ativado, zeólitos, sílica-gel e alumina ativada (YANG, 2003).

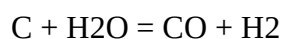
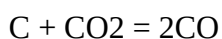
A obtenção do carvão através dos resíduos sólidos urbanos ocorre por pirólise. A desidratação térmica é em ambiente fechado, com temperatura até 800 °C, e

sem a presença de oxigênio, concentrando o carbono, reduzindo o seu volume; expandindo e retraindo os poros, ou até em ambiente com pouca quantidade de oxigênio, impedindo a gaseificação em excesso do organismo. Por tal razão, não ocorre a queima do resíduo, mas sim uma desidratação do material, tornando o mais escuro. Este processo ocorre em um ambiente úmido, impedindo a corrosão dos equipamentos e permitindo a obtenção de outros materiais, como lignina, óleo vegetal, alcatrão e água ácida (CORTEZ, 2011; PEDROZA, 2011; VOLOCH, 2012).

A área de superfície máxima é geralmente observada em temperaturas na faixa de 600° C a 800° C, com valores superiores a 300 m²/g. Em baixas temperaturas de aquecimento, a estrutura interna do carvão não é modificada abruptamente, onde a porosidade natural permite a liberação de voláteis e não há maior mudança de morfologia. No entanto, em altas temperaturas de aquecimento, a estrutura celular original é perdida, pois ela se derrete completamente (ANCA-COUCÉ, 2016).

O carvão ativado é uma forma de carbono alterada para incrementar suas propriedades de adsorção e aumentar sua porosidade interna. Segundo Ahmaruzzaman e Sharma (2005), apresenta uma boa microporosidade (Figura 11) e com isso, uma grande área de superfície, porém a utilização dos poros na reação/interação da superfície é ruim. As tentativas de melhorar a superfície e a porosidade do carvão através de diferentes processos de conversão, como a oxidação, a pirólise e a extração de solvente, sejam combinadas ou de forma separada, acabam por trazer resultados ainda melhores na pesquisa sobre adsorção.

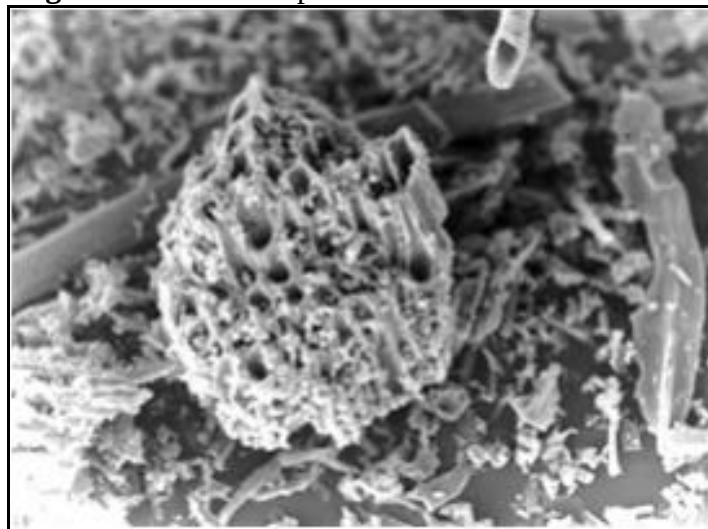
A ativação do carvão ativado pode ocorrer fisicamente ou quimicamente. A adsorção física está intrinsecamente relacionada às forças de Van der Waals. As modificações em um carbono, após a sua produção, fazem uso de dois agentes gaseificadores: dióxido de carbono e vapor d'água, juntos ou separados. Estes agentes “extraem” átomos de carbono da estrutura. As equações a seguir representam estes processos endotérmicos: (CENDOFANTI, 2005; MARSH e RODRÍGUEZ-REINOSO, 2006).



Já para a ativação química, modificações são realizadas no processo de carbonização com a adição de materiais como ácido fosfórico (H₃PO₄), cloreto de zinco (ZnCl₂), hidróxido de potássio (KOH) e carbonato de potássio (K₂CO₃). Com

isso, ocorre uma troca de elétrons entre o adsorvato e o adsorvente e a remoção do material por extração, destacando os poros (NARSIN et al., 2000; CENDOFANTI, 2005; MARSH e RODRÍGUEZ-REINOSO, 2006).

Figura 11 - Microscopia eletrônica do carvão ativado



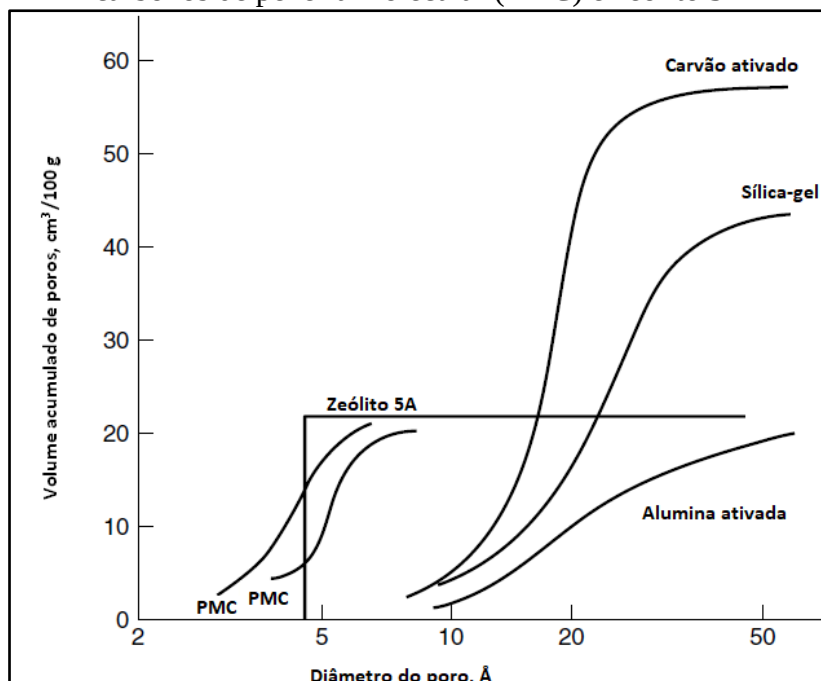
Fonte: Cendofanti (2005).

Yang (2003) diz que a propriedade de superfície única do carvão ativado é apolar ou ligeiramente apolar, derivado dos grupos de óxidos da superfície e impurezas orgânicas. Tal propriedade confere ao carvão ativado algumas vantagens como:

- ♦ É o único adsorvente comercial usado para realizar processos de separação e purificação sem requerer a remoção rigorosa prévia da umidade, como é necessário na purificação do ar. Pela mesma razão, é também amplamente utilizado como adsorvente para processos de tratamento de soluções aquosas.
- ♦ Por causa de sua superfície interna grande e acessível (e grande volume de poros), ela absorve mais moléculas orgânicas não polares e fracamente polares do que outros adsorventes.
- ♦ O calor de adsorção, ou força de adesão, é geralmente menor no carvão ativado do que em outros adsorventes. Isso ocorre porque apenas as forças de Van der Waals estão disponíveis como as principais forças de adsorção. Consequentemente, a remoção das moléculas adsorvidas é relativamente mais fácil e resulta em requisitos de energia relativamente baixos para a regeneração do adsorvente.

A Figura 12 compara o tamanho dos poros dos principais adsorventes disponíveis no mercado com o volume acumulado.

Figura 12 - Tamanho de poros para carvão ativado, sílica gel, alumina ativada, carbonos de peneira molecular (PMC) e zeólito 5A



Fonte: Yang (2003).

5.5. Tratamento de efluente com carvão ativado

Antigamente, a toxicidade dos efluentes era determinada pela detecção de efeitos biológicos da poluição, grandes volumes de espuma ou a coloração intensa dos rios próximos. Hoje, a identificação e classificação dos efluentes estão de acordo com normas e regulamentos municipais. Tais regras definem substâncias mais importantes que devem ser controladas e propõem um conjunto de atividades que devem ser instauradas para minimizar tais quantidades (SREBRENKOSKA et al., 2014).

A Resolução CONAMA 430 apresenta parâmetros e condições para lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora e também oriundos do Sistema de Esgoto Sanitário, além de diretrizes para gestão de efluentes e complementando e alterando a resolução de 357 de 2005 (CONAMA, 2011).

Segundo essa resolução, os efluentes do Sistema de Esgoto Sanitário devem atender as seguintes condições:

- 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 Imhoff.
- d) Demanda Bioquímica de Oxigênio-DBO 5 dias, 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 e;
- f) ausência de materiais flutuantes.

A qualidade do efluente de uma lavanderia é variável, pois ela depende do tipo de máquina de lavar a ser usada, a marca e a quantidade de detergente a ser utilizada e o nível de limpeza das roupas a serem lavadas. As águas cinza de lavanderias são alcalinas, e apresentam altos níveis de salinidade, altas concentrações de sódio e sólidos suspensos. Também podem conter coliformes fecais em excesso (HOWARD, et al. 2005).

Segundo Stephen et al. (2005), o efluente de uma lavadeira apresenta alta concentração de corantes, o que gera uma preocupação significativa com o seu lançamento, já que a sua capacidade de absorver e refletir a luz do sol irá interferir no crescimento de bactérias a níveis que são insuficientes para degradar biologicamente as impurezas na água. Dallago (2005) acrescenta que a presença de corantes causará poluição visual, assim como dano grave para a fauna e flora do ambiente, alterando a biota aquática e elevando os índices de toxicidade aguda e crônica do ecossistema.

Segundo Sostar-Turk et al. (2005), os sistemas mais amplamente utilizados para os efluentes de lavanderias são os métodos convencionais, como: precipitação/coagulação e floculação, sedimentação e filtração, ou uma combinação de ambos. A aplicação da adsorção do carvão ativado após o processo de floculação pode melhorar o tratamento, uma vez que a grande área de superfície permite a melhor adsorção dos componentes. No entanto, o tipo de corante irá influenciar no nível de remoção da cor (FARIA et al., 2004).

5.6.Reuso de águas cinzas

As águas cinzas podem ser remetidas a águas residuais domésticas não tratadas que não entraram em contato com o esgoto (ALLEN et al., 2010). São

consideradas efluentes geradas por chuveiros, lavatórios e máquinas de lavar roupas (RAMPELOTTO, 2014), conforme Tabela 2.

O uso doméstico da água varia entre os países dependendo da localização geográfica, infraestrutura, padrões de vida, costumes e hábitos, entre outros, e com isso, a geração de água cinza varia muito. Por tal razão, entre 46 a 91 % da água doméstica é transformada em água cinza (BOYJOO et al. 2013).

Os efluentes de lavanderias industriais envolvem águas cinzas oriundas de processos de lavagem em ampla escala de diversas empresas e segmentos como metalúrgicas, laboratórios, hotéis, restaurantes e hospitais.

Tabela 2 - Possíveis contaminantes da água cinza por fonte produtora

Fonte de água cinza	Possíveis conteúdos
Máquina de lavar roupas	Sólidos suspensos (sujeira, fiapos), material orgânico, óleo e graxa, sódio, nitratos e fosfatos (detergentes), aumento de salinidade e Ph, alvejante.
Máquina de lavar louças	Material orgânico e sólidos suspensos (alimentos), bactérias, aumento da salinidade e pH, gorduras, óleos e graxas, detergentes.
Banheira e chuveiro	Bactérias, cabelos, material orgânico e sólidos suspensos (pele, partículas, fiapos), óleo e graxa, sabão e resíduos de detergentes.
Pias, incluindo cozinha	Bactérias, matéria orgânica e sólidos suspensos (partículas de alimentos), resíduos de gordura, óleo e graxa, sabão e detergente.

Fonte: WHO-ROEM (2006).

As principais técnicas de tratamento de águas cinzas podem ser divididas em físicas, químicas e biológicas. Uma vantagem é que é possível escolher o melhor método, para um melhor reaproveitamento, sendo destacados tratamentos com baixo consumo de energia e pouca adição química (RAMPELOTTO, 2014).

Os tratamentos físicos incluem os filtros de areia grossa e filtração com membranas. Os principais tratamentos químicos conhecidos são: coagulação, oxidação fotocatalítica, troca iônica e carvão ativado granular (LI et al., 2009). Estes processos são eficientes para remover tensoativos e materiais orgânicos (KNUPP, 2013; BUSS, 2015).

O filtro de areia combinado com o carvão ativado e um processo de desinfecção vêm sendo utilizado para o tratamento de água cinza, mas não mostrou uma melhora significativa para os resíduos sólidos suspensos (48% de remoção) e turbidez

(61% de remoção). Porém, remoções eficientes de microorganismos foram relatadas (LI et al., 2009).

