



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RANYERE DO NASCIMENTO LÔBO

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE PODAS DE ÁRVORES VISANDO A OBTENÇÃO
DE CARVÃO PARA UTILIZAÇÃO COMO LEITO FILTRANTE NO TRATAMENTO
DE ÁGUAS CINZAS**

Palmas, TO
2019



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RANYERE DO NASCIMENTO LÔBO

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE PODAS DE ÁRVORES VISANDO A OBTENÇÃO
DE CARVÃO PARA UTILIZAÇÃO COMO LEITO FILTRANTE NO TRATAMENTO
DE ÁGUAS CINZAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Coorientador: Prof^a Me. Adriana Soraya Alexandria Monteiro

Palmas, TO
2019

LÔBO R. N.

Estudo de caso: Degradação térmica de podas de árvores visando a obtenção de carvão para utilização como leito filtrante no tratamento de águas cinzas. / Ranyere do Nascimento Lôbo - Palmas, 2019. 50 f.

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

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Coorientador: Me. Adriana Soraya Alexandria Monteiro

1. Pirólise. 2. Aproveitamento. 3. Reuso. I. Estudo de caso: Degradação térmica de podas de árvores visando a obtenção de carvão para utilização como leito filtrante no tratamento de águas cinzas.

RANYERE DO NASCIMENTO LÔBO

DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE PODAS DE ÁRVORES VISANDO A OBTENÇÃO DE
CARVÃO PARA UTILIZAÇÃO COMO LEITO FILTRANTE NO TRATAMENTO DE
ÁGUAS CINZAS

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

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Orientador)
IFTO – Campus Palmas

Profa. Me. Adriana Soraya Alexandria Monteiro (Coorientadora)
IFTO – Campus Palmas

Profa. Dr. Claudia da Silva Aguiar Rezende
IFTO – Campus Palmas

RESUMO

Esse projeto de pesquisa teve como objetivo produzir material filtrante a partir do tratamento térmico de Resíduos Sólidos Urbanos. Nessa pesquisa foi realizada a pirólise da poda de árvores, com a finalidade de obtenção do carvão, como forma de utilização como meio filtrante no tratamento de águas cinzas. A biomassa foi introduzida ao reator na forma de pó. A conversão térmica foi efetuada em um reator de leito fixo de aço inox. Após a reação e o resfriamento da unidade de pirólise, todos os produtos do processo foram coletados e pesados, como também foi feito a caracterização do material filtrante (areia) através dos ensaios de granulométrica e massa específica. Assim, adiante, se prosseguiu na montagem de um sistema de filtração utilizando um filtro em escala piloto para a remoção de poluentes presentes em águas residuais, no entanto, buscando o tratamento de efluentes de águas cinzas bem como também a verificação do teste hidráulico de um protótipo de filtração múltiplas de garrafas *pet*, empregando o carvão proveniente da pirólise de poda de árvores e material à granel. Durante os testes de floculação o sulfato de alumínio foi o coagulante mais eficiente na remoção de turbidez de águas cinza. O polimento de águas cinzas utilizando o carvão obtido do processo termoquímico de pirólise da poda de árvores, se mostrou eficiente por remover sólidos voláteis, turbidez, e alcalinidade em percentuais acima de 90% e sólidos totais acima de 50%.

Palavras-chave: Pirólise, Carvão, Filtração e Águas Cinzas.

ABSTRACT

This research project aimed to produce filter material from the thermal treatment of Urban Solid Waste. In this research the pyrolysis of pruning of trees was carried out, with the purpose of obtaining the coal, as a form of use as filter medium in the treatment of gray water. The biomass was introduced to the reactor in powder form. The thermal conversion was carried out in a stainless steel fixed bed reactor. After the reaction and the cooling of the pyrolysis unit, all the products of the process were collected and weighed, as well as the characterization of the filter material (sand) through the granulometric and specific mass tests. Thus, we proceeded to set up a filtration system using a pilot-scale filter for the removal of pollutants present in waste water, however, seeking to treat ash-water effluents as well as checking the hydraulic test of a prototype of multiple filtering of pet bottles, employing the coal from the prune pyrolysis of trees and bulk material. During the flocculation tests aluminum sulphate was the most efficient coagulant in the removal of gray water turbidity. The ash polishing using the charcoal obtained from the pyrolysis process of tree pruning was efficient in removing volatile solids, turbidity, and alkalinity in percentages above 90% and total solids above 50%.

