



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

LEONARDO HENRIQUE DIAS NEVES

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO VISANDO A
OBTENÇÃO DE BIO-ÓLEO E CARVÃO ATIVADO**

**Palmas – TO
2019**

LEONARDO HENRIQUE DIAS NEVES

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO RESÍDUO DE PODAS DE ÁRVORES DO
PERÍMETRO URBANO DE PALMAS E UTILIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO
OBTIDO NO PROCESSO PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS**

Dissertação Final apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental (Saneamento Ambiental).

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

**Palmas – TO
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

N518d Neves, Leonardo Henrique Dias.
Degradação Térmica de Resíduo Sólido Urbano visando a obtenção de bio óleo e carvão ativado. / Leonardo Henrique Dias Neves. – Palmas, TO, 2020.
82 f.
Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Ambiental, 2020.
Orientador: Marcelo Mendes Pedrozi
1. Bio Óleo. 2. Carvão Ativado. 3. Energia. 4. Pirólise. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

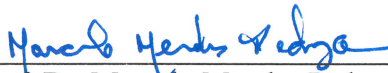
LEONARDO HENRIQUE DIAS NEVES

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO RESÍDUO DE PODAS DE ÁRVORES DO
PERÍMETRO URBANO DE PALMAS E UTILIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO
OBTIDO NO PROCESSO PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS**

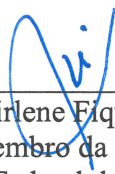
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, foi avaliada para obtenção do título em Mestre em Engenharia Ambiental em 11 de novembro de 2019, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data da Aprovação: 11 de Novembro de 2019.

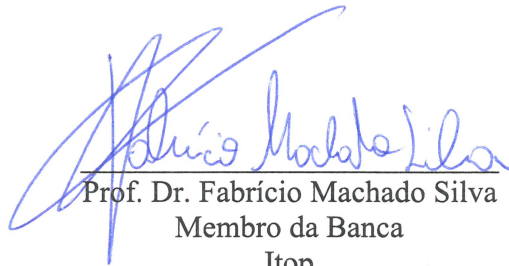
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador e Presidente da Banca
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



Prof. Dr. Girlene Figueiredo Maciel
Membro da Banca
Universidade Federal do Tocantins - UFT



Prof. Dr. Fabrício Machado Silva
Membro da Banca
Itop

Palmas – TO
Novembro/2019

Dedico

*A **Deus**, pois entendo que ele é o autor da vida, da criatividade, da inspiração humana e meu sustento nos momentos de dificuldade.*

*A minha amada esposa **Savana Maiara Sanches Pires Neves**, pelo amor, compreensão e estímulo.*

*Aos meus filhos **Pedro Henrique Sanches Neves e Ana Sofia Sanches Neves**, pelos sorrisos e abraços generosos.*

*Aos meus pais **Raimundo Pereira Neves e Maria de Fátima Dias Neves**, pela vida, amor e dedicação.*

*Aos meus irmãos **Gustavo Henrique Dias Neves e Anne Caroline Dias Neves**, pelas palavras de incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Á **Deus** pela vida, pela permissão a mim concedida de finalizar mais essa etapa, e por estabelecer seus fundamentos de fé, amor e gratidão, que me permitiram ter a certeza do seu apoio em cada momento de dificuldade e a percebê-lo nos momentos de alegria.

Á minha esposa **Savana Maiara Sanches Pires Neves**, pessoa escolhida por Deus em sua infinita sabedoria para estar ao meu lado, por me ajudar, me incentivar principalmente nos momentos de incertezas e por contribuir de forma positiva ao longo de mais uma jornada. Sem você essa conquista não seria possível. Amo-te.

Aos meus pais **Raimundo Pereira Neves e Maria de Fátima Dias Neves**, por não medirem esforços para me ajudar, por todo o carinho e amor a mim dedicados.

Ao meu orientador e amigo **Professor Doutor Marcelo Mendes Pedroza**, pela paciência, pelo suporte, pelos ensinamentos, pela preocupação e pelo tempo dedicado a me orientar. É comum a expressão entre a maioria dos seus alunos, e com certeza na totalidade de seus orientandos quando dizem que você certamente é diferente de todos os outros docentes com quem conviveram. Você é uma grande referência! Obrigado pela dedicação, esforço e cuidado.

Ao corpo docente do **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins**, pelo conhecimento transmitido.

Ao **Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO)**, campus Palmas, por todo o suporte e apoio no desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Ao **Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética do IFTO (LARSEN)**, pelo apoio em todas as fases desta pesquisa. Muito obrigado a toda a equipe!

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa. Deixo aqui o meu muito obrigado e a minha disposição para retribuir de alguma forma todo apoio recebido.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi obter, através do processo de pirólise de poda de árvores, carvão para uso na remoção de poluentes presentes em águas cinzas. A biomassa foi caracterizada por análises imediatas e instrumentais (Análise Elementar, Lignina, Celulose e Hemicelulose, Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV, Espectroscopia no Infravermelho e Análise Termogravimétrica). A planta pirolítica em escala de laboratório consiste em um reator de aço inoxidável aquecido em forno fixo com inclinação, com nitrogênio sendo usado como gás de arraste. Nos testes de pirólise do material foram estudadas as seguintes variáveis de processo: temperatura da reação (360 a 640 °C) e taxa de aquecimento (23 a 37 °C / min). O carvão obtido durante o processo foi caracterizado por técnicas analíticas clássicas e instrumentais, sendo utilizado em coluna de filtração de água cinza e teste de adsorção de corante. Nesta investigação, foi proposto o tratamento de água cinza pelas seguintes etapas da série: (a) coagulação / floculação, (b) decantação, (c) filtração de areia e (d) coluna de filtração de carvão. O rendimento máximo de carvão foi de 60,10% obtido a 360 °C e a taxa de aquecimento de 30 °C / min. Mostrou-se eficiente para a remoção do azul de metileno em fluxos líquidos iguais a 2 e 5 mL / min. O polimento com água cinza utilizando o carvão obtido do processo de pirólise da poda das árvores foi eficiente na remoção dos parâmetros analíticos estudados. Para os parâmetros de turbidez, DQO, sólidos totais e cloro residual, os valores de remoção foram 99, 98, 71 e 100%, respectivamente. A coluna de filtro contendo o carvão de poda das árvores foi responsável pela etapa final da remoção da matéria orgânica com um odor característico de água cinza.

Palavras-chaves: Bio-óleo, Carvão Ativado, Energia, Pirólise.

ABSTRACT

The objective of this work was to obtain, through the tree pruning pyrolysis process, coal to be used in the removal of pollutants present in gray waters. Biomass was characterized by immediate and instrumental analysis (elemental analysis, lignin, cellulose and hemicellulose, scanning electron microscopy - SEM, infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis). The laboratory scale pyrolytic plant consists of a fixed bed reclining furnace heated stainless steel reactor with nitrogen being used as carrier gas. In the pyrolysis tests of the material the following process variables were studied: reaction temperature (360 to 640 °C) and heating rate (23 to 37 °C / min). The coal obtained during the process was characterized by classical and instrumental analytical techniques, being used in a gray water filtration column and dye adsorption test. In this investigation it was proposed the treatment of gray water by the following series steps: (a) coagulation/ flocculation, (b) decantation, (c) sand filtration and (d) coal filtration column was 60.10% obtained at 360 °c and heating rate of 30 °C/min. The coal from this research proved to be efficient for the removal of methylene blue in liquid flows equal to 2 and 5 ml / min. The gray water polishing using the coal obtained from the tree pruning pyrolysis process was efficient in the removal of the studied analytical parameters. for turbidity, cod, total solids and residual chlorine parameters, the removal values were 99, 98, 71 and 100 %, respectively. The filter column containing the tree pruning charcoal was responsible for the final step of removing organ matter with a characteristic odor of gray water.

Keywords: Bio-oil, Activated Carbon, Energy, Pyrolysis.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho Esquemático de Componentes Arbóreos	24
Figura 2 - Material Triturado no aterro de Palmas, para uso em compostagem	27
Figura 3 - Reutilização de Troncos em mobiliários urbanos.....	28
Figura 4 - Pirólise de Biomassa.....	30
Figura 5. Aproveitamento de Resíduos por aplicação de Rota Termoquímica	32
Figura 6 - Dados populacionais do município de Palmas-TO.....	35
Figura 7 - Quantitativo de RSU (doméstico e comercial) e podas de árvores	36
Figura 8 – Obtenção dos Resíduos das Podas de Árvores- Palmas.....	37
Figura 9 – Obtenção de resíduos de poda de árvores em Palmas – TO	38
Figura 10 - Preparação de amostras: (a) amostra bruta e (b) amostra após secagem.....	39
Figura 11 – Briquetes de resíduos de poda de árvore.....	40
Figura 12 - Reator de leito fixo empregado nos experimentos de pirólise de biomassa	41
Figura 13 - Representação do planejamento experimental utilizado na pirólise de poda de árvores (Delineamento composto central rotacional 2 ²).....	42
Figura 14 - Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de poda de árvores	43
Figura 15 - Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de poda de árvores	44
Figura 16 - Análise espectrofotométrica do corante após sistema de filtração	45
Figura 17 - Sistema de filtração de águas cinzas, contendo dois filtros em série	46
Figura 18 - Material retido após análise de material volátil de amostra de poda de árvores ..	48
Figura 19 - Cinética de perda de massa da biomassa a 40 °C	49
Figura 20 - Cinética de perda da biomassa a 50 °C.....	50
Figura 21 - Curva termogravimétrica de amostra de poda de árvore	51
Figura 22 - Curva termogravimétrica de amostra de poda de árvore	53
Figura 23 - Representação do Diagrama de Pareto obtido do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) obtidos para a produção de carvão durante a pirólise de poda de árvores	57
Figura 24 - Valores observados versus previstos, para a obtenção de carvão a partir da pirólise da poda de árvore.....	59
Figura 25 – Superfície de Resposta para a obtenção de carvão a partir da pirólise de poda de árvores, com os fatores Temperatura e Taxa de aquecimento do sistema.....	60
Figura 26 – Curvas de contorno para a produção de carvão a partir da pirólise de poda de árvore	60
Figura 27 – Análise cromatográfica (CG-EM) do bio-óleo da poda de árvores	61
Figura 28 – Percentual de áreas dos cromatogramas em função dos grupos funcionais dos constituintes do bio-óleo.....	63
Figura 29 – Mecanismo de formação de hidrocarbonetos poliaromáticos no bio-óleo	64
Figura 30. Microscopia eletrônica de varredura de carvão de pirólise (Ampliação 500x)	69
Figura 31. Microscopia eletrônica de varredura de carvão de pirólise (Ampliação 1000x) ...	69
Figura 32. Eficiência de remoção do corante azul de metileno em filtro de carvão pirólítico de poda de árvores	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Elementar da Madeira.....	25
Tabela 2 - Rendimentos obtidos em diversos tipos de pirólise de madeira.....	31
Tabela 3 - Condições experimentais empregadas nos testes de pirólise de poda de árvores ..	40
Tabela 4 - Níveis dos Fatores que foram empregados no Planejamento Experimental, durante a Pirólise de poda de árvores	42
Tabela 5 - Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2.....	42
Tabela 6 - Métodos analíticos aplicados na caracterização de águas cinzas e efluente	46
Tabela 7 - Análises imediatas do material orgânico bruto	47
Tabela 8 - Dados de rendimento de carvão obtidos durante os ensaios de pirólise de poda de árvores	54
Tabela 9 - Dados de rendimento de líquidos obtidos durante os ensaios de pirólise de poda de árvores	54
Tabela 10 - Análise estatística através do <i>Teste-t</i> simulando variâncias equivalentes para a produção de carvão em ensaios de pirólise de poda de árvores	55
Tabela 11 - Análise estatística através do <i>Teste-t</i> simulando variâncias equivalentes para a produção de líquidos em ensaios de pirólise de poda de árvores	55
Tabela 12 - Resultados do Planejamento 2 ² Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) obtidos para a produção de carvão durante a pirólise de poda de árvores	56
Tabela 13 - Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2 ² obtidos da produção de carvão em sistema de pirólise de poda de árvores, em intervalo de 95% de confiança	58
Tabela 14 - ANOVA para a produção de carvão em processo de pirólise de poda de árvores	58
Tabela 15 - Principais compostos orgânicos presentes no bio-óleo obtido em reator de leito fixo a 550 °C.....	62
Tabela 16 - Valores de pH e densidade de amostras de bio-óleo obtidas nessa pesquisa	65
Tabela 17 - Análises imediatas e Análise elementar das amostras de carvão	67
Tabela 18 - Resultados obtidos durante o polimento com água cinza em um sistema de filtração contendo carvão ativado produzido a partir de pirólise de poda de árvores	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional das Águas

ASTM - American Society for Testing and Material

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CF- Teor de Carbono Fixo

CG/EM – Cromatografia Gasosa Acoplada a Espectrometria de Massa

CNH- Análise Elementar de Carbono, Nitrogênio e Hidrogênio

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFTO- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

FTIR- Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

LARSEN- Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética

MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Normas Brasileiras

ONU – Organização das Nações Unidas

PCS- Poder Calorífico Superior

pH- potencial Hidrogeniônico

TG- Análise Termogravimétrica

UFRN- Universidade Federal do Rio Grande do Norte

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. JUSTIFICATIVA.....	17
3. OBJETIVO	18
3.1 Objetivo Geral	18
3.2 Objetivos Específicos.....	18
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
4.1 O Resíduo Sólido Urbano (RSU)	19
4.2 Manejo e Gerenciamento de Podas de Árvores em Perímetros Urbanos.....	20
4.3 Caracterização e Composição dos Resíduos Orgânicos	23
4.4 Aproveitamento Residual de Podas de Árvores.....	26
4.4.1 Reintegração dos Ciclos Biogeoquímicos.....	26
4.4.2 Reutilização	27
4.4.3 Reaproveitamento Energético – Briquetagem.....	28
4.4.4 Produção de Carvão Ativado	29
4.5 Tecnologia Verde de Despoluição de Efluente (Filtro de Carvão Ativado)	33
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
5.1 Caracterização da Área Urbana de Pesquisa.....	35
5.2 Obtenção e Procedimentos dos Resíduos das Podas de Árvores- Palmas (TO).....	37
5.3 Cinética de perda de massa de amostras.....	39
5.4 Preparação de briquetes a partir de amostra de Poda de Árvore	39
5.5 Ensaio de pirólise.....	40
5.6 Pirólise de poda de árvores em reator de leito fixo – Testes Iniciais.....	40
5.7 Pirólise de poda de árvores – Planejamento Experimental DCCR	41
5.8 Caracterização físico-química do bio-óleo e carvão.....	43
5.9 Teste de Adsorção de Corante em filtro de carvão.....	43
5.10 Remoção de poluentes de águas cinzas utilizando filtro de areia e carvão obtido da pirólise de poda de árvores.....	45
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
6.1 Caracterização Química da Biomassa.....	47
6.1.1 Análise Imediata.....	47
6.1.2 Cinética de Perda de Massa	49

6.1.3	Análise Termogravimétrica	50
6.1.4	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR).....	52
6.2	Degradação Térmica dos Resíduos de Podas de Árvores (testes iniciais).....	53
6.3	Rendimentos de carvão obtidos durante a pirólise de poda de árvores	56
6.4	Determinação das características dos produtos da pirólise de podas de árvores.....	61
6.4.1	Características do Bio-óleo.....	61
6.4.2	Características do carvão obtido na pirólise de poda de árvores	66
6.5	Estudo da remoção de corante em filtro de carvão obtido durante a pirólise de poda de árvores.....	70
6.6	Produção de carvão ativado a partir da poda de árvores em Palmas (Tocantins)	36
6.7	Eficiência do carvão ativado obtido da poda de árvores no tratamento de água cinza	71
7.	CONCLUSÃO	72
8.	REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

A busca pelo crescimento econômico traz consigo na mesma escala o crescimento urbano e o populacional, que por sua vez geram várias demandas gerenciais entre elas as interferências ambientais, onde os recursos naturais são exauridos e o poder de recomposição da natureza são reduzidos (LIMA, LOPES e FAÇANHA, 2019).

Os chamados Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), também denominados como lixo urbano, de acordo com a NBR 10.004 de 2004, são definidos como resíduos resultantes das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

A expansão territorial e econômica dos centros urbanos vem intensificando essas atividades, e com isso gerando um dos maiores problemas da atualidade que é o aumento expressivo da geração do RSU, decorrente dentre outros fatores, da destinação inadequada dos materiais produzidos. (COSTA, 2011).

O conceito de saneamento utilizado pela Organização das Nações Unidas (ONU), consiste na provisão de instalações e serviços para o gerenciamento e o descarte de resíduos líquidos e sólidos gerados por atividades humanas. Segundo a lei de diretrizes nacionais do saneamento básico - Lei nº 11.445 de 2007, inclui nos componentes do saneamento básico, além do esgotamento sanitário, o abastecimento de água, a limpeza urbana, a drenagem, o manejo de águas pluviais e o manejo de resíduos sólidos (ANA, 2019).

Os estudos realizados pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, pela Fundação Nacional de Saúde (Funasa) e do Ministério da Saúde (2019), ressaltam que a ausência de uma gestão eficaz ou uma cadeia de produção incompleta dos resíduos sólidos contribui consideravelmente para o impacto ambiental nos recursos naturais e para a poluição e contaminação dos ecossistemas, além de danos diretos à saúde humana.

A quantidade de RSU coletado no Brasil em 2016 foi de 71,3 milhões de toneladas, apontando que o índice de alcance da coleta atingiu 91 % para o país, um modesto progresso se comparado ao ano antecedente, no qual aponta que 7 milhões de toneladas de RSU não foram coletadas, e, portanto, foram parar em destinos inadequados (ABRELPE, 2016).

Segundo os levantamentos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA (2012), tem-se um total geral estimado de matéria orgânica coletada de 94.309,5 t/dia no ano de 2010,

desses apenas 1,6% são destinados para unidades de compostagem, sendo o restante encaminhado para outros destinos finais.

No Brasil, não se pode dizer que os aterros sanitários recebam apenas rejeitos. Na realidade, o que ocorre ainda é a disposição final de qualquer resíduo em solo, sendo as principais formas os lixões, aterros controlados e aterros sanitários (IPEA, 2012).

Inúmeros profissionais e cientistas da área de engenharia civil, ambiental, química e sanitária relatam que o resíduo orgânico, por não ser coletado e segregado de forma segura do ponto de vista classificatório (resíduo urbano público – NBR 10004) acaba sendo encaminhado para disposição final junto com os resíduos perigosos. Este gargalo técnico e gerencial gera despesas que poderiam ser evitadas caso a matéria orgânica fosse separada na fonte e encaminhada para um tratamento específico, além de impactos ambientais em toda a cadeia do ciclo dos materiais dos resíduos (MASSUKADO 2008).

A Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) enfatiza que a destinação final ambientalmente adequada deve ocorrer com o aproveitamento dos materiais orgânicos, bem como energéticos.

Dos resíduos orgânicos pode-se produzir uma quantidade substancial de energia, pois globalmente estão neles contidas várias toneladas de biomassa. No entanto, estes resíduos são muitas vezes subaproveitados do ponto de vista das suas potencialidades para valorização energética, em especial os resíduos verdes urbanos representando uma enorme perda de recursos (PEREIRA, 2013).

Breulmann et al., (2017) e Silva (2018) apresentam sistemas de conversão e valorização de materiais orgânicos em processos de degradação térmica, o que é considerado promissor pois recupera a energia potencial e desenvolve produtos com caráter sustentável incrementando a matriz energética e ampliando a diversidade industrial, o que corrobora com a Resolução CONAMA nº 316 de 29 de outubro de 2002 (BRASIL, 2002).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2016) no Brasil, em 2015, a lenha e o carvão vegetal representaram 8,6% da matriz energética. A lenha e o carvão, apesar de serem produtos dependentes do preço das fontes de energia não-renováveis e das modificações de padrões de consumo têm, atualmente, e continuarão a ter no futuro, uma grande importância em nossa matriz energética.

Segundo Rodrigues (2019), as águas cinzas são aquelas provenientes dos lavatórios, chuveiros, máquinas de lavar roupa e louça, sendo necessária a sua desinfecção para garantir a segurança quanto à reutilização, em especial em aplicações com potencial exposição humana. O carvão ativado, obtido após a degradação térmica é capaz de ser um adsorvente no tratamento

de águas cinzas, visto que o reuso destas águas residuárias não exige atender padrões de potabilidade hídrica (NBR 13969/1997), contudo é extremamente importante para conservação dos recursos hídricos pois podem ser empregados em sistemas de irrigação de jardins, lavagem de pisos diversos e veículos automotivos, na descarga dos vasos sanitários, na manutenção paisagística, dentre outros. A norma supracitada descreve no item 5.6 o reuso de efluentes de origem essencialmente doméstica ou que possua características similares ao efluente doméstico, assim o esgoto tratado.

A Resolução CONAMA nº. 357 de 17/03/2005 (BRASIL, 2005), somada à CONAMA nº 430 de 13/05/2011 (BRASIL, 2011), e a COPAM/CERH-MG de 05/05/2008 (MINAS GERAIS, 2008) estabelecem os níveis de emissão de poluentes para descarte em um corpo hídrico receptor, sem alterar a sua qualidade. Ademais, os danos causados à saúde humana, relacionados com os tratamentos inadequados dos efluentes, de uma forma geral, têm provocado o surgimento de leis de proteção ao meio ambiente, cada vez mais rígidas, e conseqüentemente uma procura por técnicas de tratamento de efluentes mais eficazes e de custos aceitáveis (VON SPERLING, 2005).

Assim, esta pesquisa, aplicou o processo de degradação térmica nos resíduos da poda de árvore advindos do perímetro urbano do município de Palmas, por meio do reator pirolítico de leito fixo para obter produtos renováveis com qualidade e efetividade, estabilidade na composição e propriedades físico-químicas recomendadas pelas empresas que controlam o mercado de combustíveis, quanto para tratamento e reutilização de águas cinzas.

2. JUSTIFICATIVA

Atualmente, um dos grandes desafios da sociedade é o uso eficiente de energia. O petróleo tem sido a principal matéria-prima para a geração de energias não renováveis, que são a base da atual matriz energética mundial, principalmente após a revolução industrial. Mudanças climáticas em escala global, podem ser ocasionadas pelas emissões de gases de efeito estufa oriundos do uso dessas fontes não renováveis, causando grande impacto ambiental. É de fundamental importância a busca por fontes de energia alternativas para a preservação do planeta, em especial as renováveis (BRIDGWATER, 2001).