Os tratamentos biológicos incluem filtros de membrana para remover contaminantes, bactérias e vírus, juntamente com tratamento biológico aeróbico. O tratamento biológico aeróbico envolve aeração para aumentar o oxigênio dissolvido e ativar as bactérias presentes na água cinza para consumir o oxigênio e digerir os contaminantes orgânicos. Um método comum de tratamento biológico aeróbico utiliza um reator biológico de contato (RBC) apresentando discos rotativos que fornecem o oxigênio para o meio (MAY, 2009; ALLEN et al., 2010). A Tabela 3 demonstra as principais técnicas de tratamento, suas vantagens e desvantagens.

Tabela 3 - Tecnologias empregadas para tratamento de águas cinzas

Técnica de tratamento	Descrição	Prós	Contras
Desinfecção	Cloro, ozônio ou luz ultravioleta podem ser utilizados para desinfetar a água cinza.	Altamente eficaz em matar bactérias se projetado e operado corretamente, facilidade de operação.	Cloro e ozônio podem criar subprodutos tóxicos, ozônio e UV podem ser afetados por variações do conteúdo orgânico da água cinza.
Filtro de carvão ativado	O carvão ativado é tratado com oxigênio para abrir milhões de microporos entre os átomos de carbono, resultando em alta porosidade e áreas de superfície entre 300 e 2000 m ² /g. São utilizados para adsorver odor ou corantes.	Operação simples, o carvão ativado é particularmente bom em aprisionar produtos químicos orgânicos, bem como compostos inorgânicos como o cloro.	Alto custo de capital, muitos outros produtos químicos não são atraídos pelo carbono – sódio, nitratos, etc. O carvão irá remover algumas impurezas. Uma vez que se os locais de ligação estiverem cheios, o filtro de carvão ativado irá parar de funcionar.
Filtro de areia	Leitos de areia e em alguns casos, casca grossa ou palhas prendem e absorvem contaminantes a medida que a água cinza flui através deles.	Operação simples, baixa manutenção e baixos custos de operação.	Alto custo de capital, reduz patógenos, mas não os elimina. Sujeito a entupimento e inundação se sobrecarregado.
Tratamento biológico aeróbio	O ar é borbulhado para transferir oxigênio do ar para a água cinza. Bactérias presentes consomem o oxigênio dissolvido, digerindo e reduzindo a concentração dos contaminantes orgânicos.	Alto grau de flexibilidade de operações para acomodar as águas cinzas de qualidades e quantidades variadas, permitindo o armazenamento por tempo indeterminado da água tratada.	Alto custo de capital, alto custo de operação, requisitos operacionais complexos, não remove todos os patógenos.
Biorreator de membrana	Utiliza-se do tratamento biológico aeróbico e da filtração para incentivar o consumo de contaminantes orgânicos e filtração de todos os patógenos.	Muito eficaz se projetado e operado corretamente, alta flexibilidade de operações para acomodar as águas cinzas de qualidades e quantidades variadas, permitindo o armazenamento por tempo indeterminado da água tratada.	Alto custo de capital, alto custo de operação, requisitos operacionais complexos.

Fonte: ALLEN et al. (2010).

A reutilização da água cinza é recomendada para tarefas que não requerem padrões de qualidade potável, sendo mais utilizada para descarga de vasos sanitários,

irrigação de jardins e limpeza de pisos. Assim, o potencial de economia de água varia entre 9 e 46 % (BOYJOO et al., 2013).

Rampelotto (2014) utilizou um processo de tratamento das águas cinzas derivadas de máquinas de lavar roupas por filtração. Para isso, foram realizados ensaios de bancada, responsáveis por avaliar a tratabilidade da água; processos de coagulação, floculação, flotação e filtração por meio granular, através de filtros de laboratório de carvão ativado granular.

No primeiro ciclo de lavagem das máquinas de lavar roupas, foram observadas concentrações significativas de cor aparente. O pH se mostrou básico pela presença de produtos químicos. Na medida em que se realizava o 1º e 2º enxague, o pH foi se aproximando de 7,0 (MAY, 2009).

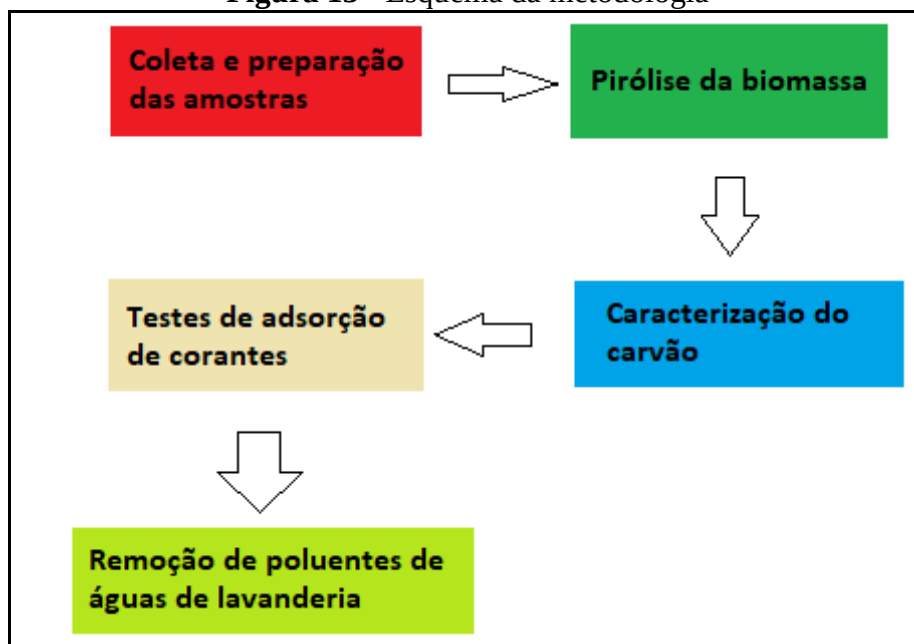
Rampelotto (2014) recomenda que o uso das águas cinzas devem ser restringidas ao uso não-potável, pois não há normas técnicas adequadas para o reuso, podendo causar risco para a saúde dos usuários.

Uma questão que limita a adoção em larga escala de tecnologias de água cinza é que seu custo capital inicial pode ser alto em relação ao custo da água. Como a água é impropriamente precificada em muitas partes do mundo, há pouco incentivo para conservar o seu uso (ALLEN et al., 2010).

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo foi possível a partir da coleta de amostras e realização de experimentos, com sua devida interpretação e comparação. Desenvolveram-se estratégias para implementação da pesquisa. A Figura 13 apresenta um esquema das principais etapas realizadas para obtenção dos resultados:

Figura 13 - Esquema da metodologia



Fonte: O autor (2019).

6.1. Tipos de resíduos e preparação de amostras

Neste trabalho foram utilizados resíduos da arborização urbana, como podas e folhas de árvores, obtendo-se bio-óleo e carvão.

As amostras foram coletadas nas proximidades do Instituto Federal do Tocantins (IFTO) (Figura 14), armazenadas em caixas organizadoras de plástico e sendo posteriormente levadas para o Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), no IFTO (Campus Palmas).

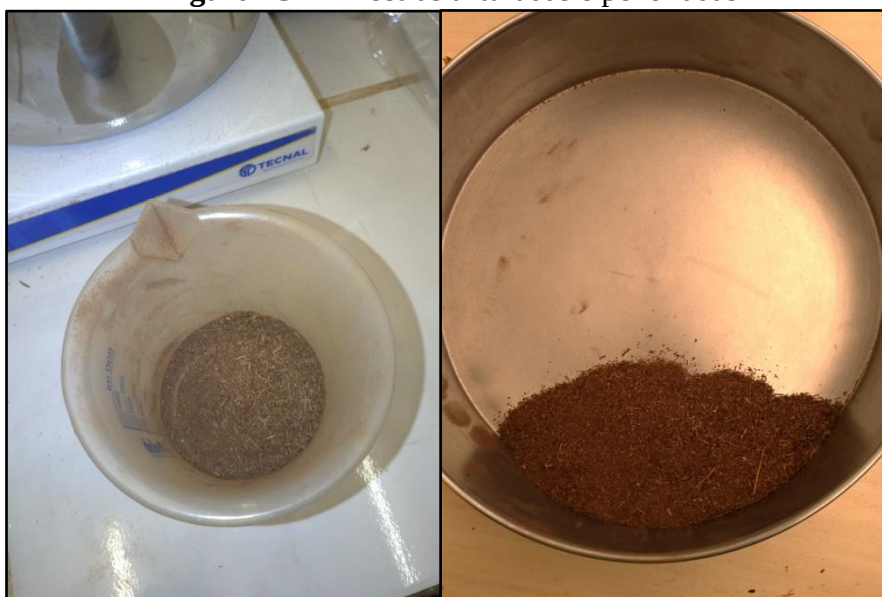
Figura 14 - Podas de árvores coletadas no IFTO



Fonte: O autor (2019).

Elas foram preparadas a partir da secagem, realizada em uma estufa de marca SOLAB, modelo SL-100, a 60° C por um período de 24 horas, no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), no IFTO (Campus Palmas). Posteriormente, as amostras foram trituradas com o auxílio de um liquidificador, de modo a garantir a homogeneidade da biomassa e otimizar os procedimentos analíticos. Por último, elas foram peneiradas em peneiras série ABNT 30/TYLER 28 com abertura de 0,850 mm (Figura 15).

Figura 15 - Amostras trituradas e peneiradas



Fonte: O autor (2019).

6.2.Caracterização da biomassa

A caracterização da biomassa tem como objetivo obter informações sobre suas propriedades, e assim obter uma melhor efetividade na sua aplicação. Para caracterização, serão aplicadas algumas variáveis analíticas, como: umidade (Método ASTM D 3173-85), cinzas (Método ASTM D 2145-66), material volátil, densidade aparente, cinética de secagem, carbono fixo; assim como análises elementares, nas dependências da LARSEN.

Durante a caracterização da biomassa, foram obtidos dados que justifiquem a aplicabilidade da poda de árvore nas técnicas termogravimétricas, com o emprego da pirólise rápida para obtenção de carvão ativado e outros subprodutos.

6.2.1. Cinética de secagem da poda de árvore

A cinética de secagem, realizada em triplicatas, foi obtida após pesagem das amostras em temperaturas de 50°. No final dos procedimentos de secagem, foram determinados os pesos secos, as proporções de umidade das amostras e as curvas da razão de umidade como função do tempo de secagem. Com isso, os materiais voláteis existentes e a perda de água na composição da poda de árvore *in natura* são comparados.

6.2.2. Teor de umidade

A determinação do teor de umidade da poda de árvore foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3173-85. Para isso, foi utilizado um analisador de umidade da marca SHIMADZU, de modelo MOC63u. A biomassa foi carregada no prato de pesagem do equipamento e aquecida em temperatura aproximada de 100 °C por 1 minuto. O teor de umidade é mostrado no visor do aparelho. O ensaio foi realizado em triplicatas e depois se tirou a média dos resultados.

6.2.3. Densidade aparente

A determinação da densidade aparente foi realizada com o auxílio de uma balança de precisão e uma proveta de 100 ml. Após tarar-se adequadamente a balança, foram adicionadas sucessivamente volumes da biomassa de poda de árvore, secas e na forma de pó, em quantidades de 20, 40, 60, 80 e 100 ml, e obtendo-se suas respectivas massas (g). A densidade foi calculada então com a seguinte equação:

$$\text{Densidade} \left(\frac{g}{mL} \right) = \left[\frac{m(g)}{V(mL)} \right] \quad (\text{Equação.1})$$

6.2.4. Teor de cinzas

Para determinação do teor de cinzas, foi adicionado aproximadamente 1 g de poda de árvore seca em três cadinhos de porcelana. As amostras foram calcinadas a uma temperatura de 815 °C em forno mufla da marca EDG Equipamentos – modelo W One, durante 30 minutos. Após o procedimento, as amostras foram esfriadas em um dessecador por 1 hora e depois pesadas. O teor de cinzas foi calculado a partir da equação 2, que relaciona o peso da biomassa e do cadinho:

$$\text{Teor de Cinzas (\%)} = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação.2})$$

Onde

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \text{peso do cadinho} + \text{peso amostra após calcinação} \\ B = \text{peso do cadinho vazio} \\ C = \text{peso da amostra} \end{array} \right.$$

6.2.5. Material volátil

O teor material volátil foi determinado a partir da adição de 1g da biomassa de poda de árvore em cadinhos de porcelana, realizada em triplicatas. As amostras foram aquecidas a uma temperatura de 915 °C em forno mufla, sem a presença de oxigênio por 30 minutos. O teor de material volátil foi calculado a partir da equação:

$$\text{Material Volátil (\%)} = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad (\text{Equação.3})$$

Onde

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \text{peso do cadinho vazio} + \text{peso da amostra} \\ B = \text{peso do cadinho} + \text{peso amostra pós-aquecimento em forno mufla} \\ C = \text{peso da amostra} \end{array} \right.$$

6.2.6. Carbono Fixo

O carbono fixo é a porção de carvão que permanece como resíduo após o material volátil ser destilado, e a soma da umidade e do teor de cinzas no carvão é subtraída. Isso representa o carbono sólido na biomassa que permanece no carvão no processo de pirólise após a devolatilização. É essencialmente carbono, mas contém uma

quantidade menor de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre que não é expelida pelos gases (BASU, 2010; SARKAR, 2015).