Keywords: Pyrolysis, Coal, Filtration and Gray Waters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cobertura Vegetal do Plano Diretor da cidade Palmas (Tocantins)	14
Figura 2: Geração de resíduos de árvores após a chuva.....	14
Figura 3: Definições de águas residuais domésticas	18
Figura 4: Possíveis contaminantes da água cinza por fonte de água cinzenta	19
Figura 5: Tecnologias de tratamento de águas cinzas	20
Figura 6: Impurezas contidas nos efluentes.....	21
Figura 7: Classificação e distribuição dos sólidos em função do tamanho.....	22
Figura 8: Sistema experimental para caracterização dos efluentes de águas cinzas	24
Figura 9: Representação esquemática das atividades desenvolvidas na produção do carvão	25
Figura 10: Sistema de Pirólise.....	25
Figura 11: Equipamento Jar Test	26
Figura 12: Representação esquemático da caracterização do sistema de tratamento	27
Figura 13: Amostra bruta (areia média e areia fina)	27
Figura 14: Protótipo do filtro	29
Figura 15: Sistema de filtragem.....	29
Figura 16: Representação esquemática da caracterização da água cinza	30
Figura 17: Turbidímetro	32
Figura 18: pHmetro	32
Figura 19: Procedimento para a evaporação da amostra (banho maria)	33
Figura 20: Calcinação (mufla)	33
Figura 21: Corrente elétrica (condutivímetro).....	34
Figura 22: Métodos potenciométrico e titulométrico - Alcalinidade.....	34
Figura 23: Carvão ativado de podas de árvores.....	35
Figura 24: Granulometria da areia fina	36
Figura 25: Granulometria da areia média.....	37
Figura 26: Comparativo de melhor eficiência dos coagulantes	39
Figura 27: Eficiência de redução dos parâmetros das águas cinzas tratada	41

LISTA DE ABREVIATÖES

ABNT– Associação Brasileira de Normas Técnicas

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde

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

NBR – Norma Brasileira Registrada

PERS - Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins

pH – Potencial Hidrogeniônico

PNAD – Pesquisa Nacional Por Amostra de Domicílios

RSU – Resíduo Sólidos Urbanos

SF – Sólidos Fixos

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Processo de pirólise, diferentes condições de processo e principais produtos finais	17
Tabela 2: Caracterização da água de abastecimento - zona rural (cisterna).....	31
Tabela 3: Resumo da metodologia das análises dos parâmetros físico-químicos....	31
Tabela 4: Características do leito de areia	35
Tabela 5: Composição granulométrica do leito de areia.....	36
Tabela 6: Caracterização de águas cinzas brutas e após coagulação/floculação	38
Tabela 7: Resultados obtidos durante o polimento de águas cinzas em sistema de filtração contendo carvão ativado produzido a partir da pirólise da poda de árvores	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Coleta e transporte de podas de árvores (toneladas/mês) em Palmas – TO	15
Gráfico 2: Quantitativo de RSU (domésticos e comercial) e podas de árvores.....	16

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 PROBLEMA	10
3 OBJETIVOS	11
3.1 Objetivo Geral	11
3.2 Objetivos Específicos.....	11
4 JUSTIFICATIVA	12
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
5.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	13
5.2 Resíduo orgânico urbano - podas de árvores (biomassa)	13
5.3 Tratamento térmico (pirólise)	16
5.4 Reuso de águas	17
5.4.1 Reuso de águas cinzas	18
5.5 Tratamento de águas cinzas	21
5.5.1 Filtração.....	21
5.5.2 Adsorção (carvão ativado).....	22
6 METODOLOGIA.....	24
6.1 Tratamento térmico RSU (poda de árvores) para produção de carvão ativado.....	24
6.1.1 Tipos de Resíduos e Preparação de Amostras	25
6.1.2 O reator pirolítico e o sistema experimental	25
6.2 Tratamento de águas cinzas	26
6.3 Sistema de filtragem	27
6.3.1 Meios filtrantes	27
6.3.2 Estrutura Física do Sistema.....	28
6.4 Caracterização das Águas Cinzas	30
6.4.1 Parâmetros analisados nas amostras das águas cinzas	31
7 RESULTADOS	35
7.1 Rendimento da Produção de Carvão Ativado a partir da pirólise de Poda de Árvores	35
7.2 Caracterização da Areia	35
7.3 Coagulação/ Floculação/ Sedimentação.....	37
7.4 Sistema de Tratamento	39
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos urbanos (RSU) consistem principalmente de resíduos domésticos, comerciais e limpeza de áreas públicas. Dentre os compostos, estão os resíduos vegetais provenientes de podas ou derrubadas de árvores dentro do perímetro urbanos de áreas particulares e públicas. Como tal, os resíduos contêm uma proporção elevada de materiais renováveis, que podem ser utilizadas para produção de produtos com valores agregados e recuperação de energia em estado sólido, líquido e gasoso. A geração de RSU no Tocantins tem uma estimativa de 230.108,5 toneladas anual, porém 37% dessa produção estão na capital Palmas, segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins (PERS, 2017).

Os resíduos provenientes da poda de arborização urbana e remoção de árvores públicas e de residências particulares em um município podem gerar sérios problemas urbanos quando não são devidamente aproveitados, sendo descartados em locais impróprios como aterros sanitários e lixões clandestinos. Além dos resíduos resultantes das podas em árvores públicas como: troncos, toras, galhos, tocos e raízes, os resíduos vegetais de centros urbanos incluem ainda o material orgânico resultante da manutenção de parques e jardins, incluindo grama e materiais lenhosos diversos (PEDROZA et al., 2011).