Segundo o Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Água (2015), caso não haja melhora na gestão desse recurso natural, estima-se que até 2030 a população mundial enfrentará um déficit de água de 40%, onde atualmente 748 milhões de pessoas ainda não possuem acesso à água potável. Portanto, com a crescente demanda dos recursos hídricos para satisfazer às necessidades da população, o problema em relação à escassez de água aumentará expressivamente (COUTO et al., 2015).

Com o problema de escassez de água, os estudos sobre o reúso desse recurso natural foram intensificados, destacando como fonte alternativa o reúso de água cinza (BLANKY et al., 2015). Segundo Li, Wichmann e Otterpohl (2009), essas águas são provenientes dos chuveiros, dos lavatórios, da pia de cozinha e da máquina de lavar roupas, representando em torno de 50 a 80% da água residual produzida em uma edificação.

No Brasil, esse valor pode variar em torno de 36% (BARRETO, 2008). Os volumes são consideráveis e podem representar uma redução no consumo de água potável, caso seja praticado o reúso. A conservação da água e o reúso são ferramentas eficazes na preservação dos recursos hídricos.

Diante dessa problemática, materiais com um potencial poluidor ao meio ambiente como os resíduos de poda de árvores, surgem como uma solução alternativa e sustentável por meio da pirólise, pois se trata de um processo de conversão energética da biomassa por meio da degradação térmica de seus componentes, na ausência parcial ou total de oxigênio em temperaturas que variam entre 300 e 1000°C, gerando produtos renováveis e inovadores, tais como o bio-óleo, gases e o carvão, ambos com grande potencial energético. O carvão obtido no processo pode ser utilizado na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas de efluentes, substituindo o carvão ativado comercial

3. OBJETIVO

3.1 Objetivo Geral

Produzir carvão ativado a partir da degradação térmica de podas de árvores para aplicar como adsorvente no tratamento de águas cinzas

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar as características físico-químicas do resíduo de podas de árvores;
- Caracterizar as fases líquida e sólida produzidas a partir do processo pirolítico;
- Estudar a remoção de corantes em filtro de adsorção empregando-se o carvão ativado pro reator de leito fixo;
- Avaliar a remoção de poluentes em coluna de filtração utilizando o carvão obtido no processo de pirólise de podas de árvores.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 O Resíduo Sólido Urbano (RSU)

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), chamados comumente de “lixo”, apresentam a seguinte determinação segundo a NBR 15849 ABNT (2010): “resíduo que, em similaridade com o que foi definido na Resolução CONAMA 404/2008, sejam originários de domicílios, serviços de limpeza urbana, micros estabelecimentos comerciais, industriais e de fornecimento de trabalhos, que se encontra integrados no serviço de coleta regular de resíduos”.

No Brasil, o serviço de limpeza urbana iniciou-se oficialmente em 25 de novembro de 1880, na cidade de São Sebastião do Rio de Janeiro, até então capital do Império. Através do Decreto nº 3024, assinado pelo Imperador Dom Pedro II, aprovando o contrato de "limpeza e irrigação" da cidade, que foi executado por Aleixo Gary e, mais tarde, por Luciano Francisco Gary, de cujo sobrenome origina-se a palavra gari, que hoje denomina-se os trabalhadores da limpeza urbana em muitas cidades brasileiras (MONTEIRO. et al, 2001).

Segundo a Norma Brasileira NBR 10004, esses resíduos são compostos principalmente de papel, papelão, plásticos, vidros, metais, têxteis, restos de comidas, podas de árvores, resíduos de jardins e resíduos agrícolas. Como tal, os resíduos contêm uma proporção elevada de materiais renováveis que podem serem utilizadas para recuperação de energia ou para a produção de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Segundo dados obtidos na literatura, são gerados em todo o mundo a cada ano grandes quantidades de RSU, e estima-se que a geração mundial de RSU atinja 2 bilhões de toneladas até 2025. Atualmente adota-se que a geração de RSU é de 1,3 bilhão de toneladas por ano (BERNARDI, 2014).

Cerca de 30 milhões de toneladas de RSU são depositados em lixões ou aterros controlados todos os anos no nosso país. Isso representa 42% do total coletado no país, percentual que cai para 23% no estado de São Paulo, conforme dados de 2015 apresentados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2015).

Entre 2008 e 2015, o Brasil deveria erradicar 862 lixões; entre 2015 e 2020 seriam 668; e entre 2020 e 2030, os 1.280 lixões restantes. Desta forma, a partir de 2030, o Brasil não teria mais lixões como forma de disposição final dos resíduos. De acordo com levantamento em 2010, o Brasil possuía 1.641 municípios com lixões. Isto significa que em dois anos teria havido uma redução de 40% na quantidade de municípios com lixões, e em números absolutos foram

extintos 1.169 lixões. Analisando sob a ótica das macrorregiões, tem-se que a região Centro-Oeste obteve 50% da redução no número de lixões, a região Nordeste 46%, a região Norte 32%, a região Sul 30% e a região Sudeste 26% (ABRELPE, 2010).

Entre 2014 e 2015, a população brasileira aumentou 0,8%, enquanto a geração total de resíduos sólidos aumentou 1,7%, segundo apurado pelo IBGE e em pesquisa realizada pela Abrelpe (ABRELPE, 2015). Os números associados à geração de RSU mostram que no ano de 2016 houve uma pequena queda em relação à quantidade gerada no ano anterior, passando agora para cerca de 78,3 milhões de toneladas no país, (ABRELPE, 2016).

Conforme a norma brasileira NBR 8419 ABNT (1992), aterro sanitário é um “método de distribuição de RSU no solo, sem proporcionar problemas à segurança e à saúde pública, diminuindo os danos ambientais, técnica essa que usa conceitos de engenharia para restringir os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor tamanho que permita sua permeabilidade, cobrindo-os com uma camada de terra sempre que concluída a jornada diária de trabalho, ou em tempo mais curto se preciso”.

A gestão do município de Palmas realiza os serviços de coleta, o tratamento e a destinação final do lixo, sem que haja um processo de seleção ou reciclagem antes de ser levado ao aterro sanitário da cidade.

O aterro sanitário de Palmas recebe em torno de 125 toneladas de lixo por dia, entre domiciliar e hospitalar, e o tratamento é de biogásificação por decomposição do lixo orgânico (SMIFSP, 2018). De acordo com dados alcançados através da balança do aterro obteve-se a quantia de 61.020.250 kg de resíduos sólidos domésticos no período determinado na pesquisa que foi de agosto/2017 a março/2018, totalizando-se oito meses.

4.2 Manejo e Gerenciamento de Podas de Árvores em Perímetros Urbanos

A maioria dos municípios brasileiros apresenta dificuldade de gestão do RSU, devido à sua complexidade e abrangência. Nem sempre a realização adequada do manejo dos resíduos da arborização urbana é prioridade nas agendas municipais (MEIRA, 2010).

Em 2014, os resíduos da arborização urbana do município de Goiana (PE) corresponderam a 1,41 % dos RSU enviados as unidades de processamento. Em Jaboatão dos Guararapes (PE), 1,48 % dos resíduos sólidos urbanos tiveram como fonte geradora arborização urbana (SNSA, 2016). O descarte dos resíduos da arborização, nos aterros sanitários ou em outros locais de destinação, representa um elevado custo para os municípios brasileiros. Além

de ser um desperdício de material com potencial energético para ser aproveitado na indústria ou em domicílios (MARTINS, 2013).

Em 2010, o custo médio do descarte dos resíduos da arborização urbana nos aterros sanitários foi de R\$ 68,00/t, no Estado de São Paulo (MEIRA, 2010). Em João Pessoa (PB), este custo corresponde a R\$ 200,00/t para o aterro sanitário metropolitano de João Pessoa (EMLUR, 2016).

De 2008 a 2014, o município de João Pessoa (PB) gerou um total acumulado de 127.103 ton de resíduo da arborização urbana. Segundo o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de João Pessoa, até 2022, os resíduos da arborização urbana deverão ir para uma central de triagem, competindo a EMLUR (Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana de João Pessoa – PB) a destinação adequada (EMLUR, 2014).

A diminuição dos resíduos dispostos nos aterros sanitários, como a adoção de políticas públicas como a reciclagem, compostagem e consumo consciente, além de economizar o resgate de matérias-primas na natureza, também contribuem para o aumento da eficiência energética de cada tipo de material e redução do uso de combustíveis não renováveis (IPCC, 2007; NIZAMI, REHAN, et al., 2017). Para o cálculo da capacidade de armazenamento deve-se considerar a vida útil, que conforme a NBR 13.896/97, alínea “f”, do item 4.1.1, para um aterro sanitário, é de no mínimo 10 anos.

Reichert e Mendes (2014) estudaram a Avaliação do Ciclo de vida (ACV) e apoiam seu uso nas tomadas de decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos, considerando as metas de redução de disposição de resíduos orgânicos em aterro estabelecidas pelo PNRS: 60% para a região Sul até 2031.

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2008), revelou que na região Norte do Brasil, 32,7% dos municípios sofreram inundações e/ou alagamentos pela destinação inadequada de resíduos sólidos. Constitucionalmente, compete ao poder público municipal o gerenciamento dos RS que são produzidos nas cidades. Tal manejo compreende os serviços de coleta, limpeza pública, assim como a destinação final (IBGE, 2010).

A maioria dos resíduos provenientes das podas urbanas são descartados em locais impróprios como lixões e aterros sanitários. Nestes locais misturam-se com os outros resíduos sólidos, que podem conter substâncias perigosas e materiais biológicos biodegradáveis, que interagem química e biologicamente, causando impactos na qualidade do ar, do solo e da água. A disposição final de resíduos sólidos em locais inapropriados torna-se uma fonte de poluição e contaminação da área de influência direta do descarte, depreciando a qualidade ambiental dos

recursos hídricos e contribuindo para a piora da qualidade ambiental local (LOPES, 2007; WANG, LI, et al., 2018).

Assim, esses resíduos quando acumulados, de maneira inadequada, além de causar problemas de poluição, caracterizam também um desperdício de matéria orgânica que poderia ser reutilizada (BARATTA JÚNIOR; MAGALHÃES, 2010).

A matéria orgânica presente na massa de resíduos é degradada gradualmente por um grupo de bactérias, em condições anaeróbias (CATAPRETA e SIMÕES, 2016). Como resultado dessa degradação temos a geração de um efluente com grande quantidade de água, compostos nitrogenados e carga orgânica elevada, além de um biogás composto por substâncias com alto poder danoso ao meio ambiente local e todos os meios receptores dessa carga poluidora (CHRISTENSEN e KJELDSEN, 1989; KJELDSEN, BARLAZ, et al., 2002).

A arborização urbana envolve qualquer forma de vegetação localizada nos espaços livres urbanos, sendo elementos construtivos da paisagem (SÃO PAULO, 2015). A poda é uma das práticas mais importantes na manutenção de árvores urbanas. Consiste na remoção de galhos, inflorescências ou folhagens, com a finalidade de promover o desenvolvimento adequado da planta. Se for bem conduzida pode reduzir danos causados por vento, ataques de insetos, problemas de doenças e melhorar a arquitetura da copa. A remoção imediata de ramos quebrados ou mortos é uma forma de prevenir problemas futuros por meio da poda (PAUP, 2016).

Conforme o Plano de Arborização Urbana de Palmas (2016), os tipos de podas são classificados para melhor manejo e aproveitamento deste resíduos conforme suas potencialidades, sejam eles:

- Poda de formação e Condução: são utilizadas para melhorar a aparência ou o valor estético da planta, inclui a remoção de galhos mortos, danificados ou fracos, remoção de alguns ramos laterais ou terminais visando restaurar ou reparar o equilíbrio da copa. Durante esta prática deve-se ter cuidado quanto à definição das três galhas (pernadas) a uma altura mínima de 1,40m, observando as características do tipo de crescimento simpodial ou monopodial;

- Poda de limpeza: consiste na remoção de galhos e ramos desnecessários, enfraquecidos pelo estresse ambiental ou quebrados pela ação do vento. Evita sérios danos através da melhoria na aeração, pois permite que o ar circule livremente através da copa, além de reduzir o desenvolvimento de doenças fúngicas nas folhas e no tronco. É uma poda realizada para manter a árvore saudável e evitar problemas futuros;

- Poda de correção: Algumas árvores crescem muito próximas a residências e necessitam de poda para evitar danos aos imóveis, equipamentos públicos ou à própria árvore. A poda de correção tem a finalidade de remover os galhos possam causar danos a propriedades, além de equilibrar a árvore e eliminar galhos baixos que estejam interferindo na passagem de pessoas ou veículos;

- Poda de adequação: A poda de adequação deve ser aplicada para solucionar possíveis conflitos entre a arborização e a rede elétrica. Este tipo de intervenção consiste na poda de galhos que estejam tocando ou na iminência de tocar a rede elétrica, visando garantir que o sistema elétrico opere de forma segura. Este tipo de poda só deverá ser realizado pela concessionária de energia elétrica ou pessoal habilitado e qualificado para esta finalidade.

Quanto ao gerenciamento dos resíduos provenientes de podas na área urbana de Palmas deverá ser realizado pela Prefeitura Municipal ou pela concessionária de energia, nos casos em que haja necessidade de intervenções por parte da empresa (PAUP, 2016).

Diante as alternativas para destinação dos resíduos verdes provenientes de podas do plano supramencionado recomenda-se a trituração, compostagem, doação para confecção de artesanato ou móveis, doação para uso energético.

Por isso a poda de árvores, é considerada como Resíduos Sólidos Urbanos Úmidos não deve ser enviadas para o aterro, pois podem ser reaproveitados para inúmeras funcionalidades.

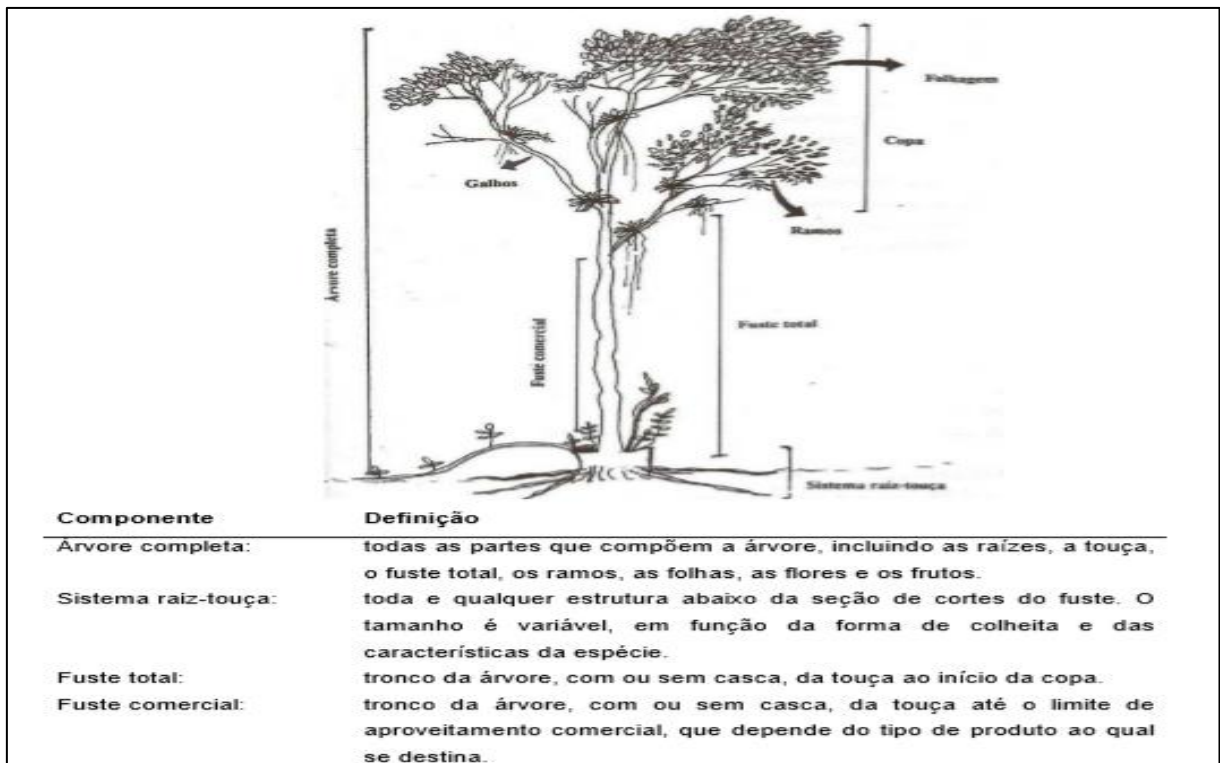
4.3 Caracterização e Composição dos Resíduos Orgânicos

As árvores fornecem múltiplos benefícios em cidades, incluindo a redução das temperaturas urbanas, sequestro de carbono, a melhoria da qualidade do ar, mitigação de tempestade, escoamento de água e fornecimento de habitat para os animais (OLDFIELD et al., 2014).

As biomassas (matéria lignocelulósica) são uma fonte de matéria-prima renovável, encontrada abundantemente na natureza. São compostas por uma miscelânea complexa de polímeros naturais de carboidratos, titulados de celulose, hemicelulose, lignina e outras substâncias em menor quantidade. A biomassa pode ser de fontes agroindustriais, de resíduos urbanos, ou madeiras de angiospermas e gimnospermas.

A Figura 1 apresenta os componentes arbóreos que podem ser considerados para o manejo de resíduos de podas de árvores.

Figura 1 . Desenho Esquemático de Componentes Arbóreos



Fonte: (NOLASCO, 2000).

Os principais constituintes moleculares da biomassa lignocelulósica são hemicelulose, celulose e lignina e podem ser submetidos processos (rotas) de conversão, por ser uma fonte de um material renovável e disponível (GUEDES et al, 2010). Conforme apontado por Cortez (2011), 23.33% dos resíduos públicos urbanos produzido pelas cidades brasileiras, são “resíduos verdes”, constituídos de galhos, troncos e folhas, isto é, material orgânico, resultado dos serviços de poda de árvores, limpeza de praças, bosques e capinação de terrenos.

Quando passada pelo processo de pirólise, a biomassa apresenta características únicas referentes aos compostos encontrados na proporção da mistura dos materiais que os constitui (MESA et al., 2003; CASTRO & PEREIRA JR, 2010). Segundo FILHO (2005) os valores médios obtidos foram considerados representativos, para finalidades práticas, pois as variações são ocasionadas pela diversidade de espécies vegetais, idade das plantas, tipos de terreno e clima.

CARDOSO et al., (2011) indicam que os compostos orgânicos e seus constituintes são formados essencialmente por celulose, polioses, as quais, com a celulose formam a hemicelulose, e lignina, um polímero aromático natural e de alto peso molecular, responsável pela dureza e rigidez da parede celular, bem como os componentes inorgânicos, denominados cinzas, compostos por potássio, cálcio, magnésio, pequenas quantidades de sódio, manganês,

ferro, alumínio, além de radicais como carbonatos, silicatos, cloretos, sulfatos e traços de zinco, cobre, cromo, dentre outros.

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) a poda de árvore é classificada como resíduos classe IIA, ou seja, material não inerte e biodegradável, cujo aproveitamento pode ser realizado para diferentes processos industriais.

A madeira é constituída de uma substância complexa, de caráter polimérico, onde 40 a 50% do seu peso seco são compostos de celulose. Os polissacarídeos, a hemicelulose e a lignina constituem a parede das células, sendo que a hemicelulose é a mistura de polímeros de cadeia curta da arabinose, da galactose, da glicose, da manose e da xilose (como anidridos) e a lignina é um polímero complexo de fenóis substituídos, que atuam como ligantes das fibras de celulose (Tôrres Filho, 2005 apud Shreve e Brink Jr., 1977).

VIVACQUA FILHO et al. (1982) elaboraram uma pesquisa referente a variações na composição elementar da madeira, de acordo com diversos autores. Esses dados são apresentados na Tabela 1, onde as informações consideradas não foram consideradas conflitantes.

Tabela 1 - Composição Elementar da Madeira

Composição Química	Referência dos Autores					
	Goldsten (Ano)	Charles (Ano)	Kanury e Blackshear (Ano)	Klar (Ano)	Jones * (Ano)	** (Ano)
Carbono	50,0	48,5-50,5	50,0	40,0	40,0	50,0
Oxigênio	44,0	43,0-45,0	43,5	34,2	34,0	42,5
Hidrogênio	6,0	6,0-7,0	6,0	4,8	4,8	6,0
Nitrogênio e Cinzas	<1	-	-	-	-	-
Nitrogênio	-	-	0,1	-	0,4	0,5
Cinzas	-	-	0,4	1,0	0,8	1,0
Água	-	-	-	20,0	20,0	-

(*) Base Úmida

(**) Base Seca

Fonte: (AUTOR, 2019).

4.4 Aproveitamento Residual de Podas de Árvores

Os resíduos de podas de arborização urbana têm um grande potencial de aproveitamento ou reaproveitamento. Para tanto é imprescindível o desenvolvimento do estudo e da investigação de processos do material renovável. Em conformidade com CORTEZ (2011) a biomassa possui um grande potencial para reutilização, reciclagem, compostagem ou aproveitamento energético, o que corrobora com a limitação espacial e tecnológica bem como a capacidade de suporte dos aterros sanitários. Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos determina que apenas rejeitos devem ser encaminhados para este local, embora seja tecnicamente adequado.

4.4.1 Reintegração dos Ciclos Biogeoquímicos

Para Filho et al., (2017), os resíduos de poda de árvores triturados, devido à presença de carbono, ferro, potássio e fósforo, possuem os principais elementos da compostagem, uma vez que esses nutrientes fornecem matéria orgânica e energia para a realização da compostagem, não deixando a massa compactar, permitindo que os microrganismos respirem, e assim, reintegrando os ciclos biogeoquímicos.

Na capital do Tocantins, parte dos resíduos destinados ao aterro é triturada, com a finalidade de sua reutilização em compostagem, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 . Material Triturado no aterro de Palmas, para uso em compostagem



Fonte: (AUTOR, 2019).

4.4.2 Reutilização

MEIRA (2010) cita que reutilizar é prolongar a vida útil dos materiais, em sua função original ou adaptada. ROCHA et al., (2015) apresentam como alternativa para a reutilização de maneira viável dos resíduos de maior porte, o trabalho artesanal na produção de mobiliário para praças, jardins ou outros usos públicos (Figura 3).