O teor de carbono fixo é calculado indiretamente, a partir do teor de cinzas e de material volátil, de acordo com a equação:

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

6.2.7. Análise elementar – CHN

Para determinação do teor de carbono, hidrogênio e nitrogênio da poda de árvore, a amostra foi avaliada em um analisador elementar Perkin – Elmer CHNS/O 2400 series II, através do método de ignição. Os ensaios foram realizados em concordância com a norma ASTM D 5373 (ASTM, 2002).

6.3.Preparo de briquetes da biomassa poda de árvore em pó

Os briquetes foram fabricados com uma granulometria de 0,850 mm. Para o experimento, foi considerado volume de biomassa de 350 ml do resíduo seco. Foi pesado com uma balança analítica, obtendo-se valor aproximado de 124 g. Posteriormente, foram introduzidos 80 ml de água destilada para hidratação da amostra (Figura 16). A biomassa ficou em repouso por 30 minutos. Outros briquetes foram fabricados para atender a ordem dos ensaios.

Figura 16 – Biomassa hidratada



Fonte: O autor (2019).

Foi utilizada uma tubulação de 20 cm e 32 mm de diâmetro para dar o devido formato cilíndrico ao briquete. Os briquetes foram secos em uma estufa a 40°C por 24 horas. Foram obtidos briquetes para cada experimento, com massas aproximadas entre 30 e 40 gramas (Figura 17).

Figura 17 - Briquete hidratado e seco

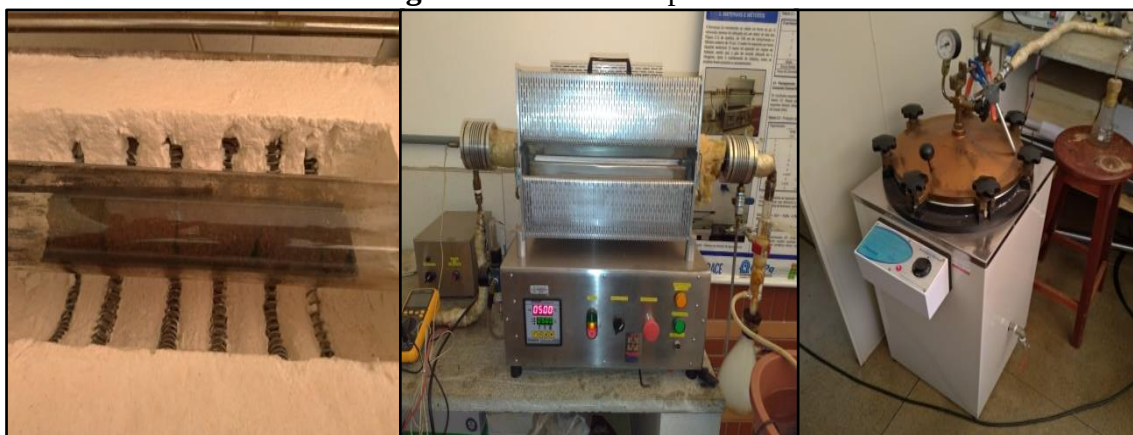


Fonte: O autor (2019).

6.4.O reator pirolítico e o planejamento experimental

A pirólise foi efetuada em um reator de leito fixo de aço inox, com 100 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro externo, com biomassa introduzida em forma de pó. Ela permaneceu por 30 minutos, sendo operada em regime de batelada, com o arraste por vapor d'água (Figura 18). O aquecimento do reator foi realizado em diferentes temperaturas (360°, 400°, 500°, 600° e 640°C), com a ajuda de um forno bipartido reclinável.

Figura 18 - Reator de pirólise



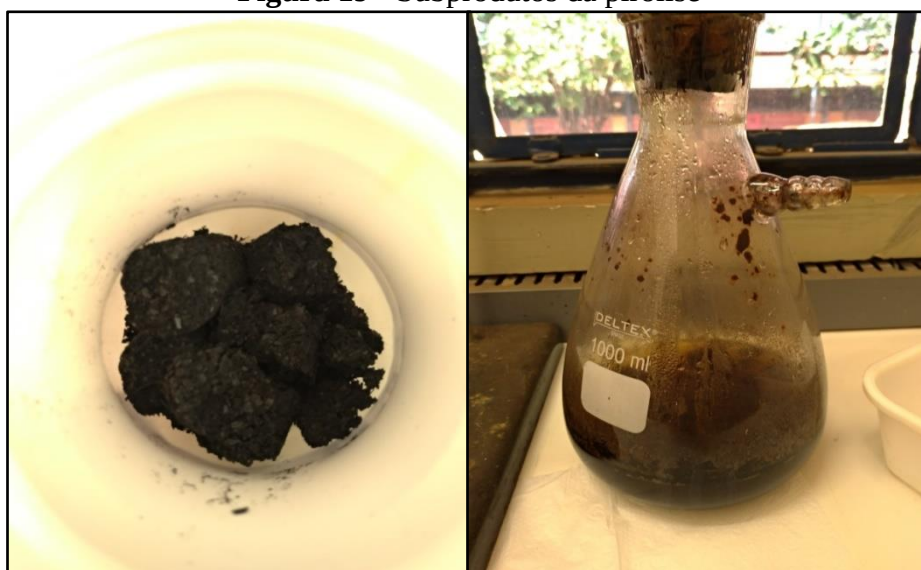
Fonte: O autor (2019).

O efeito dos fatores de temperatura de pirólise e taxa de aquecimento do reator foram analisados através de planejamento multivariável (2²). Através desses

resultados, foi definido um modelo estatístico para a produção de carvão no processo, com auxílio do software STATISTICA. Após a reação e o arrefecimento do equipamento, os produtos foram coletados e pesados, para o balanço de massa. O material sólido foi coletado diretamente do reator.

A Figura 19 mostra os subprodutos resultantes do processo pirólítico: carvão e bio-óleo.

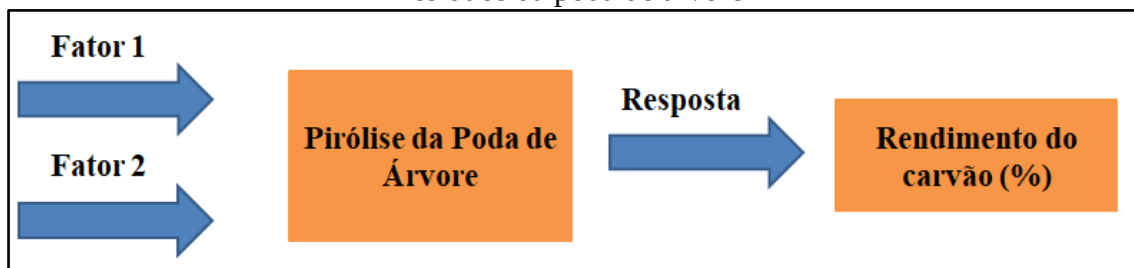
Figura 19 - Subprodutos da pirólise



Fonte: O autor (2019).

O rendimento de carvão foi determinado a partir do planejamento multivariável experimental fatorial da ordem de 2^2 - Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Foram considerados 11 experimentos de pirólise em reator de leito fixo tubular, sendo 3 experimentos no ponto central. Os fatores aplicados foram a Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e a Taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$). A Figura 20 demonstra a representação do planejamento experimental.

Figura 20 - Representação do planejamento experimental empregado na pirólise de resíduos da poda de árvore



Fonte: Autor (2019)

Conforme verificado, a aplicação deste planejamento avalia os impactos que os fatores proporcionam nos resultados, diminuindo assim o número de experimentos, consequentemente reduzindo os custos e o tempo de produção. Foram realizados de acordo com os fatores e níveis da Tabela 4 e a ordem dos experimentos da Tabela 5.

Tabela 4 - Fatores e níveis empregados no planejamento experimental 2²

Fatores	Níveis				
	(-1,41)	(-1)	0	(+1)	(+1,41)
Temperatura do processo (°C)	360	400	500	600	640
Taxa de aquecimento (°C/min)	13	15	20	25	27

Fonte: O autor (2019)

Tabela 5 - Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial 2²

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	Temperatura	Taxa de aquecimento
	(°C)	(°C/min)
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1,41	0
6	1,41	0
7	0	-1,41
8	0	1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: O autor (2019)

6.5.Caracterização química do carvão

O carvão foi caracterizado através dos seguintes métodos: Análise Imediata, Análise Elementar, Índice de azul de metileno e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A Análise Imediata seguiu parâmetros normativos: NBR 8293/83, NBR 8289/83, NBR 8290/83, ASTM D 3172/89 para análise da umidade, do teor de cinzas, material volátil e teor de carbono, respectivamente. Foi observado o percentual em massa do carbono assim como outros materiais, como nitrogênio e hidrogênio (FALLAVENA, 2011).

6.5.1. Umidade

A determinação do teor de umidade do carvão foi realizada de acordo com o item 6.2.2., seguindo a norma ASTM D 3173-85.

6.5.2. Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado a partir do item 6.2.4.

6.5.3. Material volátil

O teor de material volátil foi verificado a partir do item 6.2.5.

6.5.4. Carbono fixo

O teor de carbono fixo foi realizado de acordo com o item 6.2.6.

6.5.5. Análise Elementar – CHN

A análise elementar do carvão foi determinada a partir do item 6.2.7., obtendo-se o teor de carbono, hidrogênio e nitrogênio.

6.5.6. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A morfologia da biomassa, além do tamanho dos poros e sua distribuição, a presença de nervuras ou irregularidades, foram identificadas e verificadas com o auxílio de um equipamento de caracterização, de marca Hitachi e modelo TM3000.

6.6. Teste de Adsorção de Corantes em filtro de carvão

O teste de adsorção de corantes foi realizado em filtro descendente com pedregulho, areia e carvão da pirólise de resíduos da poda de árvore. Foram analisadas as variáveis de processo: tempo, granulometria do carvão e concentração do corante sintético. Foi investigada a remoção de corantes presentes em efluentes industriais, com o tratamento químico prévio do efluente antes da filtração.

Foi aplicado o experimento de fluxo contínuo, com uma solução de corante a uma concentração de 20 mg/L com pH ajustado a 7,0. Foi adotado um sistema de filtração constituído de: (a) reservatório inferior de 50 litros, (b) reservatório superior de 20 litros com sistema de drenos e (c) filtro de carvão e areia (Figura 21).

Figura 21 - Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore



Fonte: O autor (2019).

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 (Figura 22). No reservatório superior existiram 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 foram: 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 carvãoO. A alimentação foi mantida a uma vazão média de 300 mL/h.

Figura 22 - Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore



Fonte: O autor (2019).

Foi medida com um espectrofotômetro de duplo feixe (PERKIN ELMER, LAMBDA 750) em 650 nm, a adsorção da solução do corante (Figura 23). O processo foi acompanhado de uma curva de calibração externa, construída pela observação de soluções iguais a: 1, 2, 3, 4 e 5 mg/l, através da solução inicial de azul de metileno.

Figura 23 - Análise espectrofotométrica do corante após sistema de filtração

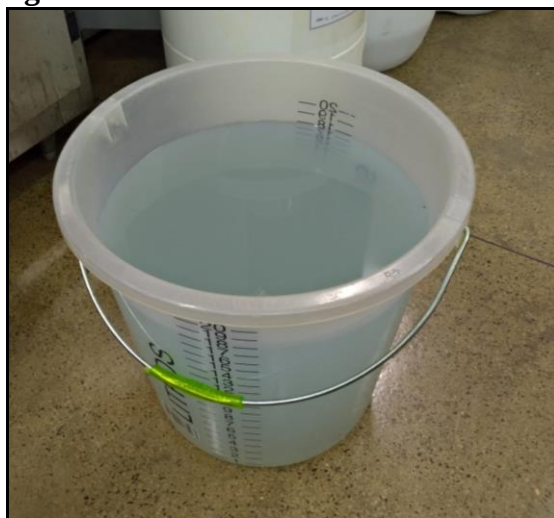


Fonte: O autor (2019).

6.7. Remoção de poluentes de águas cinzas com filtro de areia e carvão

A água cinza utilizada foi de uma lavanderia industrial que realiza atividades de lavagem de roupas e uniformes em larga escala, apresentando altos níveis de cloro, detergentes, turbidez e sólidos. A Figura 24 mostra a aparência do efluente.

Figura 24 - Efluente de lavanderia industrial



Fonte: O autor (2019).