O RSU em Palmas é encaminhado habitualmente para aterros sanitários, cooperativas de catadores e unidades de compostagem. A coleta e o transporte de matéria orgânica como podas correspondeu em 2018 a um quantitativo de 6.453,10 toneladas anual (TOCANTINS, 2018).

A pirólise é um processo endotérmico que consiste em aquecer o RSU (normalmente entre 300°C e 600°C), na “quase-ausência” de ar, com a formação de vapores, que ao serem resfriados produzem um líquido que é normalmente indicado como bio-óleo, finos de carvão e gases pirolíticos não condensáveis, que podem ser usados para gerar calor e energia para o processo em si, ou para o mercado local, representando uma alternativa tecnológica para o aproveitamento desses resíduos (PEDROZA et al., 2011).

Tal estudo aponta que tratamento de esgoto deficiente e poluição oriunda da indústria e da agricultura são os maiores problemas que ameaçam a qualidade da água atualmente. Em sete estados brasileiros, apenas 11% dos rios e mananciais foram classificados como bons. Os corpos hídricos podem ser poluídos por fontes difusas e pontuais com alteração dos mananciais em quantidade e qualidade (MOTA,

2008). Sendo assim, é evidente a importância de manter os corpos hídricos em boas condições para não prejudicar a disponibilidade deste recurso no futuro. Com base nisso, surge o reuso de água de forma planejada, que se tornou um tema atual e de grande importância.

O reuso deve ser considerado como uma atividade extensiva compreendendo o controle de perdas, diminuindo a produção de efluentes e o consumo de água. Assim, o reuso de águas cinzas, tornou-se uma alternativa de ampliação da oferta de água podendo contribuir para a preservação dos recursos hídricos diante da escassez da água, tanto pela quantidade quanto pela qualidade (RODRIGUES, 2019). As águas cinzas são aquelas provenientes dos lavatórios, chuveiros e máquinas de lavar roupa, sendo necessária à sua desinfecção para garantir a segurança quanto à reutilização, em especial em aplicações com potencial exposição humana.

Nessa pesquisa foi apresentada a poda de árvore como alternativa para a produção de carvão ativado a partir do processo térmico de pirólise e sua utilização como adsorvente em tratamento físico-químico de águas cinzas provenientes de máquina de lavar roupas, visando o seu reuso para fins não potáveis em residências.

2 PROBLEMA

Um dos grandes problemas da atualidade é o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) decorrente, dentre outros fatores, do processo de expansão e urbanização das cidades. A geração de resíduos vem tomando proporções crescentes e tem sido reconhecida como um dos grandes problemas da humanidade. De fato, os padrões de consumo e de produção vêm a cada dia aumentando a gravidade de resíduos de toda a espécie (PEDROZA, 2010).

O lançamento de águas residuárias sem o devido tratamento, devido as atividades antropogênicas, se apresenta como um dos principais problemas ambientais no âmbito da engenharia sanitária atualmente (MELLO E OLIVO, 2016).

Outro ponto crítico do saneamento básico está na zona rural ou comunidades isoladas na qual possuem cerca de 31 milhões de habitantes residindo nessas áreas (PNAD, 2013). Desta população grande parte usa fossas rudimentares, que contaminam as águas subterrâneas e superficiais, e consequentemente, os poços de águas que fazem a captação para consumo (FUNASA, 2011).

A falta de saneamento básico em zonas rurais no Brasil é bastante evidente, pois não se tem os cuidados adequados para o tratamento e disposição dos efluentes que são lançados nos recursos hídricos contaminando o mesmo (CRUZ, 2013).

O processo de transformação térmica através do processo de pirólise agrega valor aos RSU, propondo um direcionamento adequado a esses resíduos, no qual possui potencial poluidor ao meio ambiente. Assim, os resíduos de biomassa encontradas no RSU têm alto teor de carbono que podem gerar o carvão ativado, possibilitando maior aproveitamento daquelas biomassas iniciais.

Nessa pesquisa foi investigada a pirólise de RSU (podas de árvores) da cidade de Palmas/TO em reator de leito fixo em regime batelada, direcionando a obtenção de um maior rendimento de carvão ativado, visando aplicação no sistema de tratamento para reuso de águas cinzas, objetivando um reuso sustentável em zona urbana e rural, evitando o despejo direto no sistema de coleta de esgoto ou no solo contaminando os recursos naturais.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Produzir carvão ativado visando a aplicação no saneamento básico, através da pirólise de podas de árvores do Plano Diretor de Palmas e de um sistema de filtragem para tratamento de água cinza.