Figura 3. Reutilização de Troncos em mobiliários urbanos



Fonte: (AUTOR, 2019).

4.4.3 Reaproveitamento Energético – Briquetagem

O resíduo de poda de árvore gera um volume considerável de biomassa florestal, podendo ser aproveitado de forma energética como combustível sólido, deixando de ser um passivo ambiental, acarretando ganhos econômicos e ambientais de interesse da sociedade (SILVA, 2016).

A conversão deste resíduo em briquetes poderia fornecer um novo mercado para as fábricas. Com o crescimento deste setor industrial o briquete de biomassa vegetal pode substituir o carvão vegetal de madeira em alguns processos industriais para produzir energia e diminuir o desmatamento (TEIXEIRA; PENA; MIGUEL, 2010).

Neste contexto, destaca-se a briquetagem, como um processo de aproveitamento de resíduos lignocelulósicos derivados da biomassa urbana, agrícola e florestal, possibilitando seu aproveitamento como matéria prima na substituição da lenha por um produto equivalente (SHUTZ et al., 2010), portanto, apresenta um grande potencial que pode ser aproveitado na fabricação de briquetes.

SAIDUR (2011) comenta que os briquetes são usualmente utilizados para a queima de fornos, caldeiras, aquecedores, torradores, uso doméstico em lareiras, e outros similares devido ao seu elevado poder calorífico.

De acordo com a empresa LENECO, 6,5 m³ de resíduo de poda urbana equivale a produção de 1 tonelada de briquetes.

Para FERNANDES, et al., (2011), no Brasil os galhos mais grossos são serrados e utilizados como lenha, essa forma não permite que os resíduos sejam reaproveitados com potencial contido na biomassa vegetal. (RAQUEL et al., 2015) comentam que o cenário atual há uma demanda crescente por tecnologias que promovam o reaproveitamento energético com melhor eficiência.

Conforme QUIRINO, (2004), todos os compostos de origem vegetal podem ser compactados pela briquetagem. Para FARAGE, (2009) o reaproveitamento energético dos resíduos lignocelulósicos por meio da briquetagem surge como um processo tecnológico alternativo de reaproveitamento desses resíduos, que consiste em na compactação do resíduo triturado sob alta pressão e temperatura, resultando em um produto com dimensões padronizadas e elevado peso específico.

4.4.4 Produção de Carvão Ativado

LIMA et al., (2012) investigam a utilização de resíduos de poda de arborização urbana na produção de carvão ativado e o definem como sendo esse assim nomeado em função de um grupo de carbonos que se caracterizam por possuírem uma estrutura porosa bem desenvolvida e uma superfície interna bem elevada. Segundo MORENO-CASTILLA (2004) e (RODRÍGUEZ-REINOSO et al., 1997 apud MEDEIROS, 2008) sua preparação é feita por tratamento de percussores carbonizados com gases oxidantes, ou por materiais carbonosos, impregnados com elementos químicos desidratantes em condições adequadas para o desenvolvimento da porosidade.

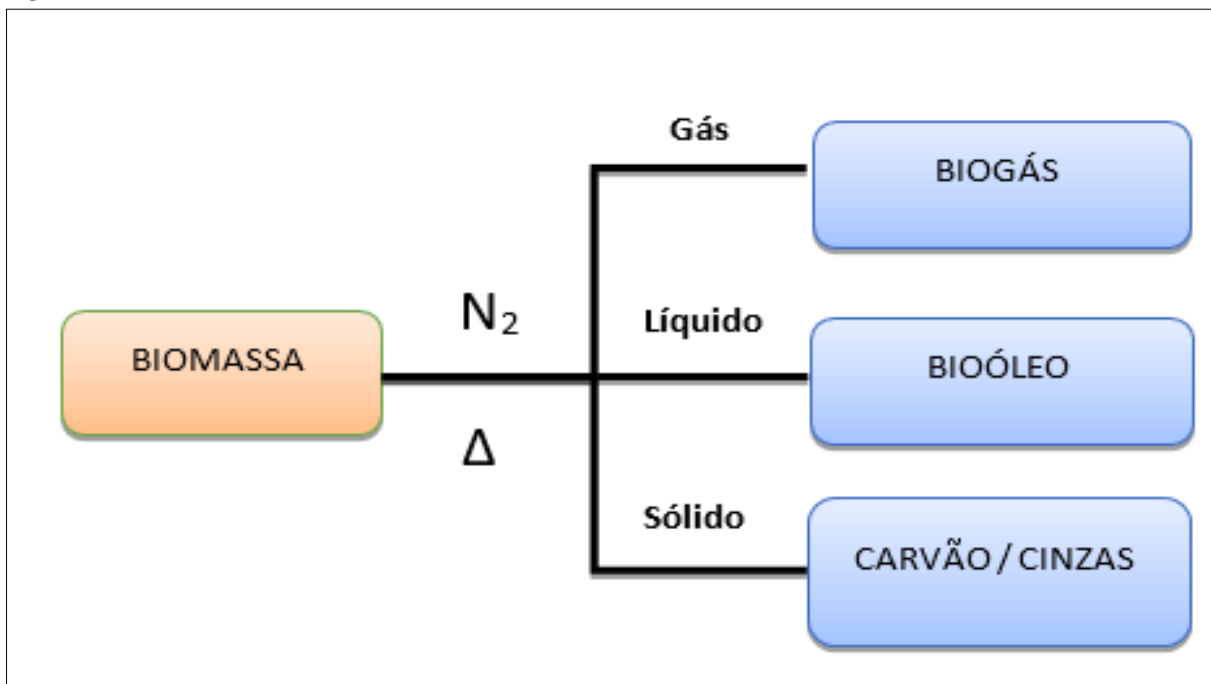
CZAJCZYŃSKA et al., (2017) definem que a pirólise é a decomposição termoquímica de material orgânico a alta temperatura e na ausência de oxigênio ou em atmosfera de gases inertes, afirma ainda que diferentes tipos de pirólise foram desenvolvidos, entre eles o rápido, ultrarrápido e lento. Afirma ainda que uma grande vantagem desse processos é que muitos tipos de matérias primas podem ser utilizadas.

LIANG et al., (2016) mostram que resíduos de poda de árvores podem ser utilizados para a fabricação de bio carvões, por meio da pirólise, a uma temperatura de 300°C a 500°C a uma taxa de 3°C.min⁻¹, sendo que a temperatura final foi mantida por 2 horas.

SANTOS; SANTOS; PEREIRA, (2016) informam que nos procedimentos envolvendo a pirólise, vários fatores afetam a taxa de conversão e rendimentos, composição e propriedades das classes dos produtos, tendo como principais parâmetros monitorados a temperatura, fluxo e taxa de aquecimento.

A pirólise ocorre, a partir de uma temperatura de 400 °C até o início do processo de gaseificação (PEDROZA et al., 2010, PEDROZA, 2011). A Figura 4 apresenta o diagrama do processo de pirólise.

Figura 4. Pirólise de Biomassa



Fonte: Cortez et al., (2006).

No processo de pirólise ocorre a ruptura de ligações carbono-carbono e a formação de ligações carbono-oxigênio. Trata-se, portanto, de um processo de oxidação e redução no qual uma parte da biomassa é reduzida a carbono, enquanto a outra é oxidada e hidrolisada, originando compostos fenólicos, carboidratos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos (GOMÉZ, 2011).

Para SANTOS (2011), o processo de pirólise ocorre da degradação da biomassa por meio do aquecimento, formando o carvão, bio-óleo e gás pirolítico, sendo que as condições do reator são fatores determinantes no processo de rendimento dos produtos gerados. O bio-óleo

obtido durante o processo apresenta alto poder calorífico e ausência de compostos de enxofre, o que aponta sua aplicação como combustível.

Os processos de pirólise conhecidos são três: Pirólise lenta, Pirólise rápida e Ultrarrápida ou flash. SÁNCHEZ e CAMPO (2003) informam que a diferença entre a pirólise lenta e a rápida é que na primeira a produção de carvão vegetal é maximizada em detrimento dos produtos líquidos e gasosos, enquanto que na segunda objetiva-se a obtenção de gases e líquidos.

O processo pirolítico flash, tratado como um processo assim como os demais, apesar de ser uma conversão térmica, ocorre em altas temperaturas (850 – 900°C). Possui como características longos tempos de residência, elevadas taxas de aquecimento e biomassa com baixa granulometria (GOMÉZ, 2011). A Tabela 2 mostra dados experimentais obtidos durante a degradação térmica da madeira nas principais variantes de processo.

Tabela 2 - Rendimentos obtidos em diversos tipos de pirólise de madeira

Processo	Condições Operacionais	Líquido(%)	Sólido(%)	Gás(%)
Pirólise lenta	Temperatura baixa, em torno de 400° C Tempo de residência – horas/ dias	30	35	35
Pirólise de gaseificação	Temperatura elevada, em torno de 800° C Tempo de residência dos vapores longos	5	10	85
Pirólise rápida	Temperatura moderada, em torno de 500° C Tempo de residência dos vapores abaixo, em torno de 1 segundo.	75	12	13
Pirólise intermediária	Temperatura moderada, em torno de 500° C Tempo de residência dos vapores moderado, em torno de 10 a 20 segundos.	50	20	30

Fonte: BRIDGWATER (2006) apud DAL MOLIN (2015).

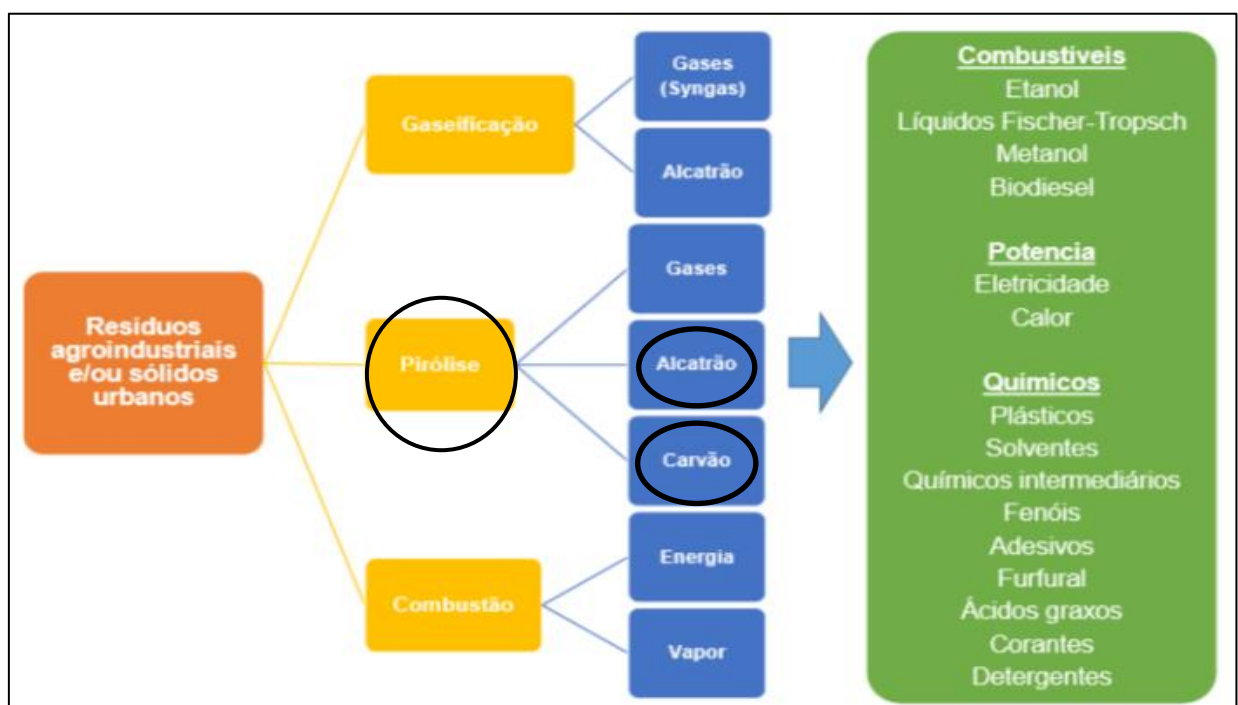
O tipo de reator utilizado para a pirólise de resíduos é de grande importância devido à grande quantidade de calor a ser transferido através da parede do reator, fundamental para garantir a degradação do material. Os reatores descritos na literatura utilizados na pirólise de diferentes resíduos incluem reatores de leito fixo, reatores em batelada ou semi-batelada, fornos rotativos, reatores de leito fluidizado, reatores assistidos por micro-ondas e algumas soluções

inovadoras tem se destacado, como reatores a plasma ou a energia solar.(CZAJCZYŃSKA et al., 2017).

O principal equipamento de uma usina de pirólise é o reator. Sendo os dois tipos principais o reator leito fixo e o de leito fluidizado (ZHANG et al., 2012). O reator de leito fixo é constituído por estruturas tubulares de aço inox, onde o gás de arraste atravessa o compartimento da biomassa empurrando os produtos gasosos e líquidos (biogás e bio-óleo) para fora do sistema enquanto os produtos sólidos (carvão e cinzas) permanecem estacionários.

A rota termoquímica é muito atrativa pela possibilidade de transformar materiais considerados de baixo valor agregado e em geral considerados como resíduos (agroindustriais e/ou sólidos urbanos), em matérias primas de inúmeros produtos de maior valor comercial, podendo ser considerado que rota termoquímica é base de uma biorrefinaria (Figura 5) (FIGUEROA, 2015).

Figura 5. Aproveitamento de Resíduos por aplicação de Rota Termoquímica



Fonte: (CHAOUKI e PATIENCE, 2015) (adaptado).

Dentre as tecnologias utilizadas para aproveitamento de biomassas, a pirólise apresenta muitas vantagens comparadas às demais. Esse tipo de tratamento térmico tem como objetivo principal obter produtos com densidade energética mais alta e melhores propriedades do que àquelas da biomassa inicial. Esses produtos podem ser usados para abastecer energeticamente

o próprio processo ou serem comercializados como produtos químicos ou combustíveis e possuem utilizações potenciais diversas (PEDROZA et al., 2011).

MATIELLO (2017) afirma que no século XVIII, uma certa quantidade de vapor d'água foi observada nos poros de uma certa espécie de carvão, o qual era liberado quando submetido ao aquecimento, atribuindo a esse fenômeno como adsorção. NÓBREGA (2011) define também como adsorvente toda superfície sólida capaz de realizar a adsorção, e adsorvido todo fluido em contato com o adsorvente, e adsorbato todo o elemento químico adsorvido pelo adsorvente.

A eficiência da adsorção está relacionada diretamente a área superficial específica do adsorvente. COUTO (2014) apresenta o carvão ativado como um material adsorvente largamente utilizado no tratamento de águas e como etapas de polimento final no tratamento de efluentes.

ALVES (2014), em seu trabalho, fez uso de precursores originados de resíduos de poda de arborização urbana para o tratamento de efluentes de refinaria de petróleo e concluiu que o processo de produção de carvão ativado, a partir de resíduos vegetais urbanos propicia a síntese de um carvão com elevada capacidade adsorptiva, e satisfatórios valores de área e volume de micro poros, evidenciando a eficiência da produção de carvões ativados utilizando-se esses resíduos.

Outros registros na literatura mostram a aplicabilidade de utilização de carvão ativado no tratamento de efluentes pelo processo de adsorção, como (FLORIDO, 2011) que obteve altos resultados para remoção de compostos orgânicos na ordem de 97% de remoção de carbono orgânico total dissolvido (COD) de efluentes de refinaria de petróleo.

4.5 Tecnologia Verde de Despoluição de Efluente (Filtro de Carvão Ativado)

A fração sólida obtida como resultado do processo de degradação térmica, o carvão, um resíduo sólido rico em carbono, pode ser utilizado para a produção de carvão ativado, um excelente composto empregado na adsorção de compostos inorgânicos e orgânicos. O carvão ativado é amplamente utilizado na extração de metal, purificação de água, na medicina (absorção do veneno), limpeza de gases e na indústria de alimentos (remoção de impurezas orgânicas) (MENEDEZ et al., 2004), além de filtros para remoção de poluentes.

A Pirólise lenta (convencional) ou carbonização, utilizada neste trabalho com reator de leito fixo possui finalidade de maximizar o resíduo carbonáceo (sólidos), como por exemplo,

na produção de carvão a partir da biomassa, devido à volatilização lenta do combustível, bem como as reações secundárias de polimerização e de coque dos produtos mais voláteis (PARADELA, 2012).

As tecnologias de adsorção com carvão ativado para filtração ou remoção de poluentes ou contaminantes indicam a reutilização das águas cinzas para inúmeras aplicações. Um dos conceitos mais antigos sobre reúso de água veio através da OMS - Organização Mundial da Saúde (1973) onde é definido reuso direto, indireto e reciclagem. O reúso direto é o uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquíferos e água potável. O reúso indireto ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para o uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente a jusante, de forma diluída. E a reciclagem é o reúso da água internamente às instalações industriais, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2016) afirma que as águas cinzas são águas já utilizadas em banheiro, máquina de lavar, tanques, banho e lavatório de banheiro, não incluindo efluentes de pia de cozinha e bacia sanitária.

Para FIORI; FERNANDES; PIZZO, (2006) o reúso de água é a reutilização desta após tratamento adequado com diferentes finalidades, ou seja, a utilização dessa substância por duas vezes ou mais, com o interesse de preservar os recursos hídricos e garantir a sustentabilidade.

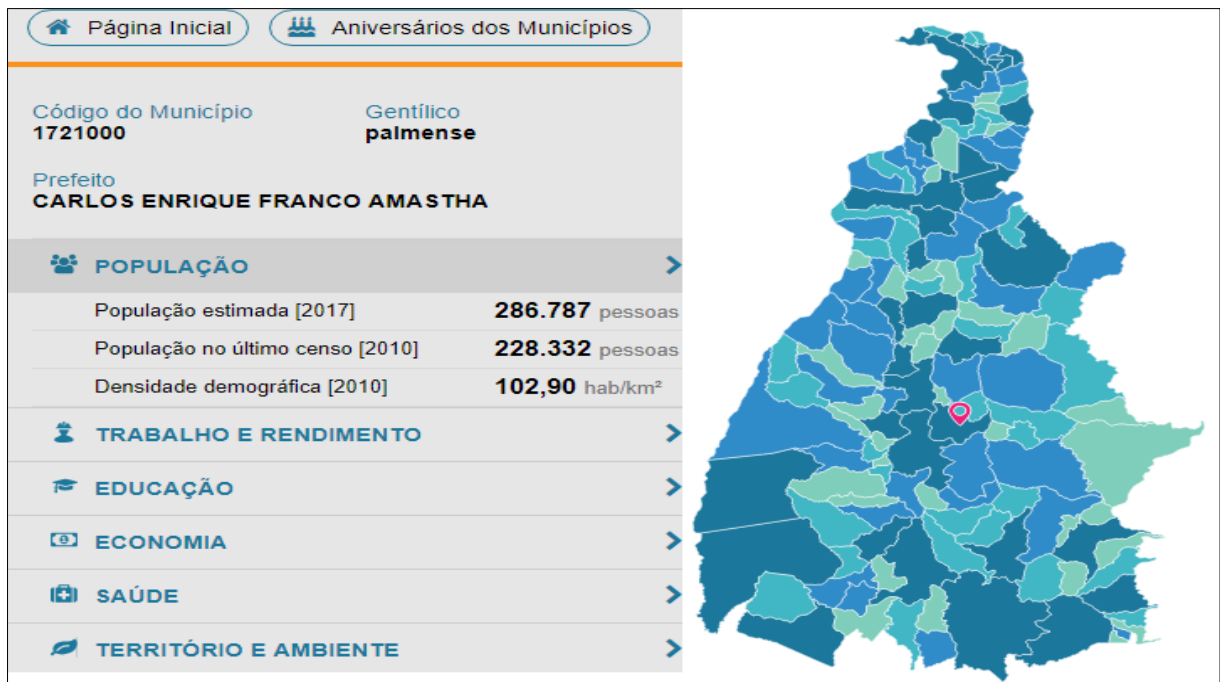
5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Caracterização da Área Urbana de Pesquisa

O município de Palmas foi fundado em 20 de maio de 1989 e instalado em 1º de janeiro de 1990. A capital tocantinense está situada na área compreendida entre coordenadas 10º 12' 46" S e 48º 21' 37" W, a 230 metros do nível do mar.

Segundo dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a população do município em estudo no ano de 2017 era de 286.787 habitantes, e, para o ano de 2019 estimou-se aproximadamente 300.000. A Figura 6 apresenta os dados populacionais do município de Palmas-TO.

Figura 6. Dados populacionais do município de Palmas-TO



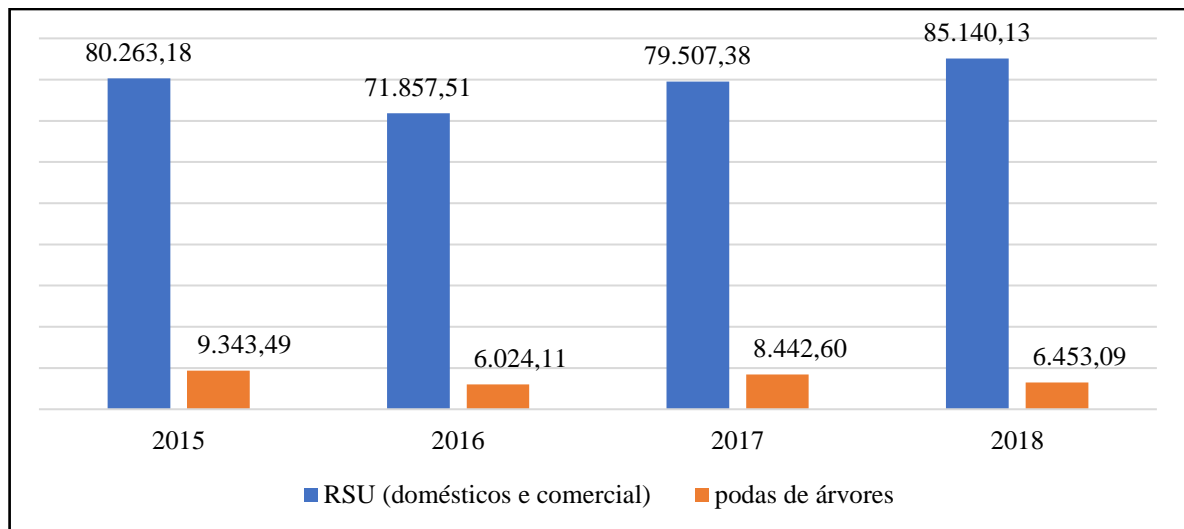
Fonte: (IBGE, 2017).