Foram realizados ensaios de coagulação/floculação do efluente com o auxílio de um equipamento Jar Test, de marca Ethik Technology, modelo 218-3 LDB C4/F3, conforme Figura 25. O aparelho possui seis provas para inserção das amostras do efluente, e sua velocidade de rotação pode ser controlada. Foi possível determinar o intervalo de dosagem para o coagulante estudado.

Figura 25 - Coagulação/Filtração do efluente utilizando aparelho JAR Test



Fonte: O autor (2019).

Foi empregado o coagulante químico policloreto de alumínio (PAC) a 1,0 %. A água cinza bruta foi inserida em volume de 2 litros em cada cuba do Jar Test. Os ensaios foram executados a temperatura ambiente. As velocidades de mistura rápida e lenta foram de 160 RPM e 40 RPM, por 1 minuto e 20 minutos, respectivamente. Após a sedimentação, foram realizados ensaios de temperatura, pH, turbidez e condutividade.

Após o sistema de coagulação/floculação foi empregado o sistema de filtração das amostras, conforme Figura 26. Este sistema foi operado em série de dois filtros em regime contínuo, um com areia e outro com carvão da pirólise de resíduos de poda de árvores, com esgoto em fluxo descendente, para remoção de poluentes, tanto por ação biológica quanto física.

Figura 26 - Sistema de filtração de águas cinzas, contendo dois filtros em série



Fonte: O autor (2019).

O efluente filtrado foi monitorado para observar seus níveis de qualidade. Foram coletadas amostras a cada 30 minutos de operação no ponto final do sistema. Elas foram armazenadas em garrafas com dois litros de capacidade.

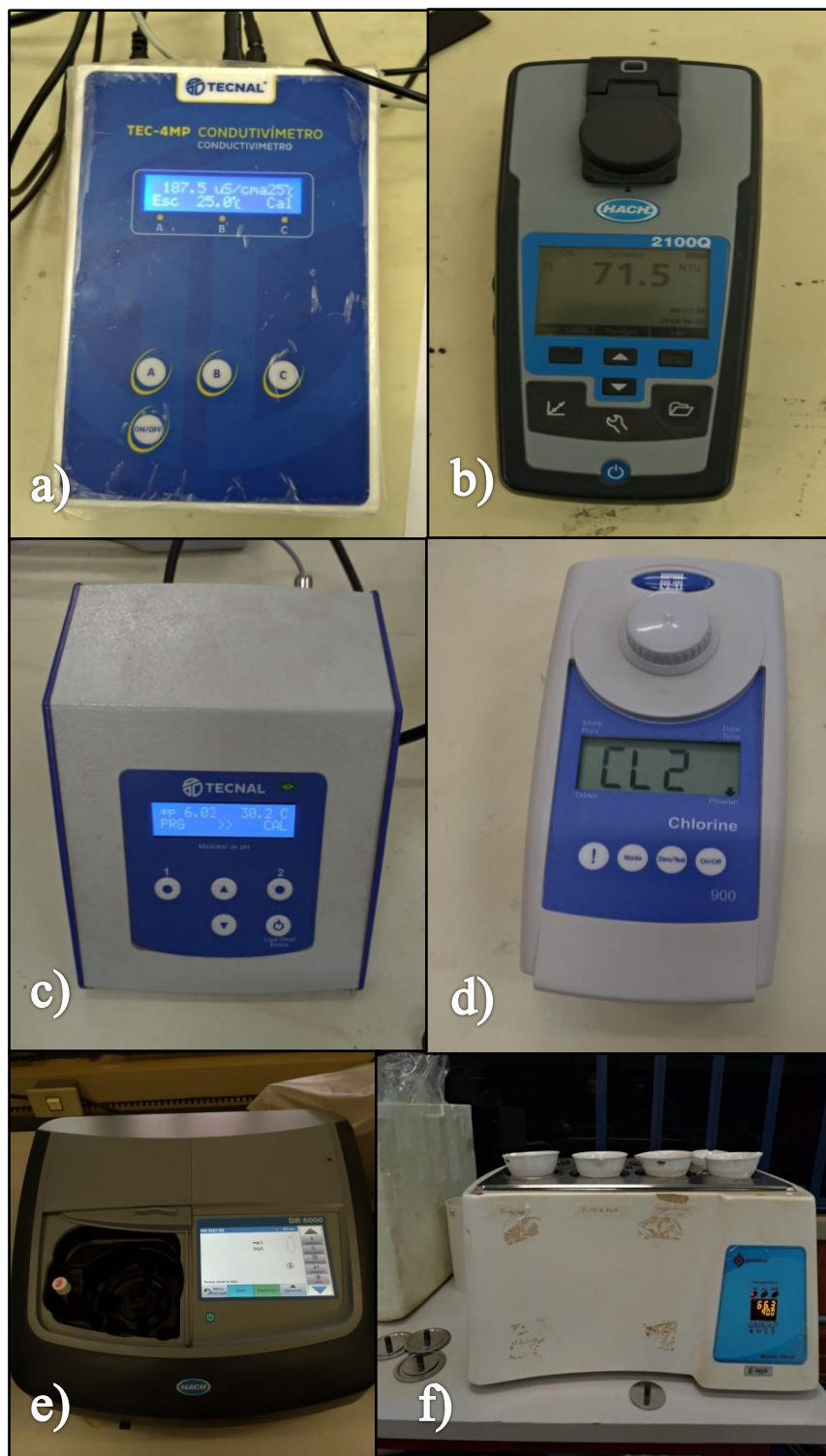
As determinações seguiram os métodos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 20ª edição (APHA/AWWA/WEF, 1998), conforme Tabela 6 e Figura 27.

Tabela 6 - Métodos analíticos para caracterização físico-química de efluente

PARÂMETRO ANALÍTICO	METODOLOGIA
Temperatura (°C)	Termômetro/Sensor de temperatura
Condutividade	Condutivímetro
Turbidez	Neflométrico
pH (-)	Eletrométrico
Cloro	Clorímetro
DQO (mg/L)	Frascos Padrões
Sólidos Totais, Fixos e Voláteis (mg/L)	Gravimétrico

Fonte: APHA/AWWA/WEF (1998)

Figura 27 – Métodos analíticos empregados: a) Temperatura e Condutividade; b) Turbidez; c) pH; d) Cloro; e) DQO; f) Sólidos



Fonte: O autor (2019).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Caracterização da biomassa

Com a caracterização da biomassa foi possível obter propriedades da mesma, resultantes das análises experimentais.

7.1.1. Análise Imediata e Elementar da biomassa

Os teores de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo foram determinados a partir de ensaios em triplicatas, e seus percentuais analisados. Os resultados foram apresentados na Tabela 7 e comparados com os teores apresentados em outras literaturas.

Tabela 7 - Análise imediata da poda de árvore e outros

Biomassa	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%) (*)	Cinzas (%) (*)	Carbono Fixo (%) (**)	Autores
Poda urbana	5,46	67,1	25,81	1,63	[1]
Poda urbana	74,2	88,68	5,3	6,02	[2]
Abacateiro (<i>Persea americana</i>)	-	85,61	0,35	14,04	[3]
Amendoim-bravo (<i>Pterogyne nitens</i>)	-	81	0,55	18,45	[3]
Poda de grama	10,8	83,83	6,81	9,36	[4]
Sabugo de milho	9,14	88,12	1,98	9,9	[5]
Fibra de coco	8,87	84,11	1,99	13,9	[6]

* Análise em base seca

** Valores obtidos por diferença

Fonte: [1] O autor (2019); [2] Nakashima et al., (2018); [3] Vale et al., (2005); [4] Granado et al., (2018); [5] Machado (2019); [6] Agrizzi (2017).

A umidade representa a perda, em massa, sofrida pela biomassa quando é aquecida a temperaturas próximas à de ebulição da água (100° C). Após o processo de secagem, o teor de umidade da poda de árvore obtida foi de 5,46 %. A principal explicação é que as amostras foram coletadas em um período seco, possuindo assim uma baixa umidade.

Este parâmetro é importante, pois está diretamente relacionada ao poder de combustão do material. Quanto maior a umidade, menos será o poder calorífico. Por causa disso, o teor de umidade possui uma grande importância no desenvolvimento e na

eficácia da pirólise. Quanto mais seca a biomassa, menos drástico é o processo pirolítico, pois ela apresenta nesta situação compostos oxigenados (levemente decompostos) (PEDROZA, 2014).

O índice de materiais voláteis é a parte da biomassa que se volatiliza em temperaturas próximas a 900 °C. Quanto maior o seu teor, maior sua reatividade e consequentemente mais fácil a sua ignição. O índice de materiais voláteis obtido da poda de árvore foi de 67,1 %.

O teor de cinzas se refere à existência de materiais inorgânicos, como o ferro, cálcio, sódio, potássio, etc. A sua presença pode catalisar as reações da pirólise, aumentando a fração gasosa e reduzindo a fração líquida. Ele também reduz o poder calorífico, visto que ele não participa da combustão, mas é contabilizado na massa resultante da queima (FONTES et al., 2009; BRAND, 2010). O valor obtido de cinzas para a poda de árvore foi de 25,81 %.

O teor de carbono fixo determina a massa restante após o processo de volatilização, removendo-se o teor de cinzas e a umidade. Os maiores valores são obtidos para biomassas com maior teor de lignina, por serem mais resistentes à decomposição térmica quando comparado à celulose e hemicelulose (PEDROZA, 2014). O teor de carbono fixo da poda de árvore foi de 7,08 %.

McKendry (2002) diz que os teores de materiais voláteis e de carbono fixo fornecem uma medida da facilidade com que a biomassa pode ser inflamada e subsequentemente gaseificada ou oxidada.

Os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio da poda de árvore foram determinados a partir de dados pré-existent e seus percentuais analisados e comparados com outras literaturas, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Análise elementar da poda de árvore e outros

Variável analítica	Resultados [1]	Referência	
		[2]	[2]
Carbono (%)	41,5	45,32	45,07
Hidrogênio (%)	9,1	5,7	6,02
Nitrogênio (%)	<1,0	0,39	1,35
Oxigênio (%)	48,4	48,49	47,54

Fonte: [1] O autor (2019), [2] SILVA et al., (2019).

O carbono está correlacionado com a presença de celulose, lignina e hemicelulose. Quanto maior o teor de carbono, melhor os índices de poder calorífico.

(PARI et al., 2018). O teor de carbono da poda de árvore foi aproximadamente igual a 41,5 %.

Silva et al. (2019) encontraram valores próximos de carbono, 45,32 % para a acácia-negra (*Acacia mearnsii*) e 45,07 % para o timbó (*Ateleia Glazioviana*), com 5 anos de idade. Para os autores, o teor de carbono aumenta com a idade da árvore, assim como o tamanho da mesma.

O teor de hidrogênio está associado ao teor de água, agindo negativamente já que a umidade diminui o poder calorífico da biomassa. Portanto, o hidrogênio apresenta proporcionalidade inversa com o calor obtido da combustão. O teor de hidrogênio foi de aproximadamente 9,1 %.

O teor de nitrogênio está relacionado ao nível de proteínas da biomassa. Os valores de nitrogênio costumam ser maiores em árvores mais novas. Valores pequenos de nitrogênio são preferíveis, pois este elemento em excesso resulta em um aumento no nível de poluição (SILVA et al., 2019). O índice de nitrogênio encontrado foi de aproximadamente 1,0 %.

Foi possível obter o do teor de oxigênio, por diferença, de aproximadamente 48,4 %. O oxigênio é essencial para estimular a combustão da biomassa. Segundo Huang et al. (2009), altos teores de oxigênio reduzem o poder calorífico, assim como uma alta relação de Oxigênio/Hidrogênio.

Para processos de pirólise é preferida uma biomassa com relação Carbono/Nitrogênio (C/N) maior que 30 e baixa umidade (menor que 30 %) (BONARI e MARACCHI, 2016). Neste estudo, foi obtida uma relação C/N aproximada de 41,5 e umidade de 5,46 %, atendendo os critérios.

É importante ressaltar que a biomassa pode apresentar diferentes teores de CHN/O por vários motivos: a espécie, estágio de desenvolvimento, estado nutricional, condições edafoclimáticas e com a parte da planta considerada. Isso afeta sua composição química e, conseqüentemente, influencia a qualidade do material para produção (carvão) (RATUCHNE et al., 2016)

7.1.2. Densidade aparente

A densidade volumétrica aparente foi determinada a partir da média aritmética, considerando as amostras com volumes de 20, 40, 60, 80 e 100 ml. O valor médio obtido foi 0,354 g/ml (Tabela 9).