3.2 Objetivos Específicos

- Efetuar a pirólise de podas de árvores;
- Analisar as características físico-químicas de água cinza bruta e tratada após o tratamento por coagulação/floculação/decantação;
- Discutir a remoção de poluentes presentes em águas cinzas em um sistema de tratamento com filtro de areia e adsorção empregando-se o carvão da pirólise.

4 JUSTIFICATIVA

A pirólise de podas de árvores tem sido estudada a fim de avaliar o emprego de RSU em processo térmico como forma de se obter produtos de valor agregado como carvão ativado.

O carvão ativado tem características ideais para adsorver moléculas em fase gasosa e líquida, o que faz desse material ter várias aplicações em sistemas industriais, sendo usual em tratamentos de águas e efluentes (SANTANA, 2013).

Propormos alternativas de uso racional de águas em qualquer que seja sua demanda, sendo uma opção a de reduzir os problemas de disponibilidade hídrica potável e a de diminuição o consumo, dentre as quais são o aproveitamento de águas pluviais, reuso de água cinza e a instalação de componentes econômicos de águas (ABNT NBR 15527,2007, apud CARVALHO et al. 2014).

Nessa pesquisa foi apresentada uma proposta alternativa de tratamento de água cinza de propriedade rural, com a utilização de carvão ativado proveniente de podas de árvores de RSU.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Segundo a Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), resíduo sólido urbano pode ser definido da seguinte forma:

(...) material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Inciso XVI – Art. 3º).

Os resíduos sólidos urbanos oriundos de cidades têm sido ponto de debate nas últimas décadas, pois disponibilização de resíduos de forma inadequados causam aumento na poluição e impactos socioambientais, conforme Hempe & Noguera (2012).

A Resolução CONAMA nº 404/08 considera que a disposição inadequada RSU traz ameaças à saúde pública e degradação ambiental, afetando a qualidade de vida das populações.

Portanto, os resíduos sólidos merecem uma atenção especial na sua utilização em benefício ao meio ambiente. Ribeiro et al. (2011) ressalta que a reciclagem de resíduos orgânicos é de grande importância ambiental, de forma que os reaproveitamentos dos resíduos descartados para fins econômicos é o ideal.

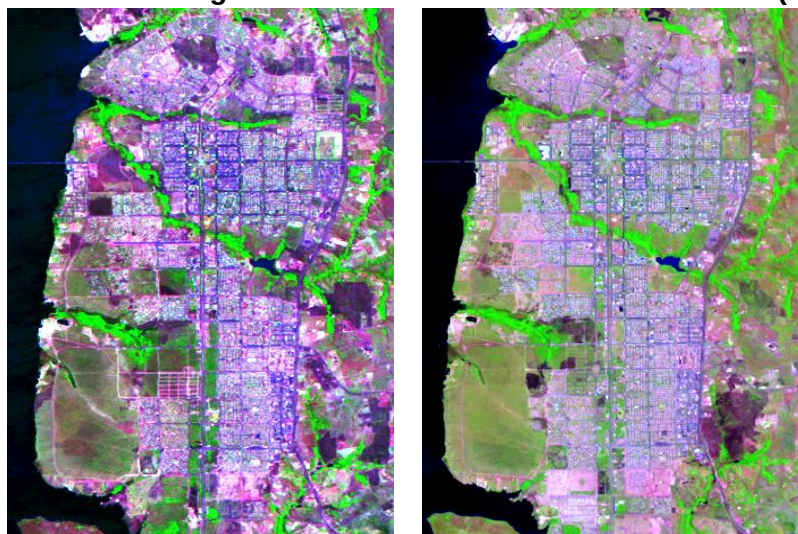
5.2 Resíduo orgânico urbano - podas de árvores (biomassa)

Os resíduos de podas urbanas, madeira propriamente dita, é composta de 50% de carbono, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio, independente da espécie ou idade. Segundo Martins (1980), apud Cortez (2011), a madeira é heterogênea quimicamente sendo constituída de polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, numa proporção de aproximadamente: 50:20:30.

A existência das árvores em meio urbano é uma questão muito importante para diminuição da temperatura em espaços públicos e particulares urbanos, sustentabilidade climática global. No entanto, a biomassa está sempre em processo de formação, na Figura 1 é ilustrado a cobertura vegetal da cidade de Palmas - TO em 2018 e em 2015, e isto em meio público poderá causar impactos, quando no processo de limpeza pública como nas podas de arborização urbana e também na

remoção de árvores em espaços públicos ou particulares quando não são devidamente aproveitados.

Figura 1: Cobertura Vegetal do Plano Diretor da cidade Palmas (Tocantins)



Landsat 8 (08/09/2008)

Landsat 8 (12/09/2015)

Fonte: Landsat 8, adaptado autor (2019).

Esses resíduos vegetais são resultados de podas ou remoções de árvores em locais públicos tais como, parques e jardins (incluindo grama e materiais lenhosos diversos), como também em áreas particulares (WIECHETECK, 2009). Outra forma da geração desses resíduos, são os provenientes de fortes rajadas de vento, em períodos chuvosos que ocasiona a derrubada de árvores novas e velhas na capital (Figura 2).