Considerando que haja uma relação de proporcionalidade entre o número de habitantes e a produção de resíduos gerados é possível que a capital do Tocantins tenha uma produção mensal de aproximadamente 7.500 toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). Desse total, 1,8 toneladas são de resíduos de limpeza pública, nos quais estão incluídos os resíduos de poda de árvores, considerando 23.33% que se apresenta como resíduos verdes (CORTEZ, 2011).

5.2 Produção de carvão ativado a partir da poda de árvores em Palmas (Tocantins)

De acordo com LÔBO (2019), os resíduos de podas de arborização urbana em Palmas (Tocantins) chegam numa média de 10 % dos RSU (domésticos e comerciais), no qual é a parcela com o maior percentual dentre todos os resíduos sólidos urbanos conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7. Quantitativo de RSU (doméstico e comercial) e podas de árvores



Fonte: TCE-TO, SICAP – Licitações, contratos e obras (2019), adaptado autor (2019).

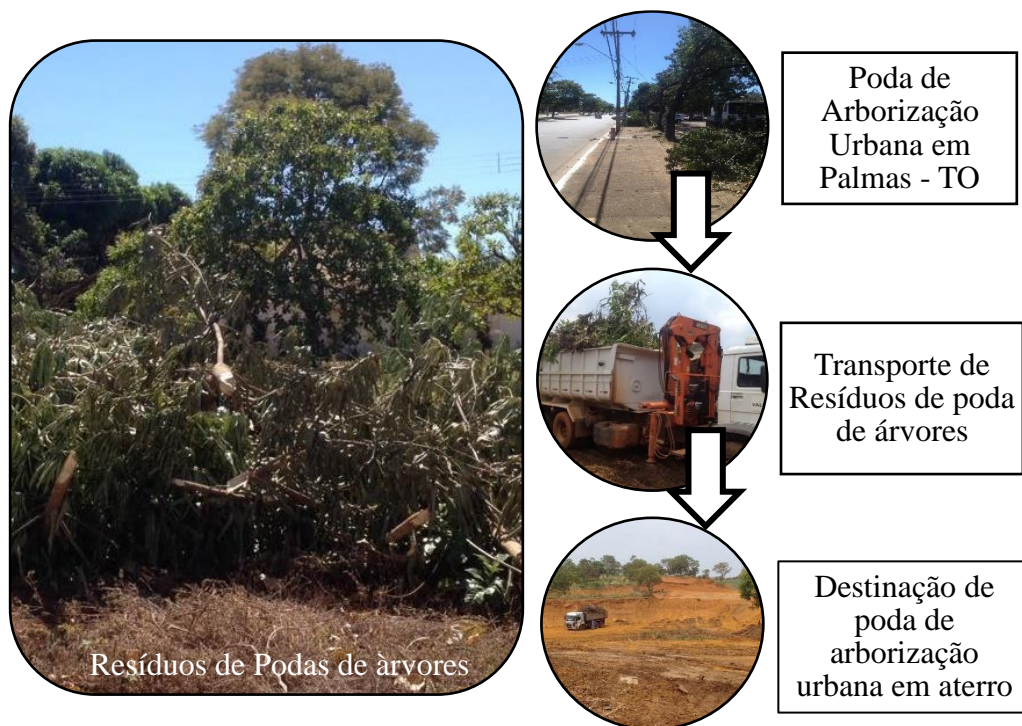
Admitindo uma estimativa de produção de 6453 toneladas de poda de árvores em Palmas (Tocantins) no ano de 2018, e observando o rendimento médio da produção de carvão ativado (Tabela 8) de 33,93 % a partir da pirólise em reator de leito fixo, podemos estimar uma produção de carvão ativado de até 2189 toneladas a partir da poda de árvore.

De acordo com LÔBO (2019), os resíduos de podas de árvores podem ser destinados como matéria prima para produção de carvão ativado, e esses utilizados como adsorventes no processo de tratamento de efluentes domésticos, proporcionando o reúso de águas servidas e ao mesmo tempo, sendo uma excelente alternativa para utilização dos processos pirolíticos no benefício de regiões semiáridas, por exemplo, onde se intensifica o déficit hídrico no decorrer do ano.

5.3 Obtenção e Procedimentos dos Resíduos das Podas de Árvores- Palmas (TO)

Cerca de 20 kg de material de cada biomassa foi coletado no aterro da capital do Tocantins e transportado até o Laboratório de Inovação e Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) no Instituto Federal do Tocantins (IFTO) - Campus Palmas-TO. A Figura 8 mostra o registro fotográfico da obtenção dos resíduos de podas de árvores deste município para serem estudados e caracterizados.

Figura 8. Obtenção dos Resíduos das Podas de Árvores- Palmas



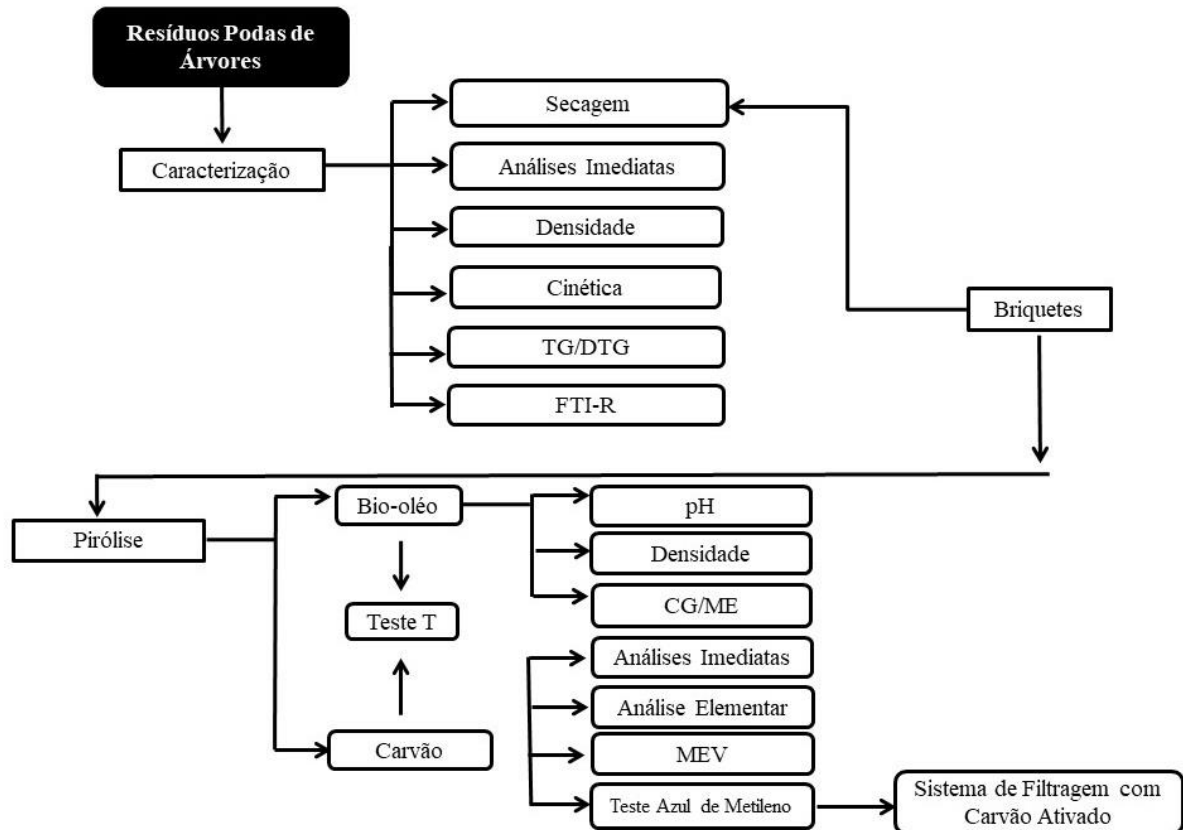
Fonte: (AUTOR, 2019).

Para a caracterização da biomassa e dos produtos obtidos na pesquisa foram utilizados os seguintes laboratórios do IFTO: Laboratório de Química, Laboratório de Físico-Química de Água e Esgoto, Laboratório de Solos/Fundações e Laboratório LARSEN. Já a caracterização do bio-óleo obtido no processo termoquímico, por cromatografia, foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais e no Laboratório de Biocombustíveis (UFRN).

As amostras foram caracterizadas por meio das análises imediatas: umidade (Método ASTM D 3173-85), material volátil e carbono fixo, cinzas (Método ASTM D 2415-66), submissão do processo de cinética, termogravimetria (TG/DTG) e espectrometria no infravermelho (FTIR).

A Figura 9 apresenta os materiais e métodos utilizados para a caracterização da biomassa *in natura* e os materiais renováveis obtidos pelo processo pirolítico.

Figura 9. Obtenção de resíduos de poda de árvores em Palmas – TO



Fonte: (AUTOR, 2019).

A secagem dos resíduos foi feita 60 °C. Todas as amostras foram trituradas em moinho de facas e peneiradas em peneira com abertura de 0,59 mm (ABNT 30, Tyler 28) para garantir a homogeneidade e facilitar os procedimentos analíticos. Na Figura 10 são apresentadas as amostras empregadas nessa pesquisa, sendo a amostra (a) bruta e (b) após secagem em estufa.

Figura 10. Preparação de amostras: (a) amostra bruta e (b) amostra após secagem



Fonte: (AUTOR, 2019).

5.4 Cinética de perda de massa de amostras

Foram realizadas a cinética de perda de massa da biomassa em duplicata com a finalidade de comparar as diferenças de massa nas mesmas condições, em estufas SP-200 e nas temperaturas de 40 e 50°C, em diferentes intervalos de tempo.

5.5 Preparação de briquetes a partir de amostra de Poda de Árvore

Os briquetes foram produzidos a partir de um volume de biomassa de 500 mL *in natura* seca já triturada. Foi utilizado como ligante o amido a 5% para aglomeração das partículas da biomassa e adicionou-se a essa mistura de biomassa e ligante, cerca de 120 mL de água destilada para hidratação e deixou em repouso por 30 minutos. Para obtenção do formato de briquetes a mistura obtida foi prensada dentro de um tubo de 20 cm de comprimento e 32 mm de diâmetro. Os briquetes obtidos foram secos em uma estufa a 40°C por 12 horas. A Figura 11 mostra os briquetes produzidos a partir da biomassa de poda de árvore para os ensaios de pirólise.

Figura 11. Briquetes de resíduos de poda de árvore

Fonte: (AUTOR, 2019).

5.6 Ensaios de pirólise

Os procedimentos empregados nesse estudo foram divididos em duas partes, cujas condições experimentais são encontradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições experimentais empregadas nos testes de pirólise de poda de árvores

Parâmetros	Testes iniciais	Planejamento experimental DCCR
Temperatura (°C)	500 e 550	360, 400, 500, 600 e 640
Taxa de aquecimento (°C/min)	10	23, 25, 30, 35 e 37
Tempo de reação (min)	30	30
Vazão de inerte (mL/min)	4	4

Fonte: (AUTOR, 2019).

5.7 Pirólise de poda de árvores em reator de leito fixo – Testes Iniciais

A biomassa foi introduzida ao reator na forma de pó. A conversão térmica será efetuada em um reator de leito fixo (Figura 12) de aço inox, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm.

Figura 12. Reator de leito fixo empregado nos experimentos de pirólise de biomassa



Fonte: (AUTOR, 2019).

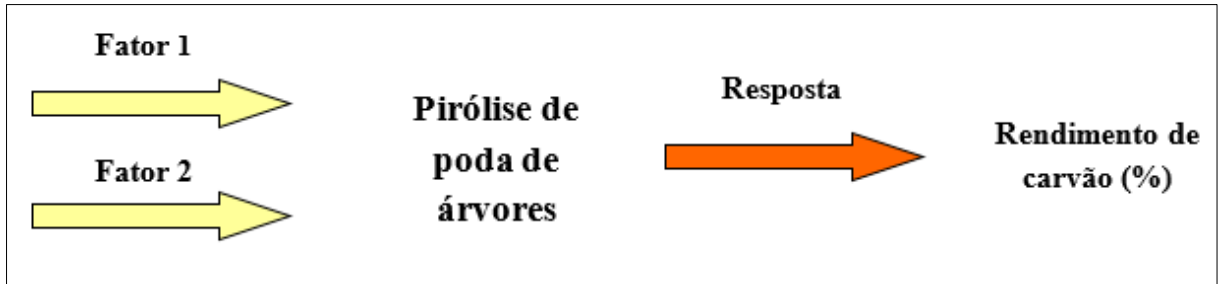
O reator foi aquecido por forno bipartido reclinável e foi operado em regime de batelada, sendo o nitrogênio o gás de arraste.

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

5.8 Pirólise de poda de árvores – Planejamento Experimental DCCR

Foi verificado através de planejamento multivariável o efeito de dois fatores no sistema de pirólise de poda de árvores (Figura 13). Aplicou-se um planejamento experimental 2^2 -Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), com 3 experimentos no ponto central, com 11 tipos de combinações entre os fatores. Os fatores estudados foram: temperatura de pirólise e taxa de aquecimento. Os valores mínimos e máximos foram empregados conforme apresentado na Tabela 04. Esses ensaios foram realizados na mufla MODELO W-One, MARCA EDG Equipamentos.

Figura 13. Representação do planejamento experimental utilizado na pirólise de poda de árvores (Delineamento composto central rotacional 2²).



***Fator 1** – temperatura (°C) e **Fator 2** – taxa de aquecimento (°C/min)

Fonte: (PEDROZA, 2010).

Tabela 4 - Níveis dos Fatores que foram empregados no Planejamento Experimental, durante a Pirólise de poda de árvores

Fatores	Níveis				
	(-1,4)	(-1)	(0)	(+1)	(+1,4)
Temperatura final do processo (°C)	360	400	500	600	640
Taxa de aquecimento (°C/min)	23	25	30	35	37

Fonte: (AUTOR, 2019).

Os experimentos foram realizados de forma aleatória, com três repetições no ponto central, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2.

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

Fonte: (AUTOR, 2019).

5.9 Caracterização físico-química do bio-óleo e carvão

A análise da densidade do bio-óleo foi realizada com o auxílio de um picnômetro de vidro a 20 °C.

Para a determinação do pH do líquido foi utilizado um pHmetro digital. Para a identificação dos compostos constituintes do bio-óleo foi empregado um cromatógrafo modelo Varian CP 3800, acoplado a um detector de espectrometria de massas.

O carvão foi caracterizado através dos seguintes métodos: análise imediata, microscopia eletrônica de varredura (MEV), índice de azul de metileno, e por fim, instalação de um sistema de filtros com carvão ativado.

5.10 Teste de Adsorção de Corante em filtro de carvão

O teste de do filtro com o corante azul de metileno foi feito em filtro descendente contendo como meio filtrante o carvão da pirólise da poda de árvores. A Figura 14 mostra os componentes do sistema que se constitui de reservatório inferior de 50 litros, reservatório superior de 20 litros com sistema de drenos e filtro de carvão e areia.

Figura 14. Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de poda de árvores



Fonte: (SILVA, 2018; SANTOS, 2019).

No experimento de fluxo contínuo utilizou-se a solução do corante a uma concentração de 20 mg/L com pH ajustado a 7,0.

No reservatório superior existem três tubulações para transporte de líquidos: (a) alimentação do reservatório inferior, (b) dreno para o reservatório inferior e (c) alimentação do filtro. A alimentação do filtro foi feita por gravidade. As dimensões dos filtros são: altura total da tubulação 40,0 cm, altura do carvão na tubulação 11,0 cm, diâmetro da tubulação 2,0 cm. Durante a montagem do sistema foi utilizada aproximadamente uma massa de 6 gramas do carvão em cada experimento. A alimentação realizada por gravidade foi mantida a uma vazão média de 300 mL/h.

No reservatório inferior foi instalada uma bomba submersa para o transporte do corante para o reservatório superior. No reservatório superior será 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 15).

Figura 15. Sistema de filtração de corante em carvão obtido da pirólise de poda de árvores



Fonte: (SILVA, 2018; SANTOS, 2019).

A adsorção da solução do corante será medida em espectrofotômetro (Figura 16) de duplo feixe (PERKIN ELMER, LAMBDA 750) em 650 nm, com o auxílio de uma curva de

calibração externa, construída pela análise de soluções de concentrações iguais a: 1%, 3%, 5%, 7%, e 9% partindo-se da solução inicial de azul de metileno 100mg/l.

Figura 16. Análise espectrofotométrica do corante após sistema de filtração

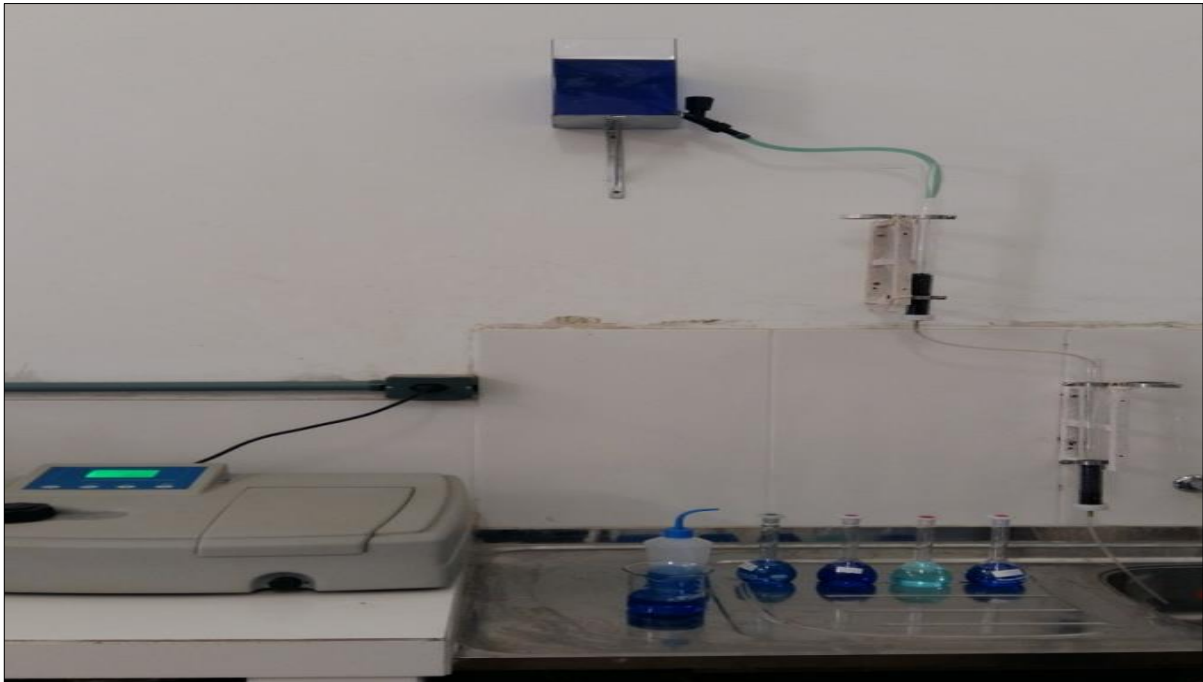


Fonte: (AUTOR, 2019).

5.11 Remoção de poluentes de águas cinzas utilizando filtro de areia e carvão obtido da pirólise de poda de árvores

O sistema de filtração de águas cinzas preenchidos de areia e carvão obtido da pirólise de poda de árvores funcionou de forma contínua (Figura 17) contendo fundo drenante e com efluente em fluxo descendente, ocorre a remoção de poluentes, tanto por ação biológica quanto física.

Figura 17. Sistema de filtração de águas cinzas, contendo dois filtros em série



Fonte: (AUTOR, 2019).

Para a concretização dos objetivos dessa etapa da pesquisa o monitoramento da qualidade do efluente filtrado foram coletadas amostras em dois pontos: P1 - tanque de alimentação de águas cinzas e P2 – Efluente final do sistema. As amostras serão coletadas a cada 2 horas da operação e as determinações seguiram os métodos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 19ª edição (APHA/AWWA/WEF, 1998) (Tabela 6).

Tabela 6 - Métodos analíticos aplicados na caracterização de águas cinzas e efluente

<i>Parâmetro analítico</i>	<i>Metodologia</i>
<i>Temperatura</i>	<i>Termômetro de mercúrio</i>
<i>pH</i>	<i>Eletrométrico</i>
<i>DQO</i>	<i>Espectrofotômetro</i>
<i>Sólidos Totais</i>	<i>Gravimétrico</i>
<i>Sólidos Fixos</i>	<i>Gravimétrico</i>
<i>Sólidos Voláteis</i>	<i>Gravimétrico</i>
<i>Alcalinidade</i>	<i>Volumétrico</i>
<i>Acidez</i>	<i>Volumétrico</i>
<i>Cloretos</i>	<i>Método de Mohr</i>
<i>Coliformes fecais</i>	<i>Tubos múltiplos</i>
<i>Cloro Residual</i>	<i>Espectrofotômetro</i>
<i>Turbidez</i>	<i>Nefelométrico</i>

Fonte: (AUTOR, 2019).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização Química da Biomassa

6.1.1 Análise Imediata

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos nas análises imediatas da poda de árvore.

Tabela 7 - Análises imediatas do material orgânico bruto

Biomassa	Análise Imediata (%)			
	Cinzas	Umidade	Material Volátil	Carbono Fixo
Poda de árvore (folhas)	4,10	7,96	86,85	1,09
Poda de árvore	3,15	5,80	88,85	2,20

Fonte: (AUTOR, 2019).

A determinação do teor de umidade auxilia na avaliação do consumo energético durante o processo de pirólise. Quanto maior o teor de água no material, maior será o gasto energético. Isso implicará aumento no custo total de processamento, conduzindo, assim, à necessidade de secagem prévia da biomassa (ALEXANDRE, 2013; CARVALHO, 2009; COLEN, 2011).

A umidade é correspondente à perda, em peso, sofrida pelo produto quando é aquecido em condições na qual a água é removida, bem como substâncias voláteis. Esta informação é importante porque, quando se analisa um combustível o principal critério a ser levado em conta é o poder calorífico, e este sofre influência direta com o aumento da umidade. Quanto maior a quantidade de umidade da biomassa, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia durante a combustão. (PEDROZA et al., 2010).