Tabela 9 - Densidade volumétrica aparente da poda de árvore

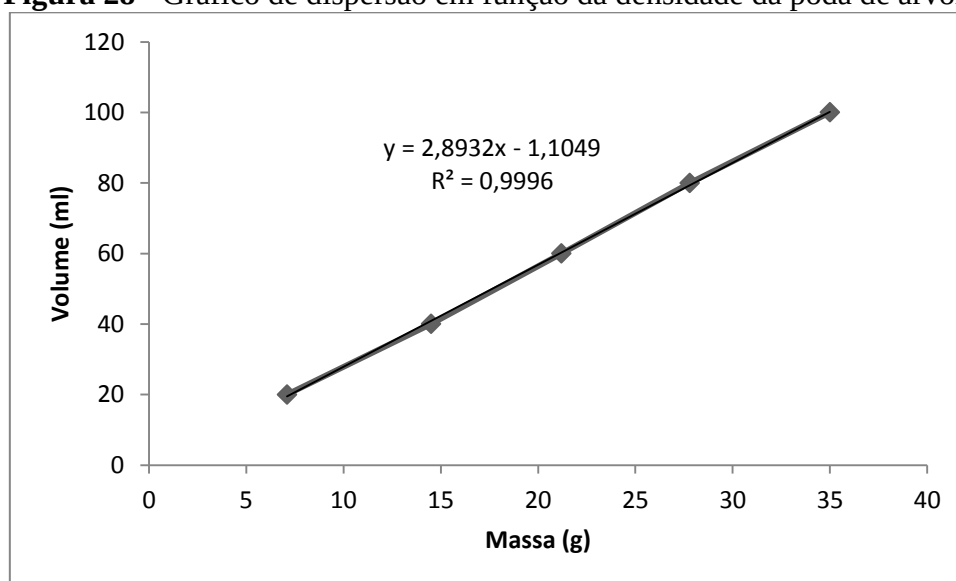
Ensaio	Densidade (g/ml)
1	0,355
2	0,363
3	0,353
4	0,348
5	0,35
Média	0,354

Fonte: O autor (2019).

Este parâmetro é importante por causa da influência na compactação da biomassa na percolação de fluidos como o ar.

O gráfico de dispersão da biomassa em função da massa (x) pelo volume (y) é apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Gráfico de dispersão em função da densidade da poda de árvore



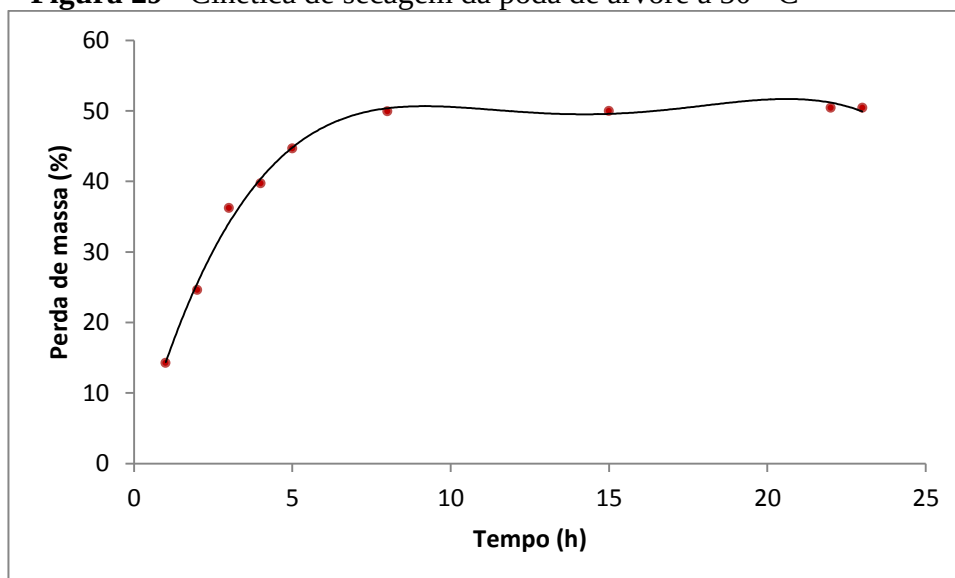
Fonte: O autor (2019).

7.1.3. Cinética de secagem

A Figura 29 apresenta a curva de secagem da poda de árvore em função do tempo, na temperatura de 50 °C. Ao permanecer nesta temperatura, a biomassa teve uma perda significativa de massa úmida. Ao final do ensaio, o peso da amostra se manteve constante (secagem completa do material). Para um período de 8 horas, a perda de massa foi igual a 49,91 % e para 23 horas, de 50,44 %.

É importante observar que a variação durante este período foi mínima, gastando apenas mais energia.

Figura 29 - Cinética de secagem da poda de árvore à 50 ° C



Fonte: O autor (2019).

7.2. Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de resíduos da poda de árvore

Os resultados das frações de carvão obtidas no planejamento fatorial 2^2 são apresentados na Tabela 10. Para os rendimentos em porcentagem do carvão foram consideradas as respostas do planejamento experimental.

Tabela 10 - Resultados do planejamento 2^2 para a fração sólida (carvão) durante a pirólise de resíduos da poda de árvore

Ordem dos Experimentos	Fatores		Rendimento (%)
	Temperatura	Taxa de aquecimento	Carvão
	(°C)	(°C/min)	
1	400	15	53,2
2	600	15	30,2
3	400	25	27,4
4	600	25	37,43
5	360	20	51,1
6	640	20	25,1
7	500	13	38,8
8	500	27	33,5
9	500	20	45,78
10	500	20	46,1
11	500	20	46,6

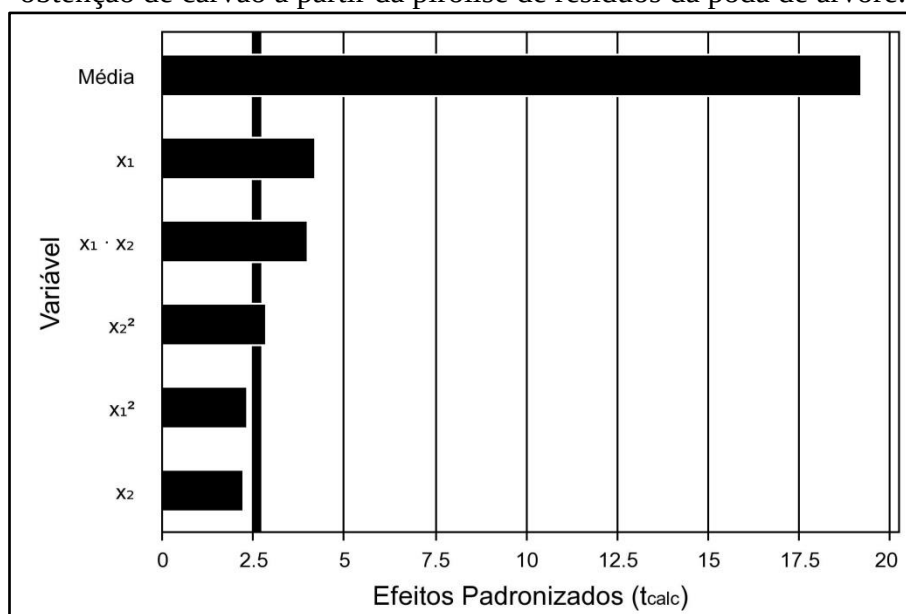
Fonte: O autor (2019).

O maior rendimento de carvão foi observado no experimento 1 (53,2%), operado com temperatura do reator de 400 °C e taxa de aquecimento de 15 minutos. O menor rendimento (25,1%) foi obtido em pirólise de 640 °C e taxa de aquecimento de 20 minutos.

O diagrama de Pareto produzido do planejamento fatorial 2^2 indicou que a temperatura (X_1) teve efeito negativo para o carvão (-6,22), conforme Figura 30. O aumento de temperatura e sua subsequente redução no rendimento de carvão se devem principalmente à devolatização dos compostos orgânicos sólidos (hidrocarbonetos, ácidos húmicos, proteínas) e gaseificação parcial de resíduos carbonosos.

O diagrama também mostrou que a taxa de aquecimento ao quadrado e a interação das variáveis temperatura e taxa de aquecimento também tiveram efeito negativo para o carvão.

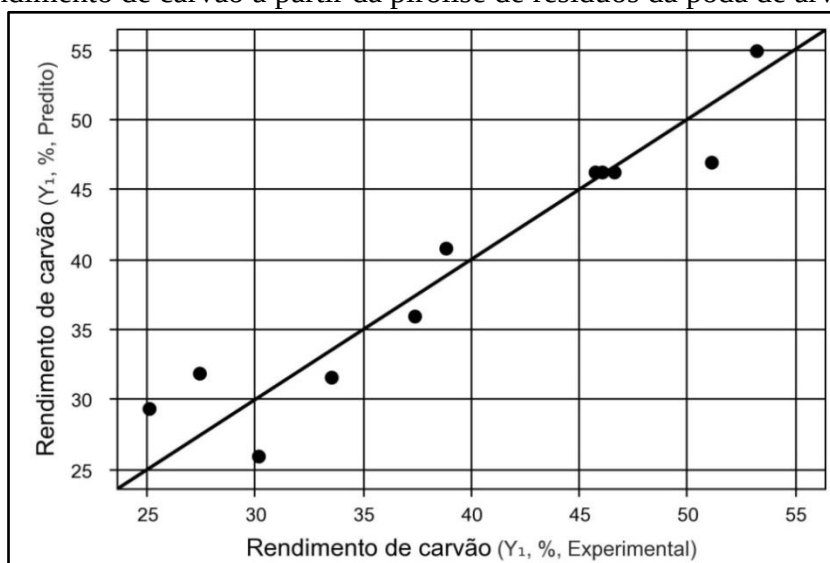
Figura 30 - Diagrama de Pareto obtido do planejamento fatorial DCCR – 22 para a obtenção de carvão a partir da pirólise de resíduos da poda de árvore.



Fonte: O autor (2019).

A Figura 31 apresenta os valores obtidos a partir do planejamento experimental versus os valores preditos após o processo de pirólise.

Figura 31 - Valores experimentais versus valores preditos, para a obtenção de rendimento de carvão a partir da pirólise de resíduos da poda de árvore.



Fonte: O autor (2019).

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. Eventuais divergências entre os valores podem estar associados a erros ou interferência ocorrida no próprio reator de pirólise de leito fixo.

Com os coeficientes de regressão foi possível definir o modelo do que representa a produção de carvão durante a pirólise empiricamente, conforme equação. A média (46,16), a temperatura (-6,22), a taxa de aquecimento ao quadrado (-5,02) e a interação entre as duas variáveis (8,26) possuíram efeitos mais significativos a um nível de confiança de 95 %, conforme destacados na Tabela 11.

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

Fatores	Coeficientes regressão	Erro Padrão	T _{calc}	p-valor
Média	46,16	2,4	19,22	0
X ₁	-6,22	1,47	-4,23	0,0083
X ₁ ²	-4,05	1,75	-2,31	0,0687
X ₂	-3,26	1,47	2,22	0,0775
X ₂ ²	-5,02	1,75	-2,87	0,035
X ₁ · X ₂	8,26	2,08	3,97	0,0106

Fonte: O autor (2019).

Todas as variáveis possuem valores baixos de p-valor (alto valor de explicação), devendo assim ser consideradas no modelo.

$$\text{Rendimento (\%)} = 46,16 - 6,22X_1 - 4,05X_1^2 - 3,26X_2 - 5,02X_2^2 + 8,26X_1X_2$$

(Equação.5)

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

A Tabela 12 mostra a análise de variância (ANOVA) da produção de carvão em processo de pirólise de resíduos da poda de árvore em reator de leito fixo.

Tabela 12 – Análise de Variância (ANOVA) para a produção de carvão em processo de pirólise

Fonte de variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Regressão	850,2	5	170	9,8	0,01271
Resíduos	86,5	5	17,3		
Falta de Ajuste	86,1	3	28,7	168,1	0,00592
Erro Puro	0,3	2	0,2		
Total	936,6	10			

$$R^2=0,9077; F_{\text{tabelado}}(5; 5; 0,05) = 5,05$$

Fonte: O autor (2019).

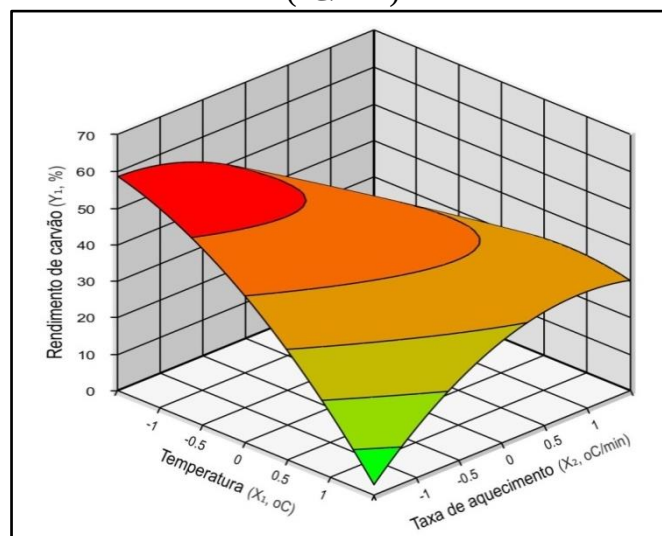
O modelo apresenta um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9077. Segundo Ross (2010), um valor de R^2 próximo de 1 indica que a maior parte da variação dos dados de resposta é explicada pelos diferentes valores de entrada. Tal ajuste do modelo é explicado pela aglomeração significativa de pontos próximos da reta representativa.