Figura 2: Geração de resíduos de árvores após a chuva

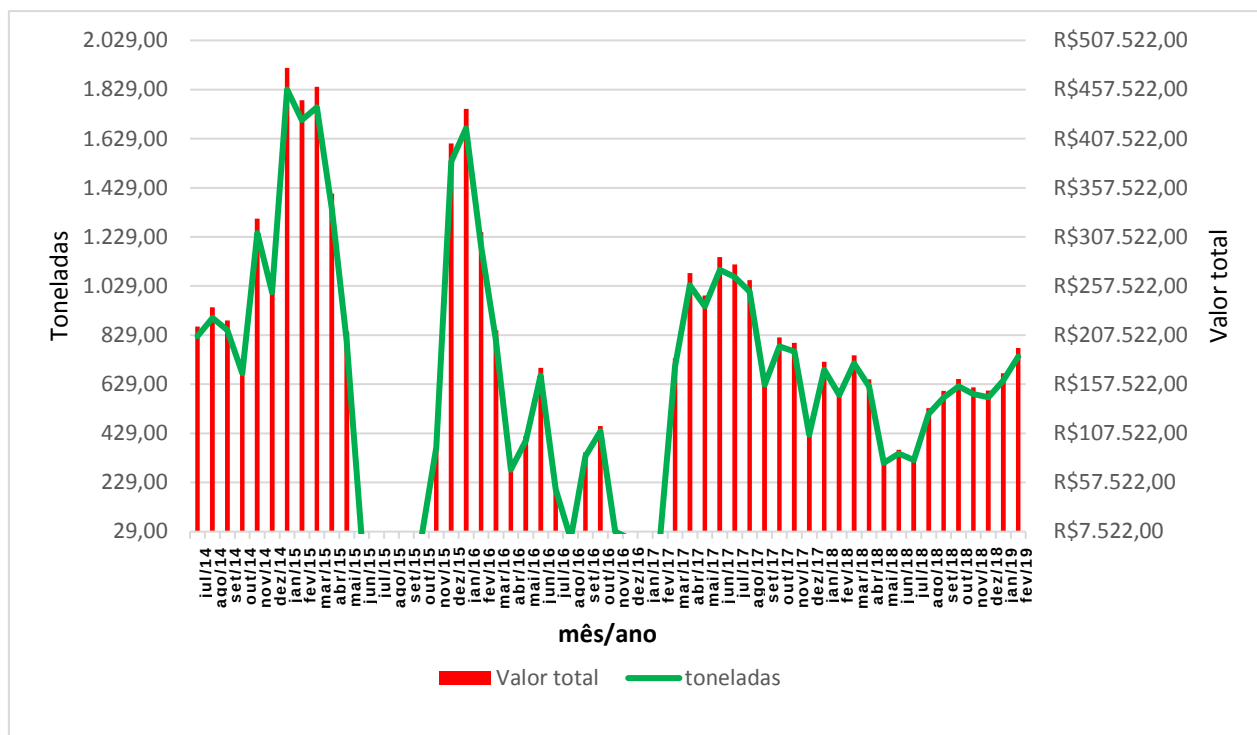


Fonte: Autor (2019).

A gestão da poda de arborização urbana é um dos diversos fatores que influencia na alta geração de resíduos de madeira e custos nas pequenas e grandes cidades do país. Assim, a destinação mais comum são aterros sanitários, no qual pequena parte é feita a segregação para compostagem (WIECHETECK, 2009).

O Gráfico 1 ilustra os dados fornecido pelo Tribunal de Contas do Estado do Tocantins referente ao último contrato formalizado com empresa terceirizada durante os anos de 2014 a 2019 para limpeza urbana do Plano Diretor de Palmas (Tocantins).

Gráfico 1: Coleta e transporte de podas de árvores (toneladas/mês) em Palmas – TO