A amostra constituída por folhas de árvores apresentou um teor de umidade em média de 7,96%. Para corroborar com os teores de umidade de materiais sólidos lignocelulósicos como briquetes de casca de farelo de arroz, encontrados nos estudos de YANK, NGADI E KOK (2016) variando entre 4,64 e 7,42%.

O teor de cinzas encontrados nesta pesquisa foi 4,10 % para a amostra constituída por folhas de árvores. Esta análise está diretamente relacionada com a presença de substâncias minerais, tais como: cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro e sódio. SILVA (2018) obteve 6,25% de cinzas para casca de soja e 5,8% para o farelo da biomassa residual sólida lignocelulósica agrícola estudada.

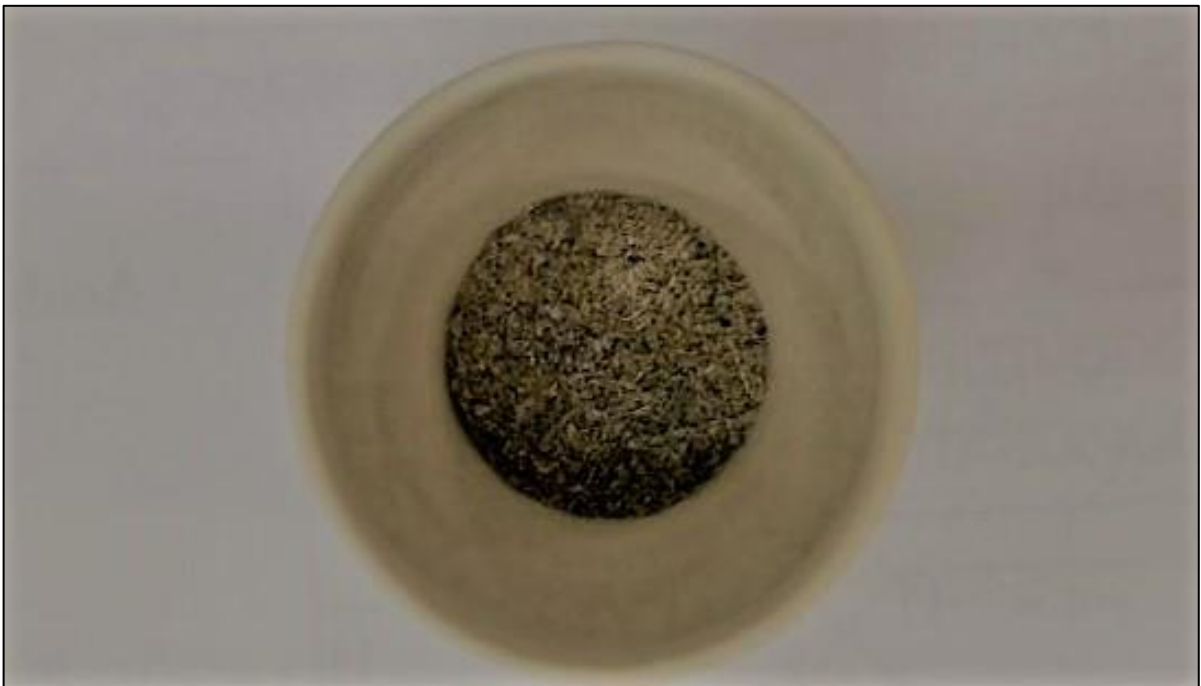
Valores elevados de cinzas representam baixo poder calórico, e por consequência um carvão de má qualidade no qual pode provocar corrosão dos equipamentos utilizados na conversão energética (SULAIMAN E ABDULLAH (2011), que é paradoxal à característica obtida.

Sabe-se que o material volátil está diretamente relacionado a ignição, haja vista que, quanto maior o teor de material volátil maior será a reatividade e consequentemente a ignição, e consequentemente o poder calorífico da biomassa. O estudo da emissão de voláteis é essencial para se compreender a dinâmica dos fenômenos no processo de degradação termoquímica (PEDROZA, 2010). O teor médio obtido de material volátil na biomassa em estudo foi de 88,85%.

PIMENTA et al., (2015) ao produzirem briquetes a partir de carvão de cascas de coco obtiveram valores de materiais voláteis de 28,81%. Com o mesmo comportamento Protásio et al., (2012) ao estudarem briquetes de resíduos provenientes processamento dos grãos de café submetidos aos processos de carbonização e torrefação, obtiveram valores de 22%, 69% e 8% de teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas respectivamente.

A Figura 18 mostra o material retido após o teste de material volátil, sendo boa parte correspondente ao teor de carbono fixo do material.

Figura 18 - Material retido após análise de material volátil de amostra de poda de árvores



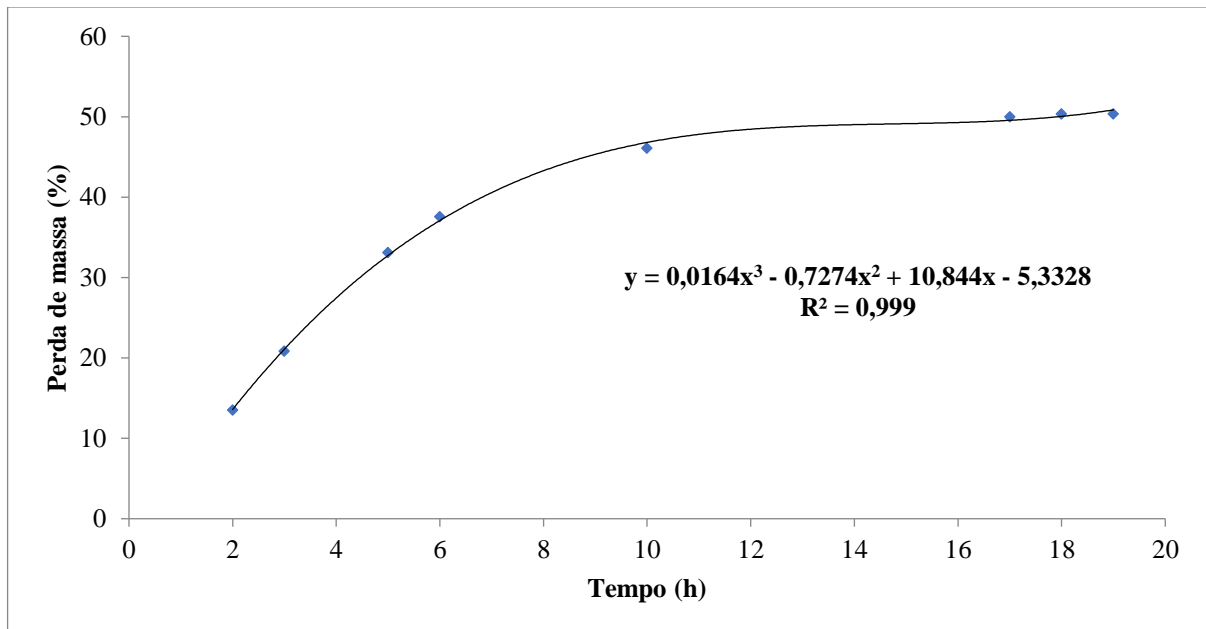
Fonte: (AUTOR, 2019).

6.1.2 Cinética de Perda de Massa

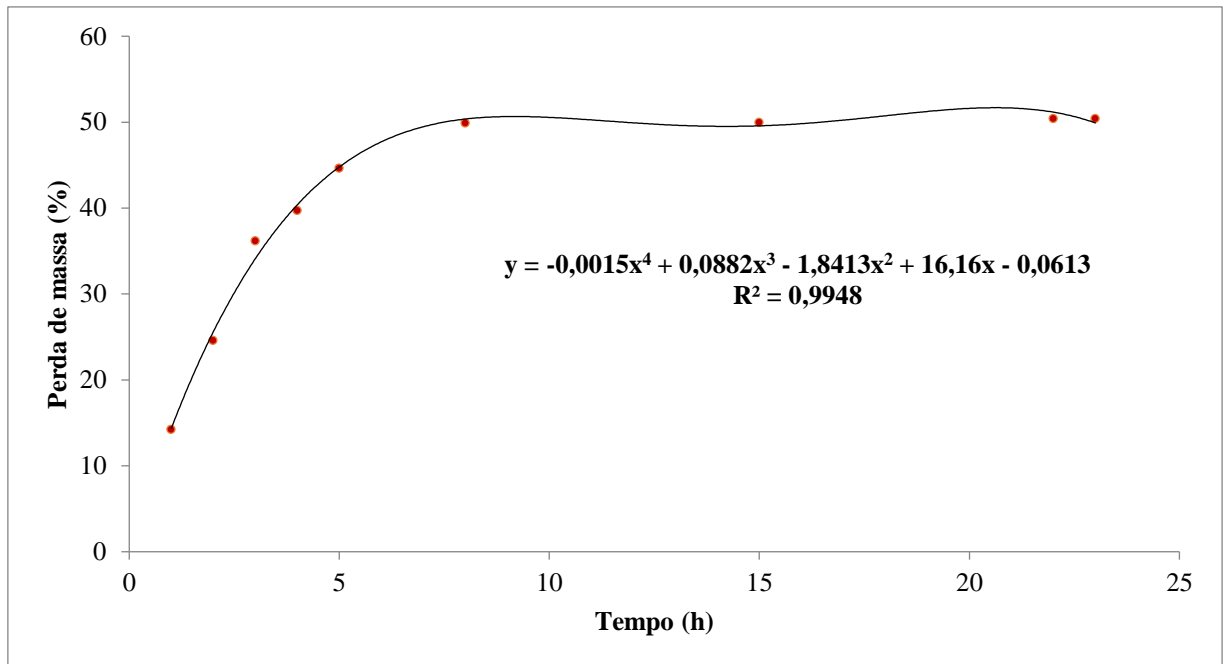
As Figuras 19 e 20 apresentam a cinética de perda de massa da biomassa realizada às temperaturas de 40 e 50 °C, respectivamente. Segundo os modelos observados, nas primeiras horas de secagem acontece um crescimento linear de perda de material.

Durante as cinco primeiras horas de experimento o resíduo perdeu cerca de 33,1 a 44,6 % de sua massa inicial nas temperaturas de 40 e 50 °C, respectivamente. Após 20 horas a amostra permaneceu com menos de 50% da matéria inicial nos dois tratamentos empregados.

Figura 19 - Cinética de perda de massa da biomassa a 40 °C



Fonte: (AUTOR, 2019).

Figura 20 - Cinética de perda da biomassa a 50 °C

Fonte: (AUTOR, 2019).

De acordo Shie et al., (2003), o teor de água tem um impacto importante sobre o consumo de energia para secagem da biomassa. Segundo Sánchez et al., (2009), a etapa inicial de secagem da amostra é o estágio que se gasta mais energia durante o processo de pirólise e que a umidade interfere no deslocamento da biomassa principalmente em reatores, neste caso, reator do tipo leito fixo (LARSEN), podendo interferir no fluxo de entrada e saída de biomassas e produtos.

6.1.3 Análise Termogravimétrica

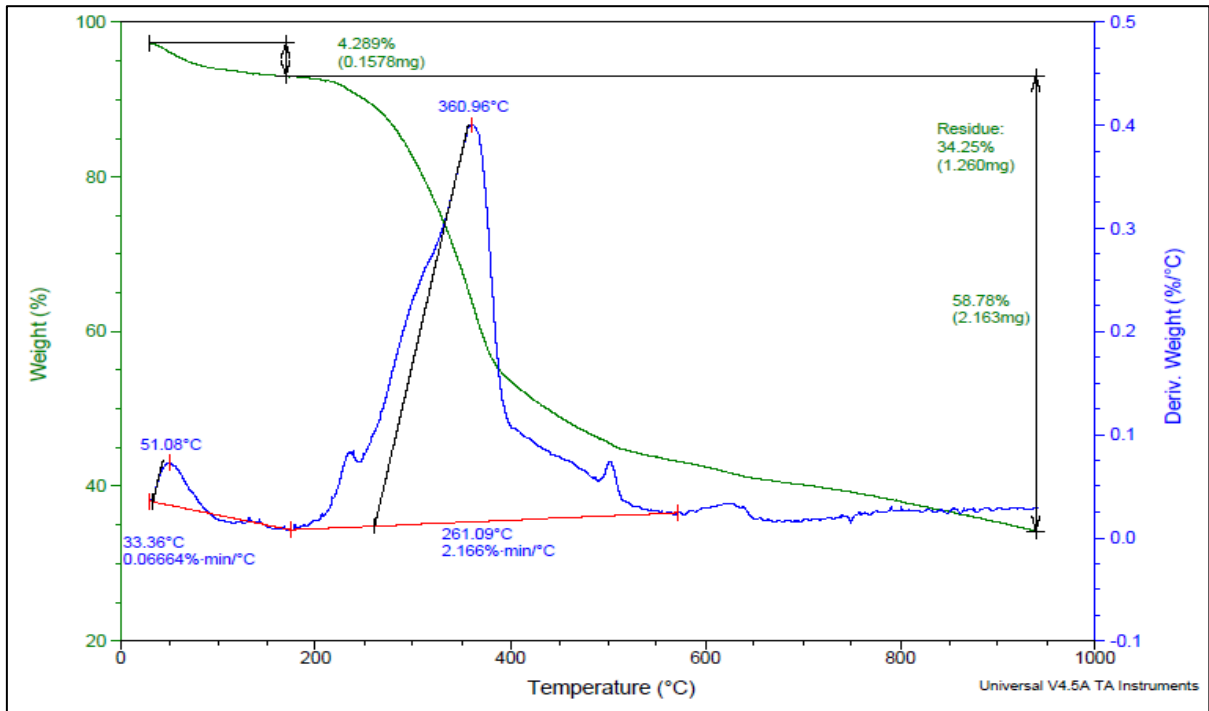
Na Figura 21 estão apresentados os dados da análise térmica da biomassa em estudo por meio das curvas TG/DTG. Pode-se verificar a redução da umidade, que graficamente é demonstrada pelo aparecimento de um evento na curva da amostra de poda de árvores, com início a 40 °C e finalização em torno de 160 °C, correspondente à perda de água. Esse evento se encontra bem superior ao ponto de ebulição da água.

Segundo Gómez (2002), isso se deve ao fato que materiais com maior teor de cinzas na sua composição química têm o máximo desprendimento de voláteis a temperaturas mais elevadas. Quanto maior o teor de matéria inorgânica existente na amostra maior a possibilidade de o material orgânico estar diluído com o material inorgânico, provocando então um

retardamento da transferência de calor no interior das partículas e conseqüentemente a difusão dos voláteis para fora dessas.

O percentual de perda de massa à temperatura de 150 °C foi de 8,42 %, valor bem próximo do obtido para o teor de umidade dessa amostra na análise gravimétrica clássica (7,96 %).

Figura 21 - Curva termogravimétrica de amostra de poda de árvore



Fonte: (AUTOR, 2019).

Em seguida são observados dois eventos de decomposição de matéria orgânica, sendo o primeiro em torno de 200 e 400 °C e o segundo entre 420 e 600 °C. A partir de 600 °C observa-se uma diminuição na degradação térmica da amostra.

Percebe-se uma diminuição do teor de cinzas do material com o aumento da temperatura, e isso se dá pela quebra de ligações do carbono inorgânico presente na forma de compostos carbonatados (CO_3^{2-} , HCO_3^-), na decomposição de óxidos inorgânicos, bem como na decomposição de lignina.

Segundo Pedroza et al., (2014) a decomposição da lignina remanescente inicia-se em temperaturas baixas, no entanto, ela continua ocorrendo até em torno de 900 °C. Biagini et al., (2002), no estudo da pirólise de biomassa residual, atribuíram as perdas de massa ocorridas a temperaturas inferiores a 600°C à degradação térmica da matéria orgânica, e as perdas ocorridas acima de 600°C à decomposição da matéria inorgânica, como carbonato de cálcio, por exemplo.

Segundo Shen e Zhang (2003), a decomposição térmica de alguns compostos e grupos funcionais obedecem a uma faixa de temperatura e que os compostos oxigenados geralmente se decompõem em temperaturas mais elevadas que os outros compostos orgânicos.

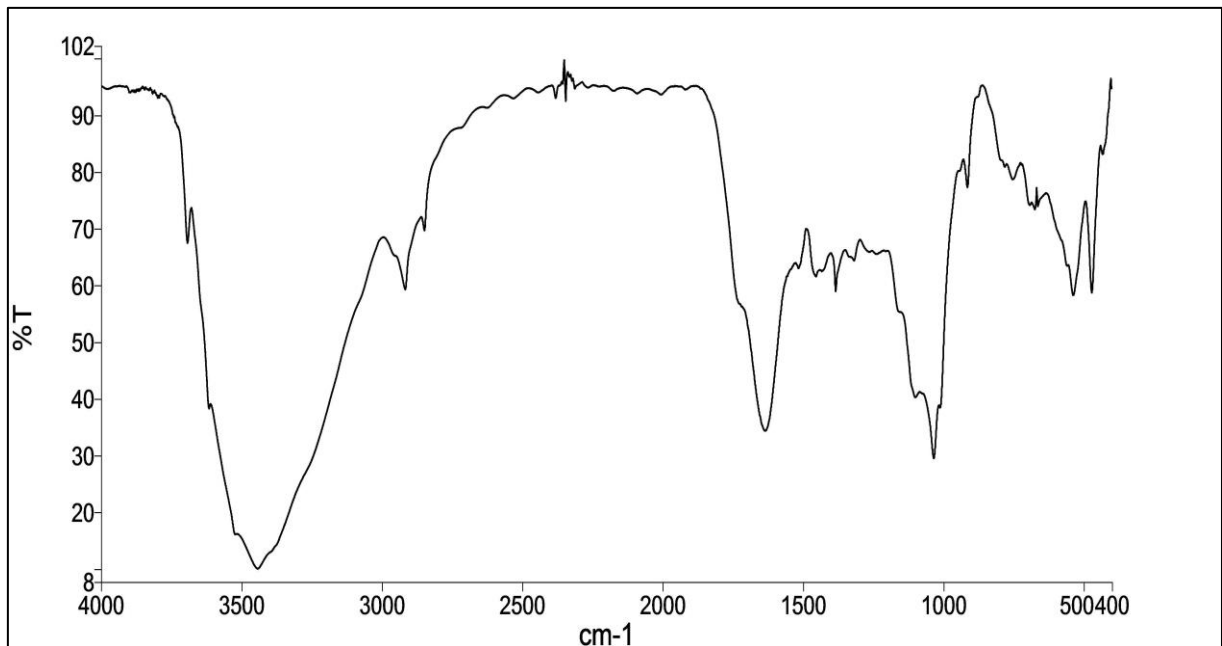
6.1.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

O espectro na região do infravermelho da biomassa em estudo pode ser observado na Figura 22. As principais características são atribuídas à presença de lignina, celulose e hemicelulose no material, se tratando da composição natural de biomassas lignocelulósicas.

O espectro absorvido pela amostra de poda de árvore apresenta as seguintes bandas: uma banda larga e intensa em aproximadamente 3500 cm^{-1} é atribuída à deformação axial do grupo O – H existente nas estruturas da lignina, hemicelulose e celulose; em 2919 cm^{-1} a banda é referente à deformação axial do grupo C – H; a banda em 1637 cm^{-1} descreve o estiramento vibracional do grupo carbonila, isto é, presença de cetonas, ácidos carboxílicos e aldeídos existentes na estrutura da hemicelulose; uma banda de pequena intensidade por volta de 1454 cm^{-1} é causada pelo estiramento vibracional de C = C representados por alcenos e estruturas aromáticas que há na estrutura da lignina e associada a esta, observa-se a banda em 1034 cm^{-1} que expõe a deformação angular fora do plano das ligações = C – H .

A presença desses grupos funcionais indica que a biomassa em estudo é de grande potencial energético, podendo ser utilizada na produção de bio-óleo e carvão, através do processo de pirólise, bem como na produção de briquetes para a queima direta.

Figura 22 - Curva termogravimétrica de amostra de poda de árvore



Fonte: (AUTOR, 2019).

6.2 Degradação Térmica dos Resíduos de Podas de Árvores (testes iniciais)

A operação do reator de leito fixo, considerado satisfatório na unidade de pirólise, com controle flexível e capaz de permitir um manuseio fácil e versátil dos resíduos e processamento de inúmeras biomassas em forma de pó. Este processo visa a obtenção de combustíveis ou frações que podem ser utilizados como aditivos ao diesel/gasolina de qualidade, para aplicações automotivas ou mesmo em turbinas industriais.

Prevê-se também, um melhor aprimoramento e aperfeiçoamento do processo para a obtenção de bio-óleo e carvão a partir do aproveitamento da biomassa residual através da rota termoquímica. Com o aproveitamento desse do resíduo, espera-se reduzir o impacto ambiental da disposição final dessa matéria prima. Espera-se que a tecnologia gerada no presente trabalho possa ser estendida ao setor industrial. Além disso, a formação de recursos humanos qualificados na área deve garantir a potencialidade de recursos renováveis.

Os dados experimentais obtidos nos testes iniciais da pirólise de poda de árvores são apresentados nas Tabelas 8 e 9 para a produção de carvão e líquidos, respectivamente.

Tabela 8 - Dados de rendimento de carvão obtidos durante os ensaios de pirólise de poda de árvores

Experimentos	Temperaturas (°C)	
	500	550
	Rendimento (%)	Rendimento (%)
1	35,32	34,17
2	32,20	34,17
3	35,57	32,87
4	32,63	27,06
Média	33,93	32,07
Desvio Padrão	1,76	3,39
Graus de Liberdade	3	3

Fonte: (AUTOR, 2019).

A média obtida da fração sólida foi de 33,93% numa temperatura de 500°C e 32,07% a 550°C.

Tabela 9 - Dados de rendimento de líquidos obtidos durante os ensaios de pirólise de poda de árvores

Experimentos	Temperaturas (°C)	
	500	550
	Rendimento (%)	Rendimento (%)
1	28,39	32,85
2	37,43	30,10
3	28,57	29,89
4	30,89	30,01
Média	31,32	30,71
Desvio Padrão	4,23	1,43
Graus de Liberdade	3	3

Fonte: (AUTOR, 2019).