A significância dos parâmetros do modelo foi verificada através do teste F de Fisher–Snedecor. Para isso, o $F_{\text{calculado}}$ deve ser maior que o F_{tabelado} . O valor de $F_{\text{calculado}}$ foi determinado pela expressão, $F_{\text{calculado}} = \text{Quadrado médio regressão}/\text{Quadrado médio erro}$. Siegel (2012) explica que o resultado é significativo se o valor de $F_{\text{calculado}}$ for maior porque isso indica maiores diferenças entre as médias amostrais.

Comparando-se o valor de $F_{\text{calculado}}$ (9,8) para a regressão com o valor de F_{tabelado} (5,05), percebe-se uma regressão significativa.

Através do modelo estatístico foi possível obter uma superfície de resposta que informa a máxima quantidade de carvão, conforme Figura 32.

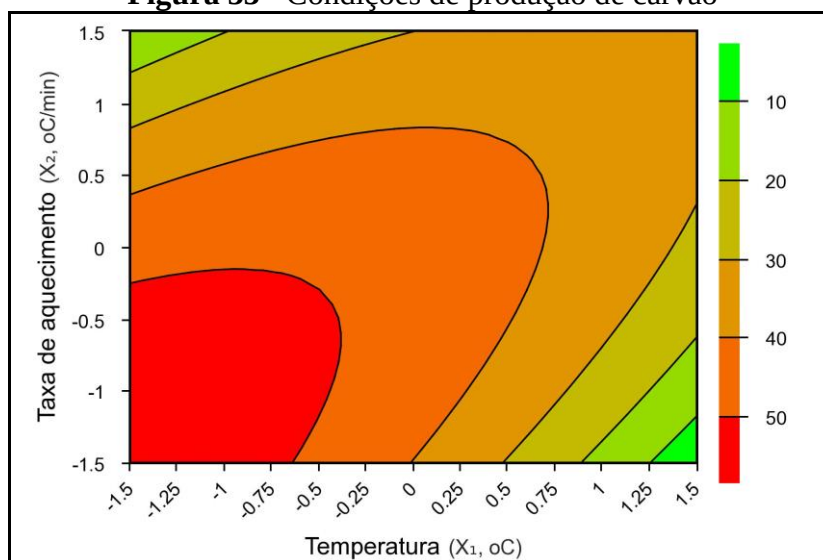
Figura 32 - Superfície de Resposta para a obtenção de carvão a partir da pirólise de resíduos da poda de árvore, com os fatores Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e Taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)



Fonte: O autor (2019).

Pela superfície de resposta são ilustradas as condições de produção de carvão, com maior quantidade de carvão produzida em menores temperaturas e menores taxas de aquecimento. A área ótima (em vermelho) representa o melhor rendimento de carvão. Os valores máximos foram encontrados em dois pontos: Ponto 1 com temperatura a aproximadamente $462,5^{\circ}\text{C}$ e taxa de aquecimento $17,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$; e Ponto 2 com temperatura aproximadamente 400°C e taxa de aquecimento $19,17^{\circ}\text{C}/\text{min}$, conforme Figura 33.

Figura 33 - Condições de produção de carvão



Fonte: O autor (2019).

7.3.Caracterização do carvão

A caracterização físico-química do carvão foi possível através de metodologias específicas como a Análise Imediata e Elementar, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

7.3.1. Análise Imediata e Elementar do carvão

Para determinação dos teores de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo do carvão obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore, foram realizados ensaios considerando o carvão obtido na seguinte condição: temperatura 500 °C, taxa de aquecimento 20°C/min. Os resultados foram representados na Tabela 13.

Tabela 13 - Análise Imediata do carvão ativado da poda de árvore e outros

Carvão Ativado	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%) (*)	Cinzas (%) (*)	Carbono Fixo (%) (**)	Autores
Poda urbana	2,9	59	12,3	25,8	[1]
Pau pólvora (<i>Trema micranta</i>)	-	20	2,4	77,7	[2]
Mutamba (<i>Guazuma ulmifolia</i>)	-	14,4	3,3	81	[2]
Mogno africano (<i>Khaya ivorensis</i>)	-	29,55	2,36	68,08	[3]
Sabugo de milho	3,43	38,68	17,09	40,8	[4]
Fibra de coco	4,85	29,9	13,03	58,07	[5]

* Análise em base seca

** Valores obtidos por diferença

Fonte: [1] O autor (2019); [2] Costa et al., (2014); [3] Moraes et al., (2019); [4] Machado (2019); [5] Cortez et al., (2009).

Comparando o carvão com o produto original (poda de árvore), percebeu-se uma redução na umidade (46,89 %), uma redução no teor de materiais voláteis (11,94%), uma redução no teor de cinzas (52,34 %) e um aumento no teor de carbono fixo (1428,82 %).

O teor de cinzas, assim como para a biomassa, tem relação com a presença de materiais inorgânicos. A poda apresentava terra, o que acabou influenciando no teor de cinzas do carvão. Já o teor de material volátil é a parte elemento (carvão) que se volatiliza.

Ao comparar com outras literaturas, observou-se um teor de carbono fixo menor. Isto pode ser explicado pelo fato da biomassa ser uma mistura de espécies típicas do cerrado e apresentar na sua composição mais galhos, folhas, cascas e terra.

Os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio do carvão obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore foram determinados a partir de dados pré-existentes e seus percentuais analisados e comparados com outras literaturas, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Análise Elementar do carvão ativado da poda de árvore e outros

Variável analítica	Resultados				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Carbono (%)	68	63,84	83,2	50,12	77,87
Hidrogênio (%)	1,5	2,21	4	6,12	2,57
Nitrogênio (%)	1,7	1,11	<0,5	0	0,93
Oxigênio (%)	28,8	19,04	18,6	43,76	22,5

Fonte: [1] O autor (2019), [2] Břendová et al., (2012); [3] Cao et al., (2012); [4] Agrawal, (2014) e [5] Márquez-Montesino et al., (2015).

A análise elementar do carvão ativado obtido da pirólise quando comparada à análise da biomassa (poda de árvore), notou-se um aumento no teor de carbono (63,86%), uma redução no teor de hidrogênio (83,52 %), um aumento no teor de nitrogênio e uma redução no teor de oxigênio (40,49 %).

As literaturas consideraram carvões oriundos de diferentes espécies: Břendová et al. (2012), uma mistura de álamo e salgueiro; Cao et al. (2012), bordos; Agrawal (2014), eucaliptos e Márquez-Montesino et al. (2015), acácias. Nota-se uma variabilidade no teor de CHN/O entre o presente trabalho e a literatura. Assim como para a biomassa, o subproduto (carvão) também será influenciado pela espécie, sua idade, a parte considerada e as condições edafoclimáticas.

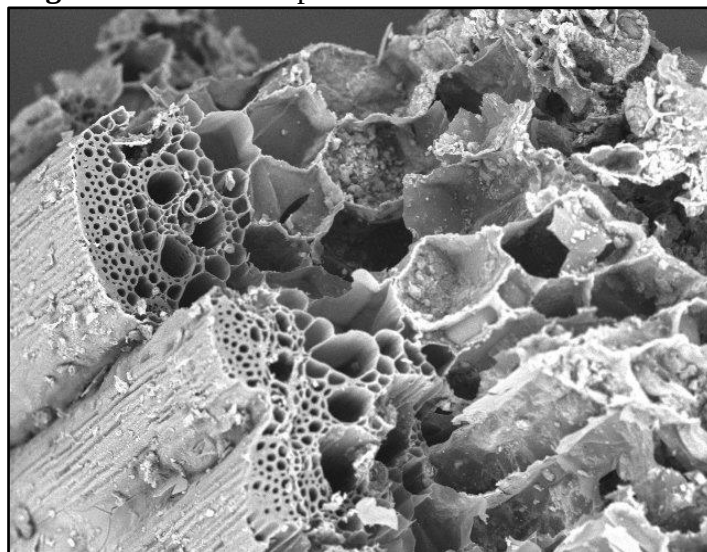
A relação Carbono/Hidrogênio da biomassa in natura foi de 4,6. Após o processo de pirólise, essa relação aumentou para 45,3, quase 10 vezes maior. Segundo Rodrigues (2019), essa relação tende a aumentar por causa da maior aromatização e alteração química do material.

Segundo Jeguirim e Limousy (2019), a temperatura e a duração da pirólise afetam fortemente as propriedades do carvão, e consequentemente, suas capacidades de remover compostos orgânicos das soluções aquosas.

7.3.2. Microscopia Eletrônica do carvão ativado

A Figura 34 mostra as estruturas do carvão ativado através da análise em detalhes da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com magnificação de 500x.

Figura 34 - Microscopia eletrônica do carvão ativado



Fonte: O autor (2019).

A análise mostra o carvão ativado com uma estrutura distribuída de maneira irregular, com nervuras longitudinais, sendo possível identificar melhor suas porosidades.

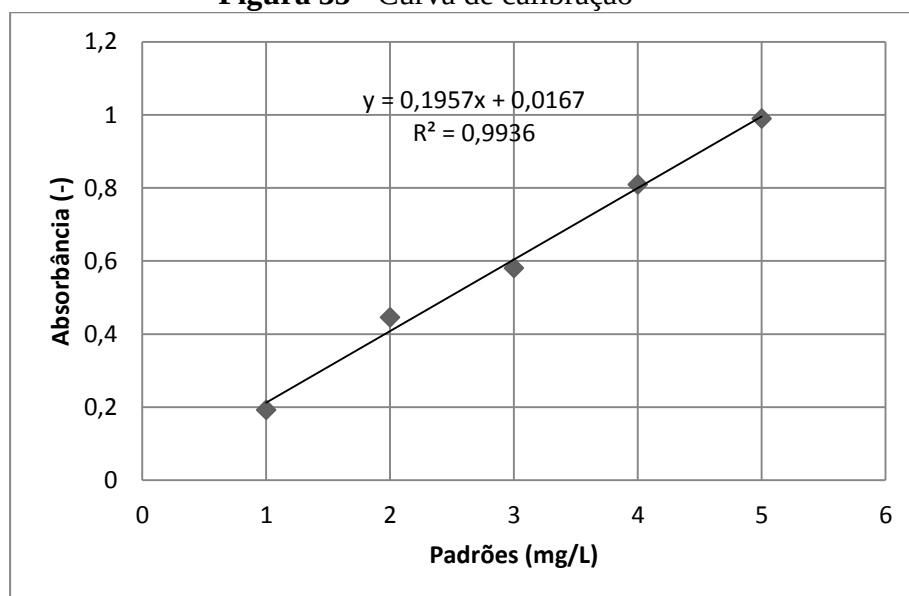
A porosidade do carvão ativado é derivada principalmente de três fontes: a estrutura celular inerente ao material precursor (poda), as condições existentes durante a preparação do carvão ativado e a composição do material precursor (a presença de outros compostos).

7.4. Teste de adsorção de corante em filtro de carvão

O teste de adsorção utilizando o azul de metileno avalia a eficiência de adsorção do carvão ativado, além de informar sobre a porosidade do material. A curva de calibração, mostrada na Figura 35, é construída através de soluções padrões,

enquanto que a concentração da amostra a ser analisada é verificada pela interpolação da absorbância.

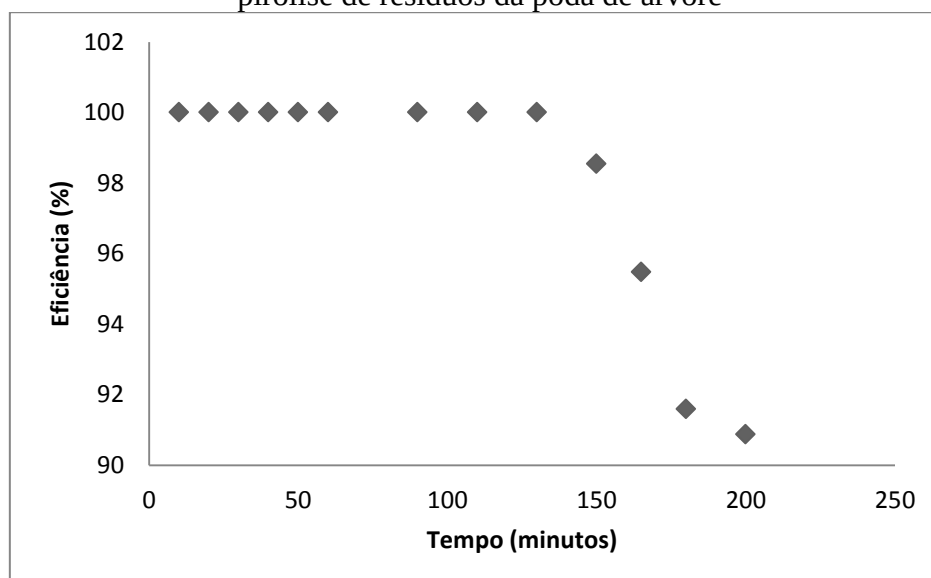
Figura 35 - Curva de calibração



Fonte: O autor (2019).