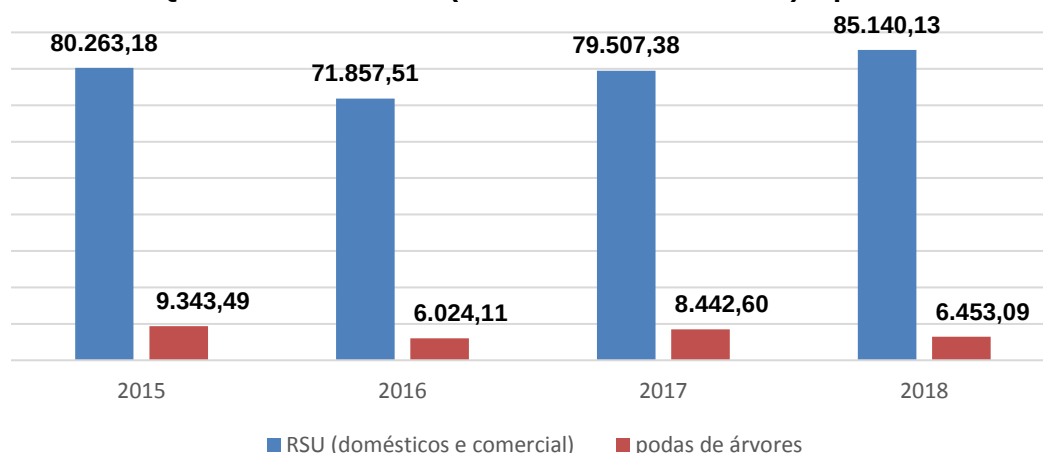


Fonte: TCE-TO, SICAP¹ – Licitações, contratos e obras (2019), adaptado autor (2019).

Conforme dados fornecidos pelo Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas (PMSB, 2014), o componente com maior percentual em relação ao total de geração de resíduos na composição gravimétrica do RSU para municípios com mais de 50.000 habitantes é a matéria orgânica, em que se atinge até cerca de 38%. Com isto o próprio PMSB estabelece estratégias para apoiar a correta disposição dos resíduos de podas e promover pesquisas a respeito do aproveitamento energético desses resíduos.

Os resíduos de podas de arborização urbana em Palmas (Tocantins) chegam a 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 no Gráfico 2.

¹ Disponível em: <https://app.tce.to.gov.br/lo_publico/busca/detalhes?id=23492>. Acessado em 22 abril 2019.

Gráfico 2: Quantitativo de RSU (domésticos e comercial) e podas de árvores

Fonte: TCE-TO, SICAP² – Licitações, contratos e obras (2019), adaptado autor (2019).

Os resíduos de podas de árvores podem ter a destinação para produção de carvão ativado para a utilização no tratamento de efluentes domésticos auxiliando no manejo para o reuso de água, principalmente em períodos secos no qual possui déficit hídrico no decorrer do ano que neste caso a pirólise seria umas das alternativas para esse aproveitamento.

5.3 Tratamento térmico (pirólise)

A conservação termoquímica da biomassa é uma linha de pesquisa promissora que conduz uma ação importante na produção de biocombustível. A biomassa sujeita a certa temperatura é convertida em líquidos, gás e carvão (YANG, 2007, apud SILVA, 2013).

Dentre alguns processos térmicos está a pirólise que ocorre no aquecimento da biomassa, na quase ausência de ar, promovendo a retirada dos compostos voláteis (oxigênio e hidrogênio), propondo a concentração de carbono, diminuição de volume, escurecimento da madeira, abertura e fechamento de poros, fissuras, diminuição da densidade, entre outras propriedades físico-químicas (ANEEL, 2005; BRITO, 1990, apud CORTEZ, 2011).

Os procedimentos operacionais do processo de pirólise estão ligados basicamente em função do tempo de residência, temperatura de aquecimento e temperatura de operação. Também assim as características da biomassa terão fatores determinantes na produção de sólidos, líquidos e gases, fatores como:

² Disponível em: <https://app.tce.to.gov.br/lo_publico/busca/detalhes?id=23492>. Acessado em 22 abril 2019.

dimensões das partículas, propriedades físico-química, pressão no reator, tipo de atmosfera e uso de catalizadores, que são parâmetros importantes. Estes influenciam nas características dos produtos finais e nos rendimentos (LUENGO et al., 2009, apud BALDASSIN JUNIOR, 2015).

Na Tabela 1 são expostos os diferentes processos de pirólise praticados, levando em consideração as condições operacionais e os principais produtos gerados.

Tabela 1: Processo de pirólise, diferentes condições de processo e principais produtos finais

Processo de Pirólise	Temperatura máxima (°C)	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Principais produtos obtidos
Carbonização	400	horas-dias	Muito pequena	Carvão
Vácuo	400	2 – 30 s	Intermediária	Bio-óleo
Hidropirólise	<500	<10 s	Alta	Bio-óleo e produtos químicos
Convencional	600	5 – 30 min	Pequena	Bio-óleo, carvão e gás
Flash	<650	<1 s	Alta	Bio-óleo e gás
Rápida	650	0,5 – 5 s	Intermediária	Bio-óleo
Metanopirólise	>700	<10 s	Alta	Produtos químicos
Ultra-rápida	1000	<0,5 s	Muito alta	Produtos químicos e gás combustível

Fonte: (BRIDGWATER e BRIDGE, 1991, apud BALDASSIN JUNIOR, 2015).

O processo utilizado foi o convencional com temperatura máxima de 550 °C, tempo de residência de 30 min e taxa de aquecimento pequena, pois dentre as possíveis configurações é o que produzir os três produtos em fase líquida, sólida e gasosa.