A média obtida da fração líquida foi de 31,32% numa temperatura de 500°C e 30,71% a 550°C.

Foi aplicado o *Teste-t* simulando variâncias equivalentes nos dois tratamentos estudados, com o objetivo de se verificar a existência ou não de diferença significativa entre eles (Tabelas 10 e 11).

Tabela 10 - Análise estatística através do *Teste-t* simulando variâncias equivalentes para a produção de carvão em ensaios de pirólise de poda de árvores

	500 °C	550 °C
Média	33,9%	32,07%
Variância	3,101533333	11,520025
Observações	4	4
Variância agrupada	7,310779167	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	6	
Stat t	0,974158101	
P(T<=t) uni-caudal	0,183799946	
t crítico uni-caudal	1,943180281	
P(T<=t) bi-caudal	0,367599891	
t crítico bi-caudal	2,446911851	

Fonte: (AUTOR, 2019).

Tabela 11 - Análise estatística através do *Teste-t* simulando variâncias equivalentes para a produção de líquidos em ensaios de pirólise de poda de árvores

	500 °C	550 °C
Média	31,32%	30,71%
Variância	17,89	2,04
Observações	4	4
Variância agrupada	8,78	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	6	
Stat t	-0,19	
P(T<=t) uni-caudal	0,42	
t crítico uni-caudal	1,94	
P(T<=t) bi-caudal	0,86	
t crítico bi-caudal	2,45	

Fonte: (AUTOR, 2019).

Os dados observados nas Tabelas 10 e 11 informam que não existem diferenças significativas de médias de produção de carvão e líquidos no processo de pirólise de poda de árvores nos dois tratamentos empregados (temperaturas de 500 e 550 °C, no nível de 95 % de confiança. Isso indica que o reator de pirólise pode ser operado em temperatura mais baixa, representando assim uma economia de energia do processo.

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

da biomassa, com conseqüente aumento na quantidade de líquidos pirolenhosos e gases e, conseqüentemente menor rendimento em carvão.

6.3 Rendimentos de carvão obtidos durante a pirólise de poda de árvores

Os resultados experimentais obtidos no planejamento DCCR são apresentados na Tabela 12. Nesse planejamento foram investigados os seguintes fatores: temperatura do reator (°C) e Taxa de aquecimento (°C /min). Os rendimentos percentuais de carvão foram considerados as respostas do planejamento experimental.

Tabela 12 - Resultados do Planejamento 2² Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) obtidos para a produção de carvão durante a pirólise de poda de árvores

Ordem dos Experimentos	Fatores		Rendimento Carvão (%)
	Temp (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	
1	-	-	54,30
2	+	-	33,50
3	-	+	55,10
4	+	+	24,90
5	0	0	52,10
6	0	0	53,20
7	0	0	52,70
8	1,4142	0	55,50
9	0	1,4142	34,10
10	1,4142	0	25,10
11	0	-1,4142	38,00

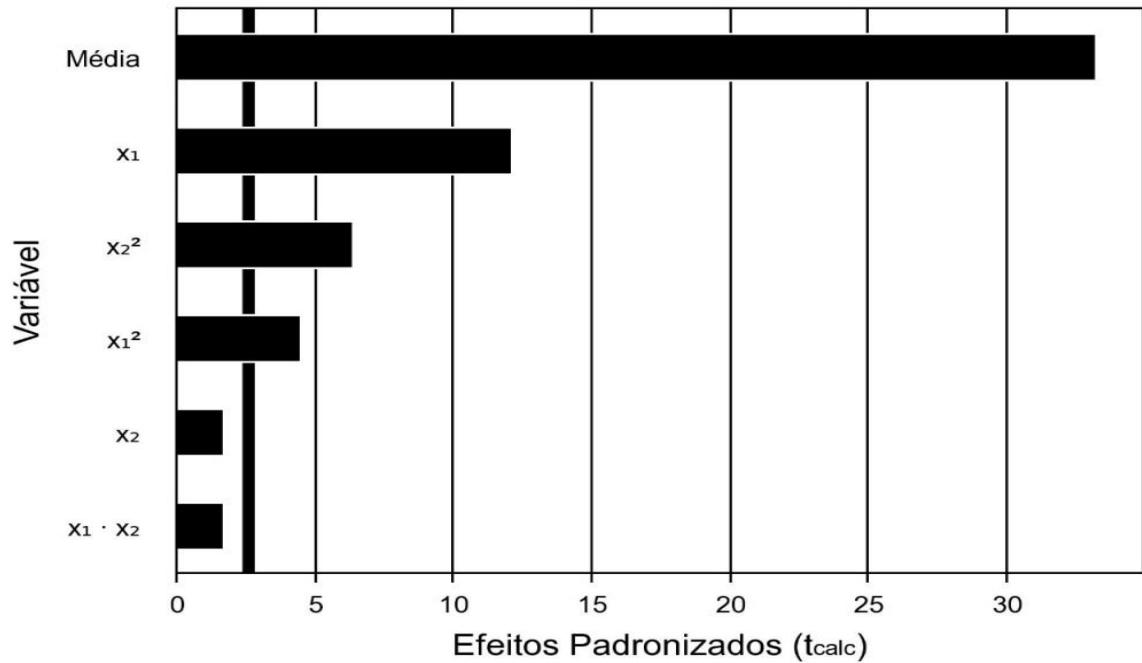
Fonte: (AUTOR, 2019).

O diagrama de Pareto (Figura 23) gerado a partir dos dados do planejamento fatorial já mencionado indica que a temperatura e a taxa de aquecimento de reação tiveram um efeito negativo para a produção de carvão. Esses dados mostram que, o aumento da temperatura de 360 para 640 °C e taxa de aquecimento do sistema de 23 a 37 °C/min favoreceram a diminuição da geração de carvão no processo.

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

comportamentos dos componentes individuais da biomassa: celulose, hemicelulose, lignina, ácidos húmicos, hidrocarbonetos sólidos.

Figura 23 - Representação do Diagrama de Pareto obtido do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) obtidos para a produção de carvão durante a pirólise de poda de árvores



Fonte: (AUTOR, 2019).

O maior rendimento de carvão foi de 55,50%, sendo esse experimento operado nas condições: (a) temperatura do sistema 360 °C e (b) taxa de aquecimento de 30 °C/min. O menor rendimento (24,90 %) foi obtido com as condições experimentais (temperatura do sistema = 600 °C e taxa de aquecimento = 37 °C/min).

A Tabela 13 mostra os coeficientes de regressão das variáveis estudadas na obtenção de carvão durante a pirólise de poda de árvores. Foi considerado também o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados em vermelho (a um nível de 95% de confiança).

Tabela 13 - Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2² obtidos da produção de carvão em sistema de pirólise de poda de árvores, em intervalo de 95% de confiança

Fatores	Coeficientes regressão	Erro Padrão	T _{calc}	p-valor
Média	52,67	1,59	33,19	0,0000
Temp (L)	- 11,75	0,97	- 12,09	0,0001
Temp (Q)	- 5,24	1,16	- 4,53	0,0062
Taxa (L)	- 1,66	0,97	- 1,71	0,1474
Taxa (Q)	- 7,36	1,16	- 6,37	0,0014
Temp x Taxa	- 2,35	1,37	- 1,71	0,1480

Fonte: (AUTOR, 2019).

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a obtenção de carvão durante a pirólise de biomassa empiricamente, conforme Equação 1.

$$\text{Rendimento de Carvão (\%)} = 52,67 - 11,75 X_1 - 1,66 X_2 - 5,24X_1^2 - 7,36X_2^2 - 2,35 X_1.X_2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: X_1 = Temperatura (°C); X_2 = taxa de aquecimento (°C/min) (em valores codificados)

A Tabela 14 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a produção de carvão na pirólise de poda de árvores.

Tabela 14 - ANOVA para a produção de carvão em processo de pirólise de poda de árvores

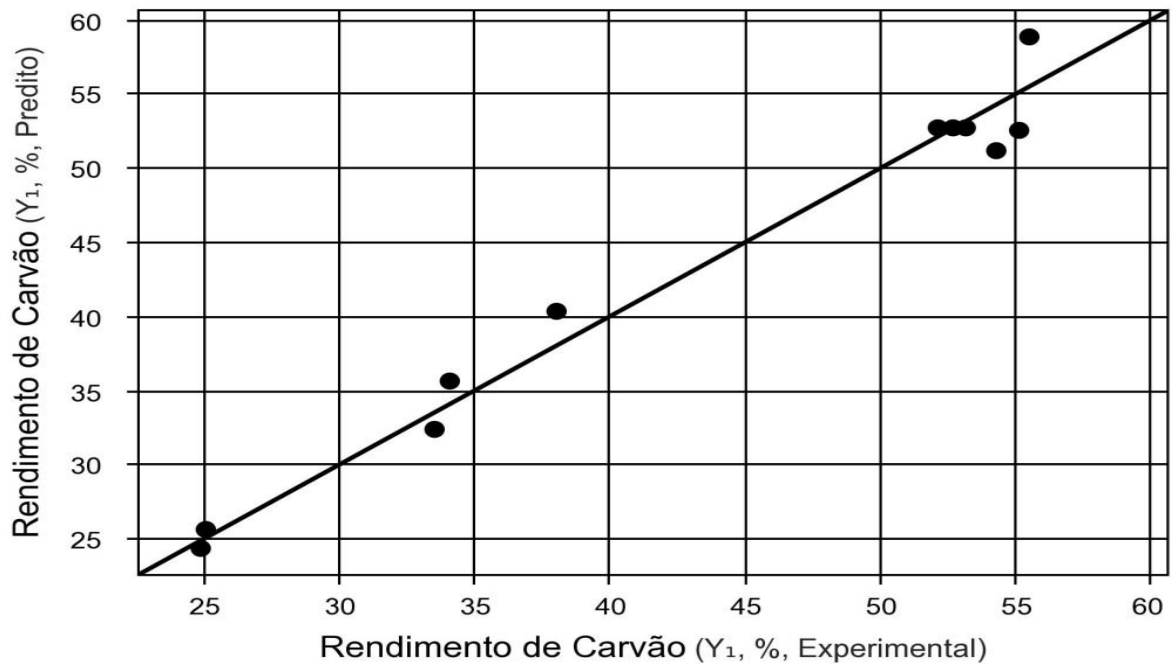
Fonte de variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Regressão	1513,2	5	302,6	40,1	0,00049
Resíduos	37,8	5	7,6		
Falta de ajuste	37,2	3	12,4	40,8	0,02399
Erro puro	0,6	2	0,3		
Total	1551,0	10			

$R^2 = 0,9756$; $F_{\text{tabelado}} (5; 5; 0,05) = 5,05$.

Fonte: (AUTOR, 2019).

O coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 0,9756, indicando um bom ajuste do modelo, justificado pela apreciável aglomeração de pontos próximos da reta representativa. A Figura 24, ou seja, este gráfico mostra os valores previstos a partir do planejamento experimental versus os valores observados após a pirólise.

Figura 24 - Valores observados versus previstos, para a obtenção de carvão a partir da pirólise da poda de árvore



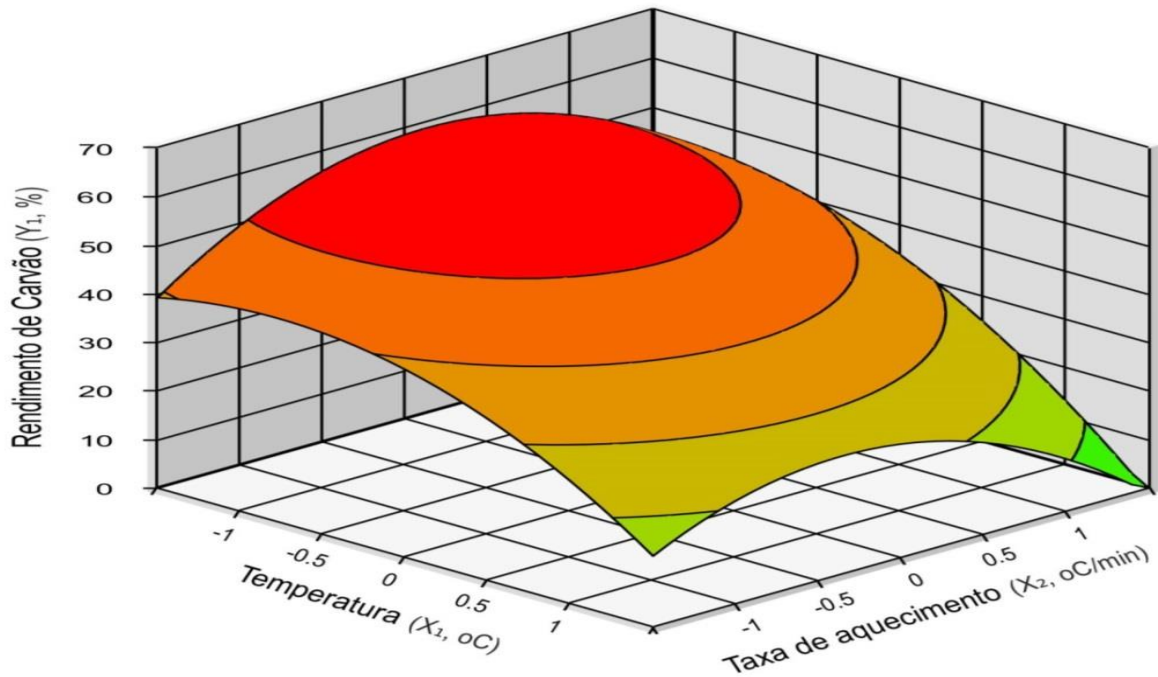
Fonte: (AUTOR, 2019).

Para confirmação da significância dos parâmetros do modelo pela análise da ANOVA (Tabela 14), foi realizado o Teste F. Para ser significativo estatisticamente, o valor de F obtido da regressão deve ser maior que o valor de F_{tabelado} (NETO et al., 2007; RODRIGUES E LEMMA, 2009).

O valor de $F_{\text{calculado}}$ foi determinado pela expressão, $F_{\text{calculado}} = \text{Quadrado médio regressão}/\text{Quadrado médio erro}$. Comparando o valor de $F_{\text{calculado}}$ (40,1) para a regressão com o valor de F_{tabelado} ($F_{\text{tabelado}} = 5,05$), verifica-se uma regressão significativa.

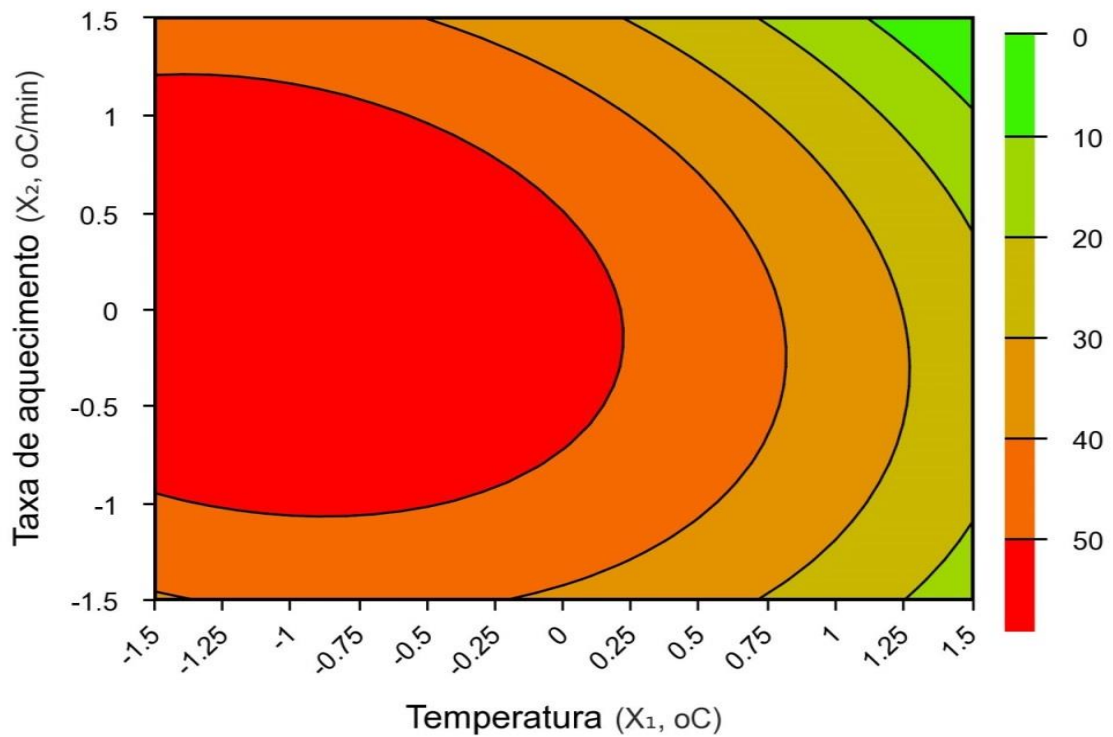
Portanto, os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. A máxima quantidade de carvão foi obtida em condições de baixa temperatura, conforme observado na superfície de resposta gerada pelo modelo (Figura 25) e nas curvas de contorno (Figura 26).

Figura 25 – Superfície de Resposta para a obtenção de carvão a partir da pirólise de poda de árvores, com os fatores Temperatura e Taxa de aquecimento do sistema



Fonte: (AUTOR, 2019).

Figura 26 – Curvas de contorno para a produção de carvão a partir da pirólise de poda de árvore



Fonte: (AUTOR, 2019).

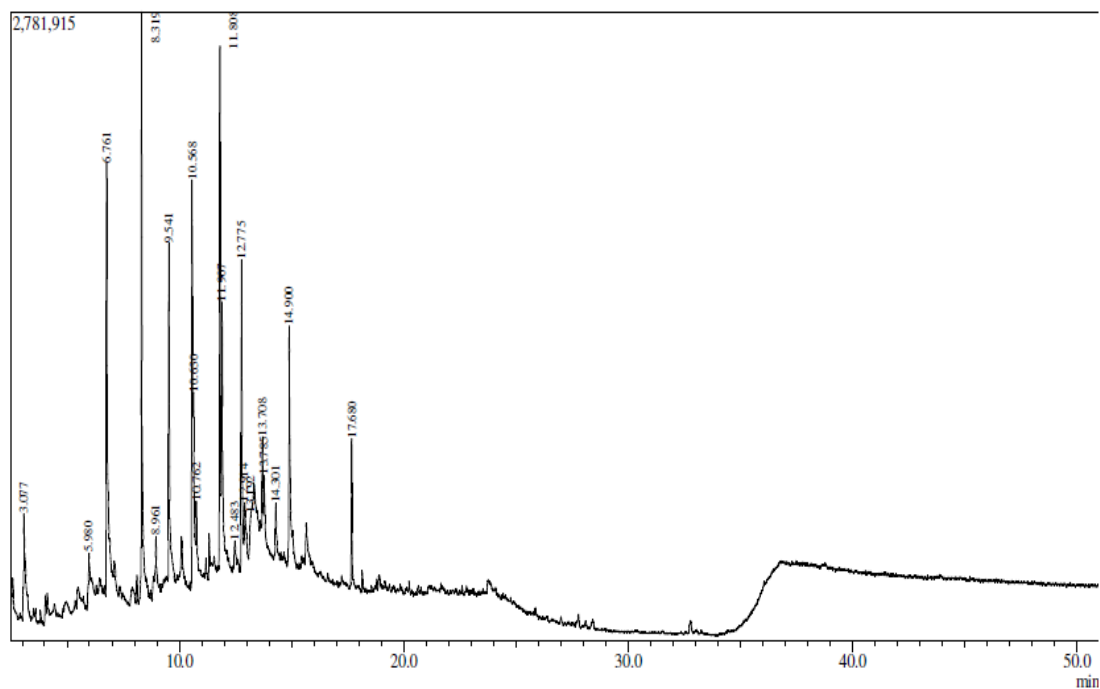
6.4 Determinação das características dos produtos da pirólise de podas de árvores

6.4.1 Características do Bio-óleo

6.4.1.1 Cromatografia com espectrometria de massa (CG/EM) do bio-óleo

As análises do bio-óleo foram realizadas na Central Analítica da USP (Figura 27). Apresenta o cromatograma obtido durante a análise do bio-óleo da poda de árvores através da técnica analítica cromatografia gasosa acoplada ao espectrômetro de massa (CG/EM).

Figura 27 – Análise cromatográfica (CG-EM) do bio-óleo da poda de árvores



Fonte: (AUTOR, 2019).

A Tabela 15 mostra os principais compostos presentes no bio-óleo obtido em reator de leito fixo nas seguintes condições experimentais: temperatura de 600 °C e taxa de aquecimento de 37 °C/min.

Tabela 15 - Principais compostos orgânicos presentes no bio-óleo obtido em reator de leito fixo a 550 °C

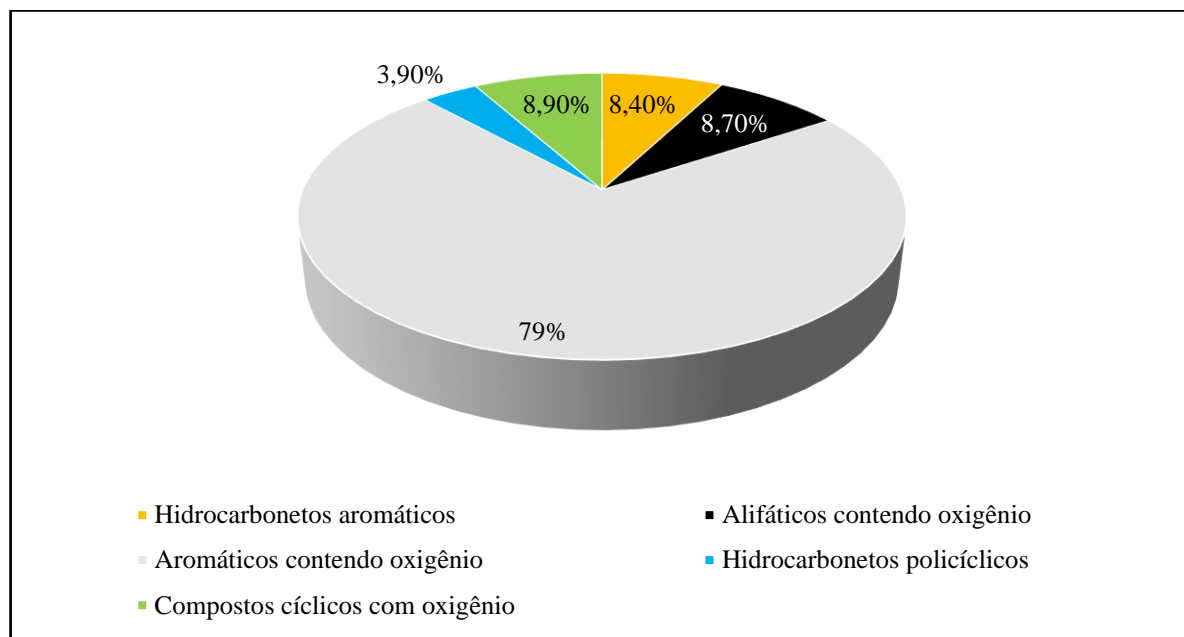
Pico	Tempo de retenção (min)	Nome do possível composto
1	3,0	Furan, 2,5-dimethyl-
2	5,9	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-
3	6,7	Phenol, 2-methoxy-
4	8,3	Creosol
5	8,9	3,4-Dimethoxytoluene
6	9,5	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-
7	10,5	Phenol, 2,6-dimethoxy-
8	10,6	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)-, acetate
9	10,7	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-
10	11,8	3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene
11	11,9	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-
12	12,4	t-Butylhydroquinone
13	12,7	Benzene, 1,2,3-trimethoxy-5-methyl-
14	12,9	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-
15	13,1	.beta.-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro-
16	13,7	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-
17	13,8	2,4-Hexadienedioic acid, 3,4-diethyl-, dimethyl ester
18	14,3	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-
19	14,9	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-
20	17,6	Naphthalene, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-

Fonte: (AUTOR, 2019).