A Figura 36 mostra os resultados da eficiência de remoção do azul de metileno obtidos durante os testes de adsorção utilizando sistema de filtração com o carvão da pirólise de resíduos da poda de árvore e o azul de metileno.

Figura 36 - Eficiência de remoção do azul de metileno em filtro de carvão obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore



Fonte: O autor (2019).

O filtro de carvão ativado apresentou eficiência de remoção máxima durante os primeiros 100 minutos, e de 90,87 % após 200 minutos. Esta queda da eficiência de remoção se deve a saturação do carvão.

7.5. Polimento do efluente em filtro de carvão e areia

Após o ensaio de coagulação/floculação com o policloreto de alumínio (PAC), foram comparadas as diferentes dosagens do coagulante e a sua influência nos parâmetros temperatura, pH, turbidez e condutividade, conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros analíticos da água cinza bruta após processo de coagulação/floculação

Variável Analítica	Tipo de Amostra						
	Água Cinza Bruta	Processo Coagulação/Floculação/Decantação (Dosagem)					
		50 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	300 mg/L	400 mg/L
Temperatura (°C)	25	25,3	25,3	25,6	25,7	25,7	25,9
pH (-)	6,5	6,3	6,1	5,9	5,8	5,6	5,5
Turbidez (uT)	71,5	71,3	71,2	73,2	43,8	6,38	3,66
Condutividade (uS/cm)	185	193	200,5	210	221	236	250

Fonte: O autor (2019).

À medida que a temperatura aumenta, as vibrações moleculares também aumentam, o que resulta na capacidade da água de ionizar e formar mais íons hidrogênio. Como resultado, o pH cairá. O coagulante também é responsável pela queda do pH, pois o PAC consome alcalinidade durante a hidrólise.

Quanto maior a dosagem do coagulante, menor os índices de turbidez. Os resultados também mostram que o PAC possui bom desempenho na redução da turbidez, removendo cerca de 94,88 %. A condutividade aumenta à medida que a dosagem do coagulante aumenta. O resultado mostrou um aumento de 35,14 %.

Com o efluente decantado, foi realizado o ensaio de filtração com areia e carvão, obtendo-se o seu efeito na temperatura, pH e condutividade; e na remoção das turbidez, cloro, DQO e sólidos, conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros analíticos da água decantada antes e após filtração em filtro de areia e carvão ativado

Variável Analítica	Amostra			Resolução
	Decantado	Inicial	Final	430 CONAMA
Temperatura (°C)	25	22,6	23,7	<40°C
pH	6,8	7,4	6,8	(5-9)
Turbidez (UNT)	5,43	0,57	0,45	<40 UNT
Condutividade (uS/cm)	214,8	163,2	184,7	-
Cloro (mg/l)	>2	0,23	0,19	-
DQO (mg/l)	5	0	0	-
Sólidos Totais	200	110,5	115	-
Sólidos Fixos	120	57,5	45,5	-
Sólidos Voláteis	80	53	69,5	-

Fonte: O autor (2019).

A temperatura está relacionada à eficiência da adsorção do filtro de carvão ativado. Neste caso, as temperaturas permaneceram próximas à temperatura ambiente.

A variação de pH entre a água decantada e a água filtrada inicialmente se deve ao fato do próprio carvão ativado atuar como um meio de troca iônica, consequentemente contribuindo para o aumento do pH. A leve redução do pH pode ser tanto pelo aumento da temperatura como por alguma saturação do filtro de carvão ativado. O pH da amostra final possuiu o mesmo pH da água decantada (6,8).

O carvão ativado continuou a remover a turbidez, resultando em um valor de 0,45 NTU. Do início do tratamento até a amostra final, foi possível reduzir 99,37 % de toda a turbidez. Segundo Nkwonta et al. (2010), características do carvão como a grande área específica e a porosidade podem contribuir para este fenômeno.

A queda da condutividade ocorreu primeiramente por causa da queda da temperatura. À medida que o efluente passa pelo carvão ativado, o processo de adsorção libera íons, resultando posteriormente no aumento da condutividade. Os sólidos fixos, por serem representados por sais, também podem influenciar na condutividade.

O efluente decantado possuía valores de cloro maiores que 2 mg/l e após a filtração, foi possível reduzir inicialmente para 0,23 mg/l e depois para 0,19 mg/l. Sendo assim, estima-se uma remoção de pelo menos 90,5 % de todo o cloro. O carvão ativado é conhecido por reduzir os níveis de cloro.

Após a filtração do efluente foi possível remover a Demanda Química de Oxigênio (DQO) em praticamente 100 %. Ela avalia a quantidade de matéria orgânica, através do oxigênio dissolvido. Mesmo sem apresentar regulamentação no CONAMA, a DQO é um parâmetro muito importante, pois dá uma indicação do oxigênio requerido para estabilização da matéria orgânica.

A determinação dos sólidos é importante, pois determina uma aproximação da quantidade de matéria orgânica presente na fração sólida de efluentes. Após o processo de filtração, foi possível perceber uma redução na quantidade de sólidos totais de 200 mg/l para 110,5 mg/l e 115 mg/l nos pontos iniciais e finais de coleta, respectivamente. Apesar dos valores filtrados do efluente estarem relativamente próximos, observou-se um pequeno aumento no ponto final, podendo ocorrer pela saturação do filtro de carvão.

A amostra final apresentou maior quantidade de sólidos voláteis (a porção perdida durante o aquecimento) e menor quantidade de sólidos fixos. A presença de sólidos fixos está diretamente relacionada à quantidade de materiais inorgânicos (saís). De modo geral, foi possível reduzir 42,5 % dos sólidos totais, 64,68 % dos sólidos fixos e 13,13 % dos sólidos voláteis.

Também foi possível realizar algumas observações sobre os coliformes e microrganismos: como o efluente possuía níveis significantes de cloro, os níveis de coliformes estariam reduzidos. A exposição ao cloro pode destruir a parede celular da bactéria - alterando-a física, quimicamente e bioquimicamente – e encerrar as funções vitais da célula, matando o microrganismo.

Baixos valores de turbidez indicam maiores eficiências na remoção de protozoários (*Giardia* e *Cryptosporidium*) durante a filtração e favorecem a eliminação de bactérias e vírus durante a desinfecção (TORRES-LOZADA et al., 2018).

O processo se mostrou eficiente, não sendo necessário testar a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), por apresentar baixos níveis de microrganismos, consequentemente baixa Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Por último, o filtro de areia e carvão ativado removeu o odor do efluente. De acordo com McLaughlin (2019), isto ocorre porque o carvão oferece ao composto odorante um local mais atraente para residir. O estado adsorvido – quando o composto deixa a água e fica retido dentro do carvão – é chamado de estado de energia mínima. É como se a molécula não pudesse sair.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da aplicação da pirólise de resíduos da poda de árvore para obtenção do carvão se mostrou uma alternativa relevante para aproveitamento do resíduo. Dessa forma, uma biomassa que antes seria descartada em aterros sanitários, se transformou em um produto com valoração devida à capacidade de adsorção.

A pirólise apresentou grande eficiência na decomposição da matéria prima (poda de árvore). O modelo estatístico se mostrou significativo para produção de carvão ativado ($R^2 = 0,9077$). A temperatura da pirólise e sua taxa de aquecimento foram cruciais para aperfeiçoar as propriedades do carvão. Obteve-se um aumento no teor de carbono fixo, e a composição de carbono do material também aumentou.

O tratamento do efluente com o sistema de floculação/decantação e filtração com areia e carvão ativado (principalmente por sua propriedade de adsorção) apresentou uma eficiência satisfatória na remoção de poluentes de águas cinzas de lavanderias industriais, ocasionando uma grande remoção na turbidez (99, 37%) e microrganismos, remoção do cloro (pelo menos 90,5 %), redução dos sólidos totais (42,5 %) e remoção da DQO (praticamente 100%).

O efluente pós-tratado está de acordo com as normas vigentes, sendo possível reutilizá-lo de forma não potável, seja através de limpeza de pisos, descarga sanitária e até mesmo ser despejado no corpo receptor. Já para a irrigação de plantas, como o efluente final apresentou sólidos fixos, a quantidade de sais é recomendada para culturas específicas como as do caju e do coco.

A partir das conclusões e resultados obtidos nessa pesquisa, recomenda-se:

- Fazer um estudo econômico aprofundado do processo considerando todos os produtos obtidos, assim como estudar a viabilidade econômica do carvão ativado obtido da pirólise de resíduos da poda de árvore perante outros adsorventes.
- Avaliar a ativação física e química do carvão ativado do resíduo da poda de árvore, para analisar a diferença e eficiência de ambos.
- Realizar análise da influência de outros tipos de reatores e de outros parâmetros operacionais como: vazão do gás inerte, vazão mássica de biomassa, tempo de residência e velocidade de rotação do reator.
- Analisar outros tipos de biomassa e suas eficiências na remoção de poluentes.

9. REFERÊNCIAS

- ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2017. Disponível em <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>>. Acesso em 13 de jan. 2019.
- AGRAWAL, S.. **Carbonization of eucalyptus wood and characterization of the properties of chars for application in metallurgy**. Department of Metallurgical & Materials Engineering. National Institute Of Technology Rourkela. 2014.
- AGRIZZI, T.. **Pirólise da casca de coco: Estudo da cinética de devolatização e identificação dos produtos**. 101p. Dissertação de Mestrado, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2017.
- AHMARUZZAMAN, M.; SHARMA, D. K. **Adsorption of phenols from wastewater**. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 287, p. 14-24, 2005.
- ALLEN, L.; CHRISTIAN-SMITH, J.; PALANIAPPAN, M. **Overview of greywater reuse: The potential of greywater systems to aid sustainable water management**. California: Pacific Institute, 2010. 41 p. Disponível em <http://www.pacinst.org/wp-content/uploads/2013/02/greywater_overview1.pdf>. Acesso em 05 jan. 2019.
- ANCA-COUCÉ, A.; **Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis**, *Progr Energ Combust. Sci.* 53. 41-79, 2016.
- ANGELIS, B. L. D; SAMPAIO, A. C. F; TUDINI, O. G; ASSUNÇÃO, M. G. T; NETO, G. A; **Avaliação das árvores de vias públicas da zona central de Maringá, Estado do Paraná: estimativa de produção de resíduos e destinação final**. Revista Acta Sci. Agro, Maringá, v. 29, n. 1, p. 133-140, 2007.
- APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th ed. Washington, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro/RJ, 2004.

BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis - Practical design and theory**. Estados Unidos: Academic Press, 365 p., 2010.

BONARI, E., MARACCHI, G.. **Le Biomasse Lignocellulosiche**. Firenze Un.: Firenze, Italy, 256 p., 2016.

BOYJOO, Y.; PAREEK, V. K.; ANG, M.. **A review of greywater characteristics and treatment processes**. *Water Science and Technology*, 67(7), 1403–1424. 2013.

BRAND, M. A.. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 131 p., 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos: Projeto PNUD BRA 00/20: Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental**. Curitiba, PR. 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf>. Acesso em 05 de dez. 2018.

BŘENDOVÁ, K., TLUSTOŠ, P., SZÁKOVÁ, J., HABART, J.. **Biochar properties from different materials of plant origin**. *Eur. Chem. Bull.* 2012.

BRIDGWATER, A. V. **Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading**. *Biomass and Energy*, v.1, p.1 – 27, 2011.

BUSS, M. V.; RIBEIRO, E. F.; SCHNEIDER, I. A. H.; MENEZES, J. C. S. S.. **Tratamento dos efluentes de uma lavanderias industrial: Avaliação da capacidade de diferentes processos de tratamento**. Rio Grande do Sul: Revista de Engenharia Civil IMED, S.D. 2015.

CAO, X., PIGNATELLO, J. J., LI, Y., LATTAO, C., CHAPPELL, M. A., CHEN, N., MILLER, L. F., MAO, J.. **Characterization of wood chars produced at different temperatures using advanced solid-state ¹³C NMR spectroscopic techniques**. *Energy & Fuels*, 26(9), 5983–5991, 2012.