5.4 Reuso de águas

Westerhoff (1984), apud Mancuso e Santos (2003), classificam o reuso de águas em dois grandes grupos: potável e não potável. O reuso potável está dividido em reuso potável direto, quando o esgoto é tratado e volta para o sistema de água potável, e reuso potável indireto, quando o esgoto tratado é lançado em recursos hídricos superficiais ou subterrâneos para diluição e purificação natural. E a jusante se faz a captação para o tratamento utilizando como água potável. O reuso não potável é aplicado para fins agrícolas, industrial, recreativo, domésticos, manutenção de vazão, aquicultura e recarga de aquíferos subterrâneos.

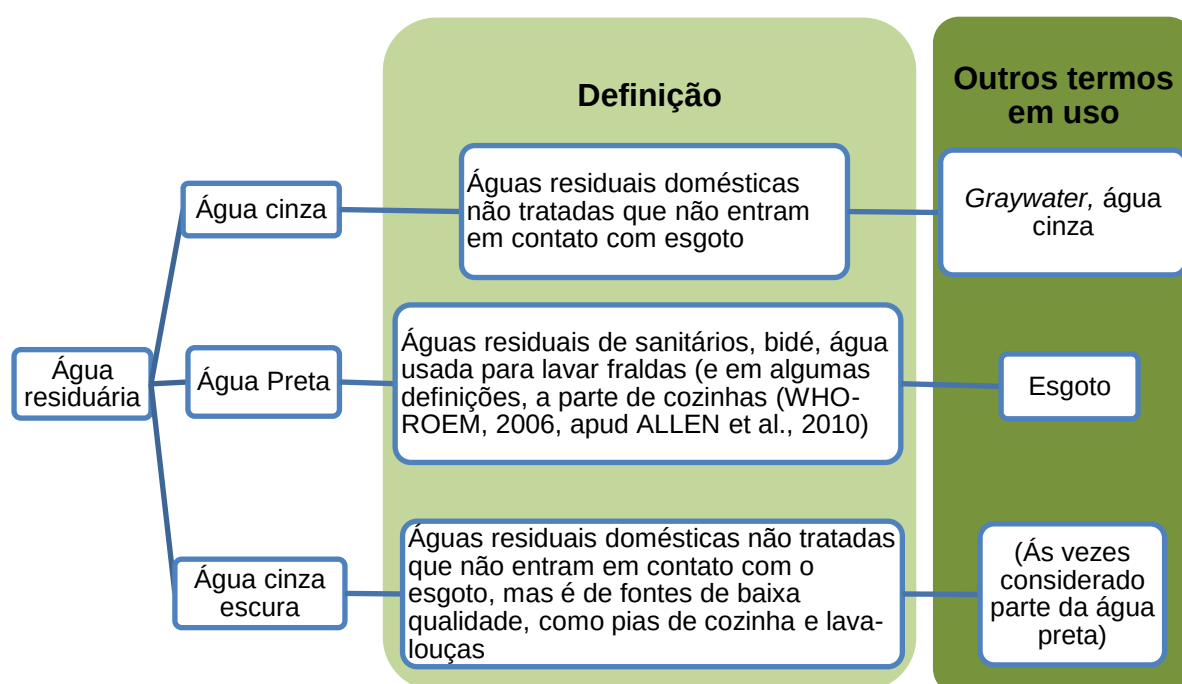
A Lei Federal nº 9.433/97 estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos propondo os incentivos aos estudos e as pesquisas de tecnologias orientadas para proteção e a racionalização do uso da água, incluindo os demais recursos ambientais.

5.4.1 Reuso de águas cinzas

A água cinza é proveniente do uso de chuveiros, banheiras, máquinas de lavar roupas, lavatórios e tanques (JEFFERSON et al., 1999, apud BAZZARELLA, 2005). Já alguns autores como Nolde (1999), apud Bazzarella (2005), não consideram efluentes provenientes de cozinha como água cinza por terem alto índice de poluição devido a compostos poluidores como óleo e gorduras.

Allen et al. (2010) reforçam que em outras partes do mundo água cinza são definidas diferentemente como ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Definições de águas residuais domésticas



Fonte: Allen et al. (2010) adaptado autor (2019).

Ao fazer o tratamento de águas à necessidade de água, o reuso de águas cinzas possibilita suprir o uso de água potável para aplicações não potáveis, como agricultura, paisagismo e vasos sanitários (ALLEN et al. 2010).