A Figura 28 apresenta a área dos picos dos cromatogramas obtidos para o bio-óleo em função dos grupos funcionais das moléculas dos principais constituintes.

O bio-óleo em estudo é constituído de hidrocarbonetos alifáticos contendo oxigênio, hidrocarbonetos aromáticos, compostos aromáticos contendo oxigênio, compostos cíclicos com oxigênio e policíclicos.

Figura 28 – Percentual de áreas dos cromatogramas em função dos grupos funcionais dos constituintes do bio-óleo



Fonte: (AUTOR, 2019).

Os compostos fenólicos foram encontrados em maior proporção, em torno de 79 %, destacando-se os seguintes compostos: Phenol, 2-methoxy-, Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-, Phenol, 2,6-dimethoxy-, Phenol, 2-methoxy-4-propyl-, Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)-acetate, Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)- e Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-.

Esses compostos são amplamente utilizados na indústria química. Segundo Pedroza (2011), o uso primário do fenol está associado à produção de resinas fenólicas que são utilizadas na construção de madeira compensada, automóveis e nas indústrias de aparelhos eletrodomésticos.

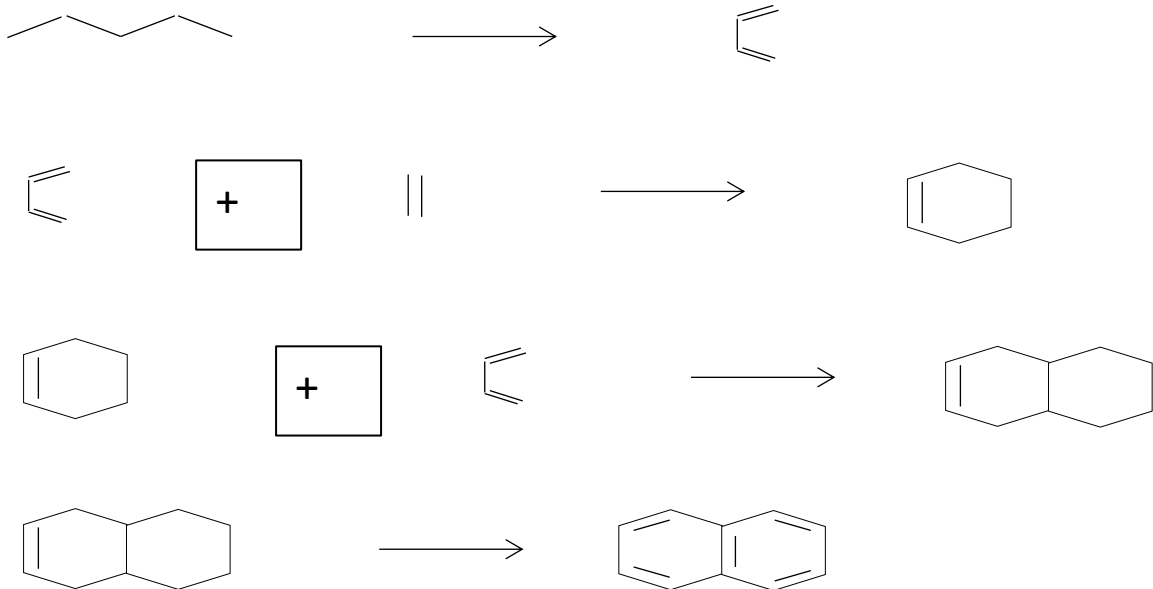
Os fenóis também são empregados na fabricação de produtos intermediários da fabricação de nylon e resinas epóxicas. Os compostos fenólicos apresentam ação anti-séptica e podem ser aplicados em desinfetantes e em produtos de higiene pessoal.

Naphthalene, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)- foi o único composto policíclico aromático identificado no bio-óleo da poda de árvore. Vários autores apontam os mecanismos de reação de Diels-Alder como responsáveis pela formação de hidrocarbonetos poliaromáticos na pirólise de biomassa, em que via desidrogenação de alcenos e dienos, ciclizações e subsequente aromatização produzem compostos aromáticos (LEAL, 2010; PEDROZA, 2011).

Na Figura 29 são apresentadas as reações químicas de formação de hidrocarbonetos nos óleos pirolíticos. Sánchez et al., (2009), informam que a temperatura do processo de pirólise é uma variável que interfere na formação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Os autores

demonstraram em estudos anteriores que as quantidades desses compostos foram insignificantes para temperaturas inferiores a 500 °C, e observaram um aumento substancial na concentração de poliaromáticos para temperaturas superiores a 700 °C.

Figura 29 – Mecanismo de formação de hidrocarbonetos poliaromáticos no bio-óleo



Fonte: (AUTOR, 2019).

Benzene, 1,2,3-trimethoxy-5-methyl- foi o único hidrocarboneto aromático encontrado. Entre os hidrocarbonetos alifáticos contendo oxigênio, destaca-se o composto 2,4-Hexadienedioic acid, 3,4-diethyl-, dimethyl ester.

Doshi, Vuthaluru e Bastow (2003) estudaram as propriedades do bio-óleo, tais como seu odor forte (causados por componentes voláteis), e a viscosidade elevada. Segundo os autores, o elevado teor de oxigênio no líquido causa a sua instabilização devido a reações de polimerização, o que aumenta a viscosidade do óleo, perdendo valor na comercialização. Para melhorar as características do óleo obtido da poda de árvore, formado basicamente de ácidos graxos, foram realizadas reações de esterificação, o que melhorou a estabilidade do produto, reduzindo o odor e a viscosidade em aproximadamente quatro vezes. Os autores concluíram que a esterificação do óleo de pirólise é um método viável e com potencial econômico.

Não foram identificados compostos halogenados e sulfurados na amostra de bio-óleo analisada nessa pesquisa.

6.4.1.1 Densidade e pH do bio-óleo

A Tabela 16 apresenta os valores de pH e densidade do bio-óleo obtido nas diferentes condições experimentais. Os valores de pH se situaram na região ácida, sendo o menor valor igual a 2,9. De acordo com Rodrigues (2019) os baixos valores de pH do bio-óleo de biomassas lignocelulósicas estão relacionados à presença de ácidos carboxílicos e outras espécies orgânicas com caráter ácido, o que o torna corrosivo para estruturas comuns. Segundo Pedroza (2011), a maior parte da acidez é devido à presença de ácido acético, porém há também outros ácidos (carboxílicos de grandes cadeias carbônicas, fenóis e outros).

De acordo com Bridgwater & Peacocke, (2000), o bio-óleo tem em sua constituição uma quantidade significativa de ácidos orgânicos derivados da degradação térmica, o que confere um caráter ácido (pH = 2,5) ao líquido em questão, sendo necessário portanto, o uso de recipientes resistentes de caráter inoxidável no seu armazenamento.

A corrosividade está diretamente ligada ao aumento de temperatura e do teor de umidade (CZERNIK & BRIDGWATER, 2004).

Tabela 16 - Valores de pH e densidade de amostras de bio-óleo obtidas nessa pesquisa

Fatores		Características do bio-óleo	
Temp(°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	pH (-)	Densidade (g/mL)
-	-	3,1	1,02
+	-	3,4	1,05
-	+	2,9	1,02
+	+	3,7	1,02
0	0	3,8	1,06
0	0	3,2	1,05
0	0	3,0	1,05
1,4142	0	3,4	1,10
0	1,4142	3,7	1,07
1,4142	0	3,5	1,01
0	-1,4142	3,2	1,00

Fonte: (AUTOR, 2019).

A densidade do bio-óleo obtido da poda de árvores variou entre 1,00 e 1,10 g/mL. Segundo Oasmaa e Peacocke (2001), a densidade de bio-óleos está relacionada com o conteúdo de água presente no líquido. O autor reporta valores de densidade de 1,2 - 1,3 g/mL. Figueiredo

(2011) informa que a densidade é de pouca importância como uma indicação de característica de combustão.

A água é a substância mais abundante na composição do bio-óleo, sendo resultante do teor de umidade inicial da biomassa e de reações de desidratação durante a degradação térmica. Segundo a literatura, a água varia entre 15% e 30% da massa total do bio-óleo (QIANG et al., 2009). Oasmaa e Czernik (2001) afirmam que o bio-óleo apresenta elevado teor de água que varia de 15 a 30 % em massa, proveniente da umidade original da biomassa e do produto de desidratação dos constituintes do bio-óleo durante a reação de pirólise, e que o teor de oxigênio no bio-óleo varia de 35 a 40 % em massa, distribuídos em mais que 300 compostos identificados no óleo. Segundo Czernik e Bridgwater (2004), estas e outras propriedades do bio-óleo podem variar em função do processo de obtenção e da biomassa utilizada.

De acordo com Calabria et al., (2007), a presença de água nas amostras de bio-óleo tem consequências negativas e positivas para o combustível. A umidade diminui o poder calorífico, dificulta a ignição, diminui as taxas de combustão, entre outros. Porém reduz a viscosidade, facilita a atomização e diminui a emissão de poluentes durante a combustão

6.4.2 Características do carvão obtido na pirólise de poda de árvores

6.4.2.1 Análise Imediata e elementar do carvão

Os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo das amostras de carvão obtidas da pirólise de poda de árvores em reator de leito fixo estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Análises imediatas e Análise elementar das amostras de carvão

Variável analítica	Carvão Pirolítico dessa pesquisa			Outros autores	
	1	2	3	Rodrigues (2019)	Machado (2019)
Umidade (%)	9,9	8,9	9,1	4,4	3,4
Cinzas (%)	12,3	13,1	11,8	37,6	17,1
M. Volátil (%)	59,0	58,5	59,7	22,2	38,7
Carbono Fixo (%)	18,8	19,5	19,4	6,8	40,8
Carbono (%)	68	71	71	56,1	72,3
Hidrogênio (%)	1,5	1,8	2,0	1,2	0,8
Nitrogênio (%)	1,7	1,0	0,9	0,7	1,2

Fonte: (AUTOR, 2019).

Legenda:

1 – carvão obtido a 400 °C, com taxa de aquecimento de 25 °C/min em reator de leito fixo empregando poda de árvores

2 – carvão obtido a 500 °C, com taxa de aquecimento de 25 °C/min em reator de leito fixo empregando poda de árvores

3 – carvão obtido a 600 °C, com taxa de aquecimento de 30 °C/min em reator de leito fixo empregando poda de árvores

Carvão Rodrigues (2019) – obtido a 500 °C, empregando casca de arroz em reator de leito fixo

Carvão Machado (2019) – obtido a 550 °C usando sabugo de milho em reator de leito fixo

De acordo com Rodrigues (2019), as propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão podem variar, dependendo do tipo de matéria-prima e dos parâmetros do processo da pirólise.

O carvão produzido nessa pesquisa apresentou uma média no teor de umidade em torno de 9,1 %. As cinzas das amostras se situaram entre 11,8 e 13,1 %. Valores altos de cinza podem indicar baixo poder calorífico, mas este fator não influencia a finalidade em que se propõe este estudo, pois são provenientes dos compostos minerais presentes no material (RODRIGUES, 2019).

O valor médio observado para o material volátil do carvão dessa pesquisa foi de 59%, indicando uma diminuição dos constituintes orgânicos (celulose, hemicelulose e lignina) da biomassa durante o processo de pirólise. Segundo Vieira (2018) quando se realiza o processo de pirólise temperaturas mais baixas, o conteúdo de material volátil é maior e o carbono fixo é menor.

Conforme Paes et al., (2012), o teor de material volátil pode afetar a estrutura do carvão produzido, uma vez que a porosidade, o diâmetro médio dos poros, a densidade e outras características físicas do carvão podem ser afetadas por meio da eliminação de compostos voláteis ocorrida durante o processo de degradação térmica do material orgânico.

O teor de carbono fixo foi de 19,5 % na amostra de carvão produzida a 500 °C, com taxa de aquecimento de 25 °C/min em reator de leito fixo. O conteúdo de carbono fixo tem relação com a quantidade de carbono presente no carvão e com o poder calorífico, sendo uma das características químicas de maior influência de sua utilização como combustível.

Quanto às análises elementares (CNH), o carvão proveniente da poda de árvores produzido a 500 °C apresentou 71% de Carbono, Hidrogênio 1,8 % e Nitrogênio 1,0 %. A relação de grande importância na pirólise de biomassa é a relação carbono/hidrogênio (RODRIGUES, 2019), e, neste estudo, a relação C/H para o carvão foi de 39%.

Para referenciar as composições pode-se citar GOMES (2010) que encontrou 40,96% de C para casca de arroz, valor similar ao encontrado para o farelo da soja por SILVA (2018) com 41,99%. Portanto essa relação dos macronutrientes tende a aumentar no carvão quando comparado com a biomassa, devido a maior aromatização e alteração química do material.

6.4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão de pirólise

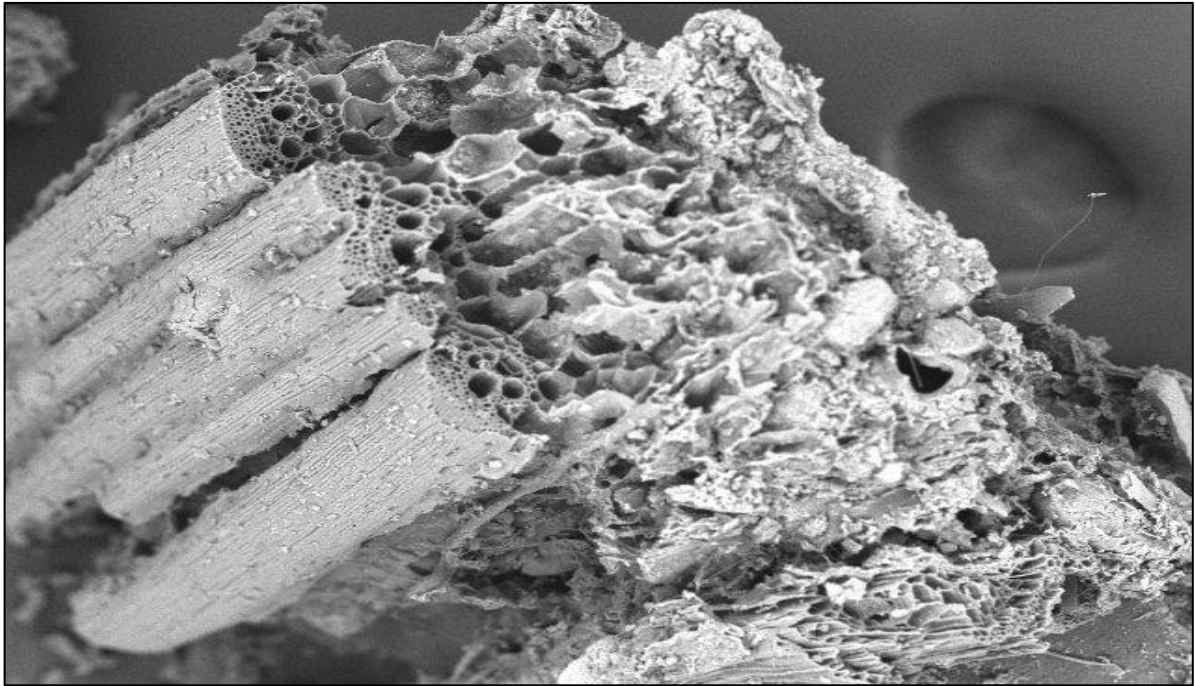
A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi a técnica utilizada para observar a superfície física do carvão obtido da pirólise de poda de árvores. O carvão utilizado nessa análise foi obtido em reator de leito fixo operado nas seguintes condições: temperatura de pirólise de 500 °C e taxa de aquecimento 25 °C/min.

As Figuras 30 e 31 apresentam imagens obtidas com magnitudes de 500 e 1000 vezes da amostra.

As micrografias revelam que a morfologia das amostras possui superfície com aspecto irregular, com vazios e aberturas. Não há presença evidente e em grande quantidade de partículas com diâmetros definidos, havendo a presença de elementos de composição química variada (PEDROZA, 2010). Na superfície do carvão verificam-se cavidades dos poros com geometrias alongadas e aberturas de formatos irregulares. No geral, o material apresenta-se com partículas de formas indefinidas e com poros com os mais variados tamanhos devido à composição heterogênea do material.

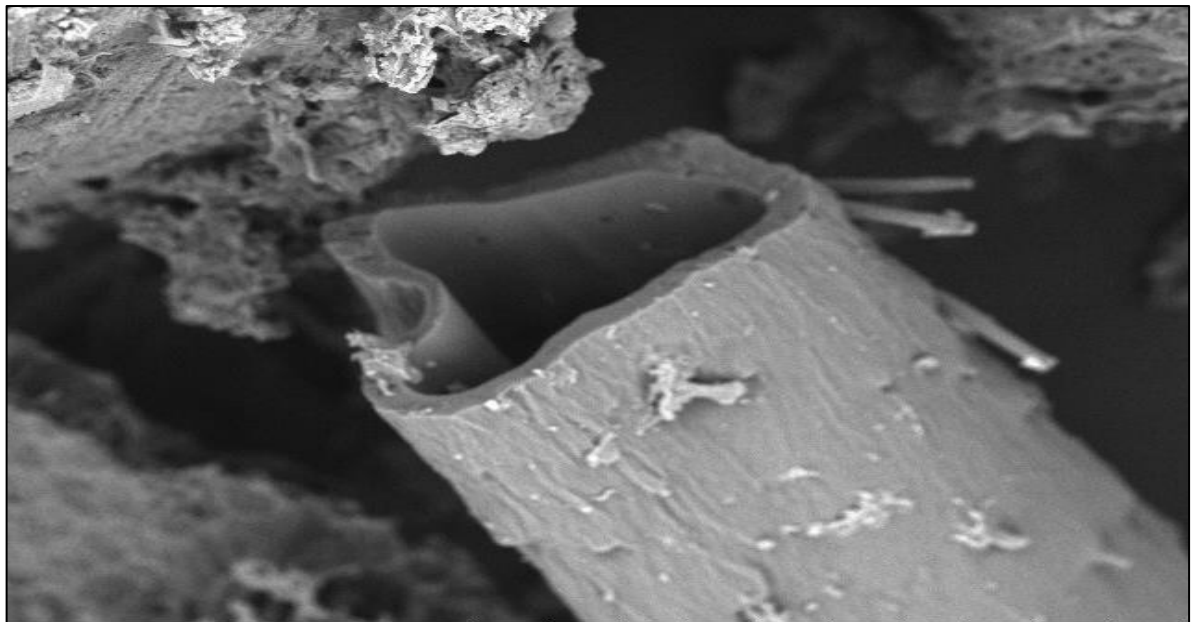
É possível identificar uma vasta quantidade de poros com forma esférica, com superfície rugosa e com presença de fendas. Admite-se, portanto que a elevada quantidade de poros pode contribuir com uma maior da área superficial validando a utilização do material em processos de adsorção.

Figura 30. Microscopia eletrônica de varredura de carvão de pirólise (Ampliação 500x)



Fonte: (AUTOR, 2019).

Figura 31. Microscopia eletrônica de varredura de carvão de pirólise (Ampliação 1000x)



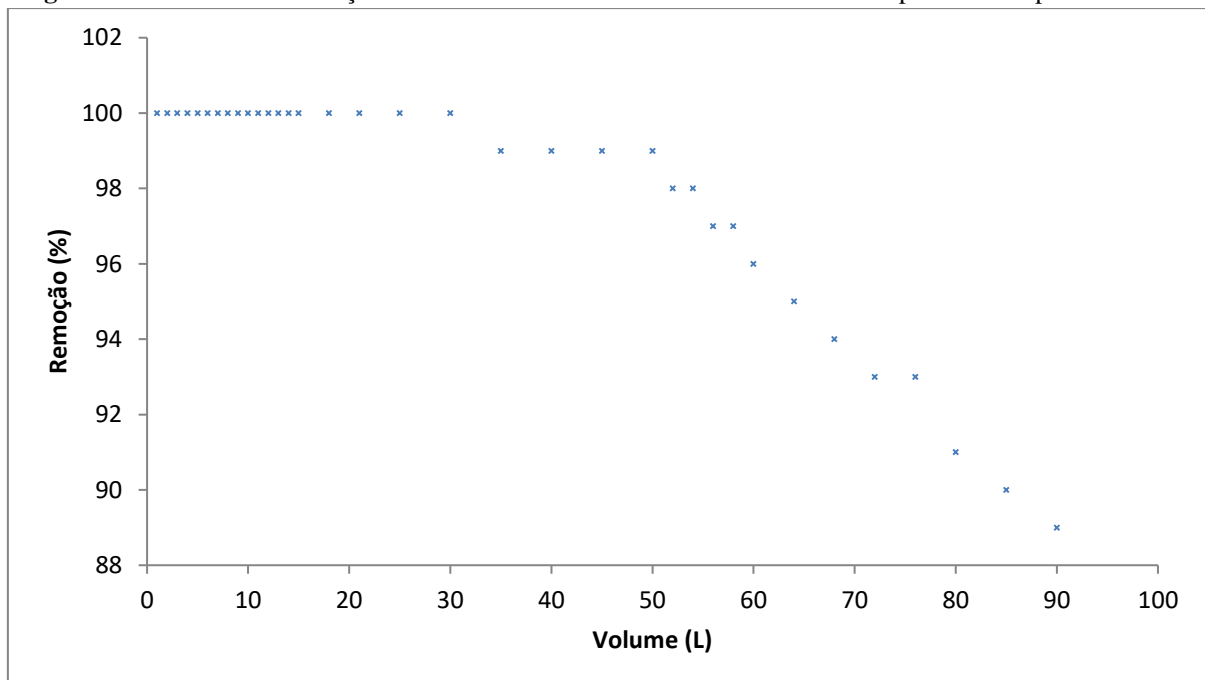
Fonte: (AUTOR, 2019).