CASTRO, J. B. H.. **Diagnóstico dos serviços de limpeza urbana do Campus Cidade Universitária “Zeferino Vaz” da Universidade Estadual de Campinas.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

CENDOFANTI, A., C.. **Minimização de resíduos de um processo de carvão ativado e de goma resina.** Dissertação Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2005.

COELHO, S., T.; GREGOTUR, C.; TACCINI, M., M.; SALES, B., B. de; DALMOLIN, K.,P., P.; FIGUEIREDO, N., J., V.; BARBOSA, R., M.; GRISOLI, R., P., S.; **Carvão vegetal aspectos Técnicos, Sociais, Ambientais e Econômicos.** CEMBIO. Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) da Universidade de São Paulo (USP), 2008.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução 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, do Conselho CONAMA.** Diário Oficial da república federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em 14 de jan. 19.

CORTEZ, C. L.. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de arvores para geração de energia: estudo de caso: AES Eletropaulo.** Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CORTEZ, L. A. B., PEREZ, J. M. M., ROCHA, J. D., JORDAN, R. A., MESA, H. R. M.. **Processing of coconut shell and fiber for adding value.** Brazilian Journal of Biosystems Engineering. Campinas, v.3 n.1, p.021-030, 2009.

COSTA, T. G., BIANCHI, M. L., PROTÁSIO, T. de P., TRUGILHO, P. F., PEREIRA, A. J.. **Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal.** Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2014.

DOMINGUEZ, A., MENÉNDEZ, J. A., INGUANZO, M., PIS, J. J.. **Investigations into the characteristics of oils produced from microwave pyrolysis of sewage sludge.** Fuel Processing Technology, 86(9), 1007–102, 2005.

FALLAVENA, V. L. V.; ABREU, C.S.; INACIO, T. D.; Azevedo, Carla M. N.; PIRES, M.; FERRET, L.S. . **Avaliação de Método de Determinação do Teor de Matéria Mineral em Carvões Brasileiros**. In: III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2011, Gramado. Congresso Carvão Mineral 2011. Porto Alegre: ufrgs, 2011.

FARIA P. C. C.; ÓRFÃO J. J. M.; PEREIRA M. F. R.; **Adsorption of anionic and cationic dyes on activated carbons with diferente surfasse chemistries**. Water Research, 38, 2043-2052, 2004.

FERNANDES, F; BATISTA, G. A; SOUZA, S. G; SILVA, S. M. C. P. **Aproveitamento dos resíduos de podas de árvores e capinas do meio urbano para produção de composto**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, João Pessoa. Anais. João Pessoa: ABES, 2001.p. 1-5.

FONTS, I.; KUOPPALA, E.; OASMAA, A.. **Physicochemical Properties of Product Liquid from Pyrolysis of Sewage Sludge**. Energy & Fuels, 23(8), 4121–4128, 2009.

GRANADO, M. P. P.; ROSSI, G. G.; DE CONTI, A. C.. **DENSIFICAÇÃO DE BIOMASSA: PRODUÇÃO DE 133 BRIQUETES A PARTIR DA PODA DE GRAMA**. Revista Hipótese, 133-145, 2018.

HOWARD, E., MISRA, R., LOCH, R., LE-MIN, N.. **Laundry grey water potential impact on Toowoomba soils - final report**. Project Report. University of Southern Queensland, National Centre for Engineering in Agriculture , Toowoomba, Australia. 2005.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. **Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy**. Waste Management, v. 29, n. 6, p. 1793–1797, 2009.

ISA - SOCIEDADE INTERNACIONAL DE ARBORICULTURA. **A Poda de Árvores Adultas**. Estados Unidos. 2013. Disponível em: <<https://www.treesaregood.org/portals/0/docs/treecare/A%20Poda%20de%20Arvores%20Adultas.pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2019.

JEGUIRIM, M., LIMOUSY, L.. **Char and Carbon Materials Derived from Biomass**. Elsevier, 506 p., 2019.

KNUPP, A. M. **Desempenho de um sistema composto por um filtro anaeróbio e um “wetland” horizontal na produção de água para reuso predial a partir de água cinza clara.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 2013.

LI, F.; WICHMANN, K.; OTTERPOHL, R. **Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses.** The Science of the total environment, v. 407, n. 11, p. 3229-3449, Elsevier, 2009.

MACHADO, P. R. S.. **Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando aplicação industrial.** Palmas, 2019.

MÁRQUEZ-MONTESINO, F., CORREZ-MÉNDEZ, F., GLAUCO-SÁNCHEZ, C., ZANZI-VIGOUROUX, R., RUTIAGA-QUIÑONES, J. G., AGUIAR-TRUJILLO, L.. **Pyrolytic Degradation Studies of Acacia mangium wood.** Bioresources 10(10, 1925-1844, 2015.

MARSH, H.; RODRÍGUEZ-REINOSO, F. **Activated Carbon.** 1st Edition. Amsterdam: Elsevier, 2006.

MARTINS, C. H.. **O aproveitamento de madeiras das podas da arborização viária de Maringá/PR.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável. Mossoró – RN, 8(2), 257–267. 2013.

MAY, S.; **Caracterização, tratamento e reúso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações.** Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MCKENDRY, P.. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.** Bioresource Technology, 83(1), 37–46, 2002.

MENEZES, J. C. S. S. **Tratamento e reciclagem do efluente de uma lavanderia industrial.** Dissertação de Mestrado como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia – Área de Concentração Tecnologia Mineral / Metalúrgica Extrativa. Porto Alegre, RS. 2005.

MCLAUGHLIN, H.. **Understanding Air Purification and Activated Carbon Filters**. KootenayFilter, 2019. Disponível em <<https://kootenayfilter.com/carbon-filter-blog/understanding-air-purification-and-activated-carbon-filters/>> Acesso em 05 out. 2019.

MORAES, M. D. A., SILVA, M. F., BARBOSA, P. V. G., MARQUES, R., SILVA, R.T., JUNIOR, CARLOS, R. S.. **Characterization of Khaya ivorensis (A. Chev) biomass, charcoal and briquetes**. Scientia Forestalis, São Paulo, 2019.

MOURA, G. M. G.; Fernandez, F.N.. **Problemas Socioambientais e Estrutura Institucional da Gestao Urbana em Palmas (TO)**. Rev. Des. Reg. 17, 33-55, 2012

NACHENIUS, R.; RONSSE, F.; VENDERBOSCH, R.; PRINS, W.. **Biomass pyrolysis**. In: **advances in chemical engineering**, vol. 42. Burlington: Academic Press; 2013. p. 75–139.

NAKASHIMA. G. T., AKIYAMA, W. H., SANTOS, L. R. O., PADILLA, E. R. D., BELINI, G. B., VARANDA, L. D., PÁDUA, F. A., YAMAJI, F. M.. **Briquetes Produzidos a partir do aproveitamento de resíduos provenientes do aterro de resíduos inertes da cidade de Sorocaba**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 7, n. 2, p. 231-243, 2018.

NARSRIN, R. K.; CAMPBELL, M.; SANDI, G.; GOLAZ, J.; **Production of Micro- and Mesoporous Activated Carbon from Paper Mill Sludge**. Carbon 38, p. 1905-1915, Chicago, 2000.

NKWONTA, O. I., OLUFAYO, O. A., OCHIENG, G. M., ADEYEMO, J. A. OTIENO, F. A. O.. **Turbidity removal: Gravel and charcoal as roughing filtration media**. South African Journal of Science, 106(11/12), 2010.

PARI, L.; SUARDI, A.; LONGO, L., CARNEVALE, M.; GALLUCHI, F.. **Jatropha curcas, L. Pruning Residues for Energy: Characteristics of an Untapped By-Product**. Energies, 11(7), 1622, 2018.

PEDROZA, M. M.. **Bio-óleo e biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Ph.D. thesis. Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Química (PPGEQ). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2011.

PEDROZA, M. M.; SOUZA, J. F.; VIEIRA, G. E. G.; BEZERRA, M. B. D. **Bio-Oil and Biogas From the Pyrolysis of Sewage Sludge, and Non-Isothermal Degradation on Usy Zeolite**. Brazilian J. Pet. Gas 2017, 11 (3), 149–163

PEDROZA, M. M.; SOUZA J. F.; VIEIRA G. E. G., BEZERRA M.B.D., **Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor**, J. Anal. Appl. Pyrol. 105, 108–115, 2014.

PERS/TO. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH. **Relatório das 18 oficinas técnicas regionais de Palmas**. 2015a. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/265188/>>. Acesso em: 07 jan. 2019.

PREFEITURA DE PALMAS. **Manual de Arborização Urbana de Palmas-TO**. Disponível em: <http://www.palmas.to.gov.br/media/doc/22_11_2017_16_16_46.pdf>. Acesso em 06 dez. 2018.

RAMPELOTTO, G.. **Caracterização e tratamento de águas cinzas visando reuso doméstico**. Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

RATUCHNE, L. C., KOEHLER, H. S., WATZLAWICK, L. F., SANQUETTA C. R., SCHAMNE, P. A.. **Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais**. Floresta e Ambiente; 23(3): 450-462, 2016.

RODRIGUES, C. R.. **Degradação térmica da casca de arroz e utilização do carvão obtido no processo de polimento de águas cinzas**. 2019.

RODRIGUES, P. R. B.; PICANÇO, A. P.; SERRA, J. C. V.; GUARDA, E. A.; LIMA JUNIOR, A. S.. **Análise do potencial de reutilização dos resíduos provenientes de poda, município de Palmas, Tocantins**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, Aquidabã, v.6, n.1, p.269-284, 2015.

ROSS, S. M.. **Linear Regression. Introductory Statistics**. 537–60, 2010.

SARKAR, D. K.. **Fuels and Combustion. Thermal Power Plan**. 91–137, 2015.

- SIEGEL, A. F.. **ANOVA. Practical Business Statistics.** 467–490, 2012.
- SILVA, D. A.; ELOY, E.; CARON, B. O.; TRUGILHO, P. F.. **Elemental Chemical Composition of Forest Biomass at Different Ages for Energy Purposes.** *Floresta e Ambiente.* 26(4), 2019.
- SILVA, M. J. D.; RENOFIO, T. C. Z.; MARGUTT, M. C.. **A Reutilização dos Resíduos das Podas de Árvores e o Levantamento Regional dos tipos de Árvores.** In: Simpósio Internacional de Ciências Integradas. 4. Anais. Guarujá: Universidade de Ribeirão Preto, 2009.
- SOSTAR-TURK, S., PETRINIC, I., SIMONIC, M.. **Laundry wastewater treatment using coagulation and membrane filtration.** *Resour. Conserv. Recycl.* 44 (2), 185–196, 2005.
- SREBRENKOSKA, V.; ZHEZHOVA, S.; RISTEKI, S.; SASKA, G.. **"Methods For Waste Waters Treatment in Textile Industry"**, International Scientific Conference, vol. III, pp. 248-252, 2014.
- STEPHEN, J. A.; GAN, Q.; MATTHEWS, R.; JOHNSON, A. **Mass transfers processes in the adsorption of basic dyes by peanut hulls.** *Industrial Engineering Chemical Research*, v. 44 p. 1942-1949, 2005.
- TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F. L., STENSEL, H. D.. **Wastewater Engineering. Treatment and Reuse.** Metcalf&Eddy (ed.), 4ª Edição, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, ISBN 0-07-112250-8. 2003.
- TORRES-LOZADA, P., AMEZQUITA-MARROQUÍN, C. P., AGUDELO-MARTÍNEZ, K. D., ORTIZ-BENÍTEZ, N., MARTÍNEZ-DUCUARA, D. S.. **Evaluation of turbidity and dissolved organic matter removal through double filtration technology with activated carbon.** *DYNA*, 85(205), 234–239, 2018.
- VALE, A. T., SARMENTO, T. R., ALMEIDA, A. N.. **Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília, DF.** *Ciênc. Florest.*, vol.15, n.4, pp.411-420, 2005.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, 72p. 2012.

VIEIRA, G. E. G. **Fontes alternativas de energia – Processo aperfeiçoado de conversão térmica.** 2004. 181 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2004.

VOLOCH, L. **Carbonização de resíduos sólidos urbanos como alternativa de tratamento e geração de energia: viabilidade de aplicação no município de Londrina-PR.** Londrina, 2012.

VOLTAN, P. E. N.; DANTAS, A. D. B.; PASCHOALATO, C. F. R.; DI BERNARDO, L.. **Predição da performance de carvão ativado granular para remoção de herbicidas com ensaios em coluna de escala reduzida.** *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(2), 241–250, 2016.

WHO-ROEM - World Health Organization – Regional Office for the Eastern Mediterranean. **Overview of greywater management: Health considerations.** 2006. Disponível em: <<http://applications.emro.who.int/dsaf/dsa1203.pdf>> Acesso em 07 de fev. 2019.

YANG, R. T. **Adsorbents – Fundamentals And Applications.** 1 ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2003.