6.5 Estudo da remoção de corante em filtro de carvão obtido durante a pirólise de poda de árvores

Os dados experimentais obtidos durante a operação do filtro de carvão utilizado na filtração do corante azul de metileno encontram-se na Figura 32.

O filtro apresentou uma remoção máxima nos primeiros 30 litros da solução do corante em estudo. O gráfico representa este decaimento da eficiência devido a saturação do carvão e a menor eficiência observada foi de 89 %. Essa diminuição da eficiência pode estar associada ao efeito de saturação bem como ao fluxo de filtração empregado.

Figura 32. Eficiência de remoção do corante azul de metileno em filtro de carvão pirolítico de poda de árvores



Fonte: (AUTOR, 2019).

Rahman et al., (2012) estudaram a remoção do corante azul de metileno em filtro descendente constituído de carvão ativado produzido a partir da pirólise de casca de arroz. Nessa pesquisa foi estudado o efeito da taxa de fluxo sendo avaliada a remoção do corante no sistema e fora empregados três níveis para os fluxos: 1,0, 1,4 e 1,8 mL/min.

Segundo o comportamento do filtro, a eficiência de remoção diminui com o aumento da taxa de fluxo. Cerca de 98,43% de azul de metileno foram removidos no fluxo 1,0 mL/min. Para os fluxos de 1,4 e 1,8 mL/min a remoção do corante foi de 96,81 %. Segundo os pesquisadores, esse fenômeno pode ser devido ao fato de que quando a velocidade de fluxo do

corante foi menor, maior é o tempo de contato do azul de metileno com a superfície ativa do adsorvente.

6.6 Eficiência do carvão ativado obtido da poda de árvores no tratamento de água cinza

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos durante o processo de polimento de águas cinzas no sistema de coagulação / floculação / decantação e filtração por carvão obtido a partir de pirólise de poda de árvores.

Tabela 18- Resultados obtidos durante o polimento com água cinza em um sistema de filtração contendo carvão ativado produzido a partir de pirólise de poda de árvores

Parâmetros Analíticos	Resultados			
	P1	P2	P3	P4
Temperatura (°C)	25,1	25,0	25,0	24,9
pH (-)	9,8	7,0	6,7	6,4
Turbidez(uT)	170	8,7	1,2	0,7
DQO (mg/L)	450,5	120,6	45,7	5,8
Sólidos Totais (mg/L)	2340	978	788	679
Sólidos Fixos (mg/L)	1690	845	706	601
Sólidos Voláteis (mg/L)	650	133	82	78
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	412	105	89	78
Cloro residual (mg/L)	0,8	0,7	0,6	ND

ND – não detectado

Fonte: (AUTOR, 2019).

7. CONCLUSÃO

Durante a etapa de coagulação / floculação / decantação, uma boa remoção de partículas de turbidez da água cinza foi observada usando uma dosagem de sulfato de alumínio de 200 mg / L. Os valores de remoção de sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis e turbidez nesta etapa de tratamento foram, respectivamente, 58, 50, 80 e 95%.

Os valores de remoção dos parâmetros de turbidez, DQO, sólidos totais e cloro residual foram 99, 98, 71 e 100%, respectivamente.

O filtro de carvão foi responsável pela etapa final da remoção da matéria orgânica putrescível presente nas águas cinzas. O filtro de carvão foi responsável pela remoção de 87% de DQO.

O processo de polimento empregado nessa pesquisa removeu 64% dos sólidos fixos presentes na água cinza.

O bio-óleo obtido como resultado do processo apresenta alto poder calorífico e ausência de compostos sulfurados, o que aponta para a possibilidade de aplicação deste produto como biocombustível, em substituição do óleo diesel em caldeiras, ligantes na fabricação de briquetes siderúrgicos, emulsões para asfalto, aditivos de gasolina e óleo diesel.

O carvão resultante pode ser empregado como meio filtrante, agindo na adsorção de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas de efluentes, permitindo assim sua aplicação industrial, bem como em residências, propiciando o reúso de águas cinzas, sendo então uma promissora alternativa para a fabricação de filtros para diversos efluentes.

8. REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos –Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15849: resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte –Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969: taques sépticos: unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15849: resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. Rio de Janeiro, 2010
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8849: apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos: procedimentos**. Rio de Janeiro, 1985.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil — Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://bit.ly/2idDOSb>>. Acesso em: 11 de outubro de 2018.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS; **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015**. Disponível em: Acesso em: 31 dez. 2016.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS; **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010**. Disponível em: Acesso em: 31 dez. 2018.
- ALVES, Ricardo Francisco; José Luiz Francisco Alves; Jean Constantino Gomes da Silva; Kaline do Nascimento Ferreira; Rênio Felix de Sena et Al.: **Síntese de carvão ativado visando tratamento de efluente oriundo de refinaria pelo processo de adsorção**. [s. l.], n. May 2015, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2415-66. Standard Test Method for ash Determination**. United States, 1986.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3173-85. Standard Test of Humity**. United States ,1985.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores** / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, 2019.

APHA. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20 ed. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, Washington, 1998.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. **In: VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Monitoramento Ambiental E Geotécnico De Aterros Sanitários, Campina Grande, v. 1, p. 8, nov 2016. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/III-081.pdf>>. Acesso em: 12 fev 2018

BARATTA JUNIOR, A.P.; MAGALHÃES, L.M.S. Aproveitamento de resíduos da poda de árvores da cidade do rio de janeiro para compostagem. **Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta**, v.8, n.1, p.113- 125, 2010.

BERNARDI, A. G. **Organic municipal solid waste (MSW) as feedstock for biodiesel production: A financial feasibility analysis**. 2014. 129 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo. São Paulo. 2014.

BIAGINI, E., LIPPI, F., PETARCA, L., TOGNOTTI, L. Devolatilization rate of biomass and coalbiomass blends: an experimental investigation. **Fuel**, 81, p.1041-1050, 2002.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, 5 jan. 2007.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2 ago. 2010.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Conama nº 316, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Brasília, 29 de out. 2002.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Disponível: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **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 Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Publicação DOU nº 92, de 16/05/2011, pág. 89. Disponível: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 404, de 11 de novembro de 2008**. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos.

BRIDGWATER, T. “Biomass for energy”, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, pp. 1755-1768, 2006.

BREULMANN, M. et al., Hydrochars derived from sewage sludge: effects of pre treatment with water on char properties, phytotoxicity and chemical structure. **Journal Archives of Agronomy and Soil Science**. p. 1-13, 2017.

BRIDGWATER, A. V. & PEACOCKE, G. V. C. Fast pyrolysis processes for biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 4, 1-73, 2000.

CALABRIA, R.; CHIARIELLO, F.; MASSOLI, P. Combustion Fundamentals of Pyrolysis Oils Based Fuels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, V. 31, n. 5, 2007. p. 413 – 420.

CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A. V. Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oils. **Energy & Fuels**, n. 18, 2004. p. 590 – 598.

CARVALHO, W. et al. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, [s.l.], v. 32, n. 8, p.2191-2195, 2009. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s0100-40422009000800033.

CARDOSO, N. F. et al. Application of cupuassu shell as biosorbent for the removal of textile dyes from aqueous solution. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 4, p. 1237-1247, 2011. ISSN 0301-4797.

CASTRO, A. M. de; PEREIRA JÚNIOR, N. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. **Química Nova**, v. 33, p. 181-188, 2010.

CHAOUKI, J. & PATIENCE, G. 2015. **The Centre de Recherche en Ingénierie du Papier**. 3rd generation biorefinery [Online]. Available: Disponível em: <http://www.groupes.polymtl.ca>>. Acessado em: 11 de jun. 2019.

CHRISTENSEN, T.H. AND KJELDSSEN, P., Basic biochemical processes in landfills. Chapter 2.1 in Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, Christensen, T.H., Cossu, R., and Stegmann, R., Eds., **Academic Press**, London, UK, 1989, 29

COLEN, Aymara Gracielly Nogueira. **Caracterização físico-química e química do lodo de esgoto para aplicação como fonte de energia em processo de pirólise**. 2011. 159 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2011.

CORTEZ, Cristiane Lima. Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso: **Aes Eletropaulo**. [s. l.], p. 246, 2011.

COUTO, J. M. de S. **Estudos de tratabilidade do efluente da indústria petroquímica com vistas ao reuso**. 2014, 98f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Rio de Janeiro-RJ.

CZAJCZYŃSKA, Dina et al.: Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 123, p. 387–394, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>>

DOSHI, V. A.; VUTHALURU, H. B.; BASTOW, T. Investigations into the control of odour and viscosity of biomass oil derived from pyrolysis of sewage sludge. **Fuel Processing Technology**, v. 86, p. 885 - 897, 2003.

DAL MOLIN, D. **Caracterização de bio-óleos obtidos por pirólise rápida de serragem de lignocel e de bagaço da cana-de-açúcar e avaliação da influência do uso do catalisador nos produtos obtidos pela pirólise catalítica do bagaço da cana-de-açúcar empregando a GCxGC/TOFMS**. 2015. 277 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2015.

EMLUR. AUTARQUIA ESPECIAL MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA DE JOÃO PESSOA. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos–PMGIRS: Diagnóstico e Planejamento dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos**. João Pessoa. v. 2, 2014 a. Disponível em: <<http://transparencia.joaopessoa.pb.gov.br/dadospublicos/?p=111>>. Acesso em: 13 de abr. 2017.

EMLUR. AUTARQUIA ESPECIAL MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA DE JOÃO PESSOA. **Informações sobre poda anual e custos**. João Pessoa. 2016.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - Ministério de Minas e Energia do Brasil. **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acessado em: 20 nov. 2018.

FARAGE, R. M. P. **Aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos gerados no Polo Moveleiro de Ubá para fins energéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental, área de concentração em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

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. Anais. João Pessoa: ABES, 2001.

FIGUEROA, J. E. J. **Processos termoquímicos para processamento de bagaço de cana-de-açúcar: pirólise em leito fixo e gaseificação em leito fluidizado** – Tese (doutorado) 199p – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, SP: [s.n.], 2015.

FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.getres.ufrj.br/pdf/FILHO_LFB_05_t_M_int.pdf>. Acesso em: 15 mar 2018.

FILHO, Ronaldo Célio dos Santos; HOLANDA, Erika Paiva Tenório de; OLIVEIRA, Luis Carlos Ferreira de; SILVA, Valdir Martiniano Ferreira da. O aproveitamento de resíduos sólidos urbanos, por meio do processo de compostagem aeróbia enriquecida com casca de sururu para aproveitamento na construção civil. **Caderno de ciências exatas e tecnológicas**. Alagoas, v. 4, n. 2, p. 125-134, Novembro, 2017.

FIORI, S; FERNANDES, V.M.C; PIZZO, H. **Avaliação qualitativa e quantitativa do reuso de águas cinzas em edificações.** Ambiente Construído, v. 6, p. 19–30, 2006.

FLORIDO, Priscilla Lopes. **Tratamento de efluentes de refinaria pelo processo combinado de adsorção em carvão ativado e biorreator com membranas.** [s. l.], p. 155, 2011.

GERMÁN F. G. et.al.,. Soybean hulls, an alternative source of bioactive compounds: Combining pyrolysis with bioguided fractionation. **Industrial Crops & Products**, 2017.

GOMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão.** 2002. 369 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade de Campinas, Campinas, SP, 2002.

GOMES, M. S. **Produção de bio-óleo através do processo termoquímico de pirólise.** 2010. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2010.

GÓMEZ, E.O.; LORA, E.E.S.; CORTEZ, L.A.B. **Biomassa Para Energia.** Capítulo I: Biomassa no Brasil e no Mundo. Editora Unicamp, 2ª reimpressão, 2011.

GUEDES, C. L. B. et al. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 781-786, 2010.

KJELDSEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA A E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades - 2017.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/palmas/panorama> > Acessado em: 19 jun. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA A E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2010.** Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf> > Acessado em: 19 jun. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA A E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.** Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf> > Acessado em: 19 jun. 2019.

IPEA. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas.** Relatório de Pesquisa, 2012. Disponível em: <http://ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&id=18253 > Acessado em: 12 jun. 2019.

IPEA. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Relatório de Pesquisa, 2012. Disponível em:

<http://ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&id=18253 > Acessado em: 12 jun. 2019.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Mudança do Clima 2007: Mitigação da Mudança do Clima**. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Genebra, p. 42. 2007

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - **Manual para aproveitamento águas cinza do banho**. 32p, 2016.

LIANG, Chenfei et al. Biochar from pruning residues as a soil amendment: Effects of pyrolysis temperature and particle size. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 164, p. 3–10, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.10.002>>

LIMA, J. D. Modelos de apoio a decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Recife – PE: Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, 2012. 400 p.

MORENO-CASTILLA, C., Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials, *Carbon*, 42: 83, 2004.

LEAL, E. R. M. **Aplicação do processo de pirólise lenta ao lodo de esgoto adicionado de óxido de cálcio e ferro para obtenção do bio-óleo combustível**. 2010. 110p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2010.

LOPES, A. A. **Estudo da gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos na bacia Tietê Jacaré (UGRHI-13)**. São Carlos - SP: Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-04032008125517/publico/Tese_AdrianaAntunesLopes.pdf>. Acesso em: 08 fev 2018

MARTINS, C. H. O Aproveitamento de madeira das podas da arborização viária de Maringá/PR. **Revista Verde**, Mossoró, v. 8, n. 2, p. 257 - 267, 2013.

MASSUKADO, L. M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares**, 2008. 182 f. Tese (Doutorado - Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

MATIELLO, Sabrina. **Avaliação da eficiência de um filtro de adsorção com carvão ativado na purificação de biogás proveniente da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. [s. l.], p. 280000, 2017.

MEIRA, A.M. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. Tese de Doutorado. 179p. (Ciências: Recursos Florestais, com opção em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MESA, J.M.; ROCHA, J.D.; OLIVARES, E.; BARBOZA, L.A.; BROSSARD, L.E.; BROSSARD JUNIOR, L.E. Pirólise Rápida em leite fluidizado: uma opção para transformar biomassa em energia limpa. **Revista Analytica** nº 04, (2003). Disponível

em:http://www.revistaanalytica.com.br/ed_antteriores/04/4%20Art%20Biomassa.pdf.
Acessado em 11 de setembro de 2010.

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

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental/Conselho Estadual de Recursos Hídricos - MG. **Resolução n. 1, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre as classificações dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário [do] Executivo – Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, mai. 2008.

MONTEIRO, José H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**- IBAM. Rio de Janeiro, 2001.

NÓBREGA, K. C. et al. Obtenção e caracterização de argilas organofílicas visando à aplicação em nanocompósitos poliméricos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande** - Brasil, v. 6, p.84-90, 2011.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. (2007). **Como fazer experimentos. Campinas**, Ed. UNICAMP, 480p., 2007.

NIZAMI, A.-S. et al. Energy, Economic and Environmental Savings by Waste Recycling: A Case Study of Madinah City. **Energy Procedia**, v. 142, p. 910 - 915, december 2017.

NOLASCO, A. M. **Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta – *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.: caracterização e perspectivas**. São Carlos. 2000. 171p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

OASMAA, A., PEACOCKE, C. A guide to physical property characterisation of biomass - derived faast pyrolysis liquids, **Technical Research Centre of Finland**, 65p, 2001.

OASMAA, A.; CZERNIK, S. Fuel Oil Quality of Biomass Pyrolysis Oils - State of the Art for the End Users. **Energy & Fuels**, v.13, p.914-921, 1999.

OLDFIELD, E.E. et al. Positive effects of afforestation efforts on the health of urban soils. **Forest Ecology and Management**, Washington, v.313, p.266-273, fev. 2014.

PAUP - Plano de Arborização Urbana de Palmas (2016).

PAES, J. B.; LIMA, C. R., OLIVEIRA, E. O.; SANTOS, H. C. M. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de três espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. *Ciência da Madeira*. **Brazilian Journal of Wood Science**, Pelotas, v. 03, n. 01, p. 01-10, 2012. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v03n01a01>.

PARADELA, F. M. R. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa**. 2012. 322f. Tese (Doutorado em Engenharia Química e Bioquímica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

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

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Tese de Doutorado, Universidade do Rio Grande do Norte, 210 p, 2010.

PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F., PICKLER, A. C., LEAL, E. R. M., MILHOMEN, C. C. Título: Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, 11, p.147-157, dez. 2011.

PEREIRA, A.I.C. **Co-digestão anaeróbia de resíduos verdes e lamas de ETAR para produção de biogás**. 2013. P.98. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2013.

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

JPROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P.F.; NEVES, T.A.; VIEIRA, C.M.M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v.40, n.95, p.317-326, 2012.

QIANG, L.; WEN-ZHI, L.; XI-FENG, Z. Overview of Fuel Properties of Biomass Fast Pyrolysis Oils. **Energy Conversion and Management**, n. 50, 2009. p. 1376 – 1383.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF/Ibama, 2004. Disponível em: <www.funtec.org.br/arquivos/aproveitamento.pdf>.

RAQUEL, Paula et al., Análise do potencial de reutilização dos resíduos provenientes de poda, município de Palmas, Tocantins. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais ISSN 2179-6858 SECTION: Articles TOPIC: Saneamento e Tratamento de Resíduos**, [s. l.], p. 269–284, 2015.

REICHERT, G. A.; MENDES, C. A. B. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentabilidade de resíduos sólidos urbanos. **Eng. Sanit. Ambiental**, v. 19, n. 13, 2014

ROCHA, P. D.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Produção de adsorvente a partir de sabugo de milho para remoção de fenol em escalas laboratorial e industrial (UM ESPAÇO)", p. 8851- 8858. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014**, Blucher Chemical Engineering Proceedings, São Paulo, v.1, n.2, 2015.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. (2009). Planejamento de experimentos e otimização de processos. Campinas (SP), Ed. Cárita, 358p., 2009.

SÁNCHEZ, C. G; CAMPO, E. R. B. Tecnologia da gaseificação. Faculdade de Engenharia Mecânica, **Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, p. 5-2, 5-17, 2003..

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A. Review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, 2011. p.2262-2289.

SANTOS, Lisiane; SANTOS, Denise; PEREIRA, Daniel. **Agroindustriais Production Waste From**. [s. l.], p. 311–319, 2016.

SÃO PAULO. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente. Manual Técnico de Arborização Urbana. São Paulo, SP. SMVMA, 2015. p. 122

SEISP. **Prefeitura de Palmas e IFTO Paraíso assinam Termo de Cooperação Técnica para monitoramento do sistema de tratamento do Aterro**. Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos, 2018. Disponível em: <<http://www.palmas.to.gov.br/secretaria/infraestrutura/noticia/1508934/prefeitura-de-palmase-ifto-paraiso-assinam-termo-de-cooperacao-tecnica-para-monitoramento-do-sistema-detratamento-do-aterro/>>. Acesso em: 26 nov 2018.

SHIE, J., LIN, J., CHANG, C., LEE, D., WU, C. Pyrolysis of oil sludge with additives of sodium and potassium compounds. Resources, **Conservation and Recycling**, v. 39, p. 51-64, 2003.

SANCHEZ, M. E. et al. Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, 2009.

SCHUTZ, F.C. A.; ANAMI, M.H.; TRAVESSEINI, R. Desenvolvimento e ensaio de briquetes fabricados a partir de resíduos lignocelulósicos da agroindústria. **Inovação e Tecnologia**, v. 1 n.1, p, 1-8, 2010.

SILVA, Dafne Pereira da. **Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando o aproveitamento energético: o caso do campus de USP na capital**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo – SP, 2016.

SILVA, Fabrício Machado. **Análise Da Aplicação Da Biomassa Residual Proveniente Da Agroindústria Da Soja Para Produção De Materiais Renováveis Por Meio De Processo Pirolítico**. 2018. 115 f. Tese (Doutorado Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto - AP, 2018.

SNSA. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos, 2014**. Parte 2-Tabela de Informações e Indicadores. Brasília: MCIDADES., 2016.

SULAIMAN, F., ABDULLAH, N., Optimum conditions for maximizing pyrolysis liquids of oil palm empty fruit bunches. **Energy**, v. 36, pp. 2352-2359. 2011.

TEIXEIRA, S.R.; PENA, A.F.V.; MIGUEL, A.G. Briquetting of charcoal from sugarcane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. **Waste Management**, v.30, n.5, p.804–807, may. 2010.

TÔRRES FILHO, A. **Viabilidade Técnica e Ambiental da utilização de resíduos de madeira para produção de um combustível alternativo**. 2007, 61 f. Dissertação

(Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005

VIVACQUA FILHO A, GOMES P.A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: **Penedo WR**, editor. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC; 1982. p. 60-73.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. v. 1. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. DESA. UFMG, 452 p. 2005.

WANG, Y. et al. Site selection for municipal solid waste landfill considering environmental health risks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, p. 40 - 46, november 2018.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. Reuse of effluents: methods of wastewater treatment and health safeguards. **Technical report series**, Genebra: n. 517, 1973.

YANK, A.; NGADI, M.; KOK, R. Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. **Biomass and Bioenergy**, v.84, p.22-30, 2016.

ZHANG, S. What is the Highest and Best Use of Organic Solid Waste: Production of Compost or Production of Energy?. **Greenest City Scholar**, 2012. Disponível em: <<https://sustain.ubc.ca/sites/sustain.ubc.ca/files/Zero%20Waste%20%20%20Siduo%20Zhang%20-%20Compost%20vs%20%20Energy%20Production.pdf>>. Acesso em: 10 de fev. 2017