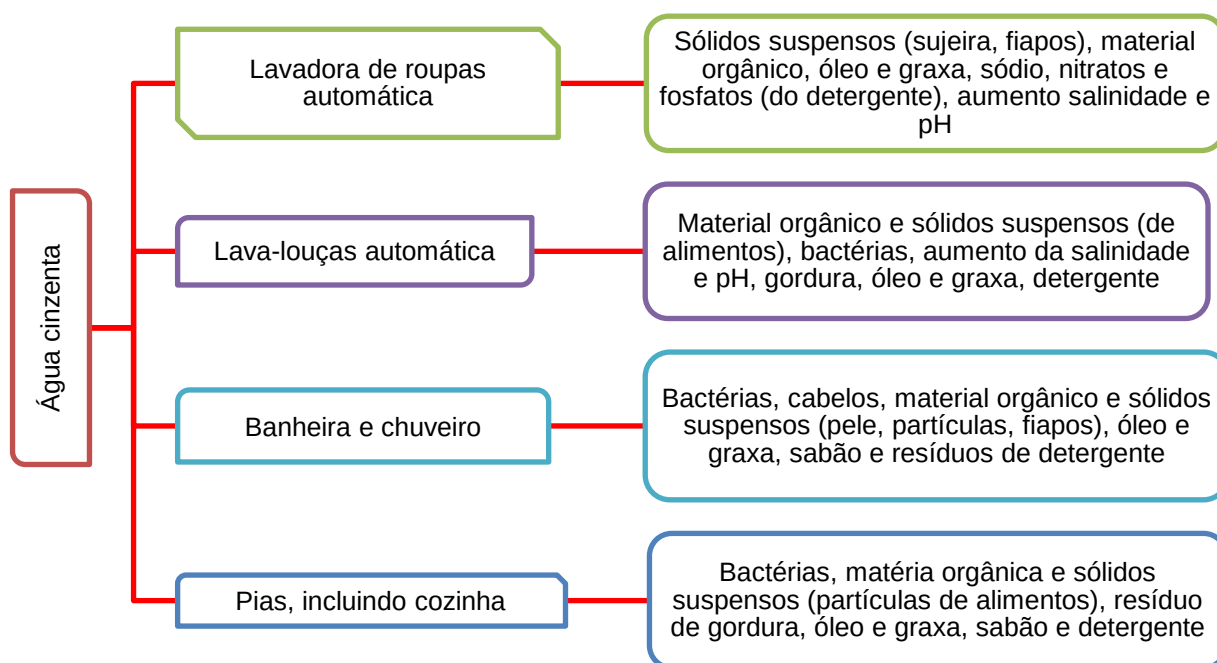
O reuso de água cinza para diversos consumos não potável é um dos meios de buscar uma redução no consumo de água. Pois esses efluentes possuem uma concentração menor de poluentes se comparado as águas negras, como também têm maior volume de esgotos domésticos, chegando de 50% a 80% do total de efluentes gerados (GLIBOA e FRIEDLER, 2008, apud COUTO, 2012).

A utilização de água cinza, sem tratamento, na irrigação em longo prazo, traz o acúmulo de sais, surfactantes, alcalinidade, afetando o desenvolvimento das plantas

e a contaminação de águas subterrâneas (CHRISTOVA-BOAL et al., 1996 apud RAMPELOTTO, 2014).

Allen et al. (2010) comenta que água cinzenta pode conter muitos dos mesmos contaminantes do esgoto bruto, porém em concentrações menores. Assim a Figura 4 destaca os possíveis contaminantes contido nesses efluentes.

Figura 4: Possíveis contaminantes da água cinza por fonte de água cinzenta



Fonte: Who-roem, 2006, apud Allen et al. (2010), adaptado autor (2019).

A idéia do reuso de águas cinzas está relacionado com a separação dos efluentes de águas negras, pois poderá ser feito usando o conceito de saneamento descentralizado e reuso discutido por Leal et al. (2010), apud Couto (2012). Esse tipo de tratamento visa separar cada efluente (COUTO, 2012).

Um grupo de autores menciona que sistemas de águas cinza envolvem fazer a separação dos efluentes, tratar e armazenar cada um deles; pois o armazenamento sem o tratamento e o número adequado de patogênicos pode se multiplicar com água parada, ou seja, o correto é reduzir as bactérias e outros microrganismos (Allen et al., 2010).

Os procedimentos de tratamento de águas cinzas estão inclusos nas partes físicas, químicas e biológicas, sendo muitos deles usados apenas com a separação de sólidos e seguido de desinfecção (LI et al., 2009, apud COUTO, 2012).

O tratamento físico e químico de águas cinzas constitui-se basicamente de filtração e desinfecção (ALLEN et al., 2010), conforme ilustrado na Figura 5 e o mesmo fornece o tipo de tecnologia e suas vantagens e desvantagens.

Figura 5: Tecnologias de tratamento de águas cinzas

Tipo de técnica Filtro de areia	Descrição Camas de areia ou em alguns casos com materiais com granulometrias maiores que prendem e absorvem contaminantes fluida nas águas cinzas.	Vantagens Operação simples, baixa manutenção, baixos custos de operação. Desvantagens Alto custo de capital, reduz patógenos, mas não os elimina, sujeitos a entupimento e inundação se sobrecarregado.
Tipo de técnica Filtro de carbono ativado	Descrição O carvão ativado foi tratado com oxigênio para abrir milhões de minúsculos poros entre os átomos de carbono. Isso resulta em alta porosidade de superfícies com áreas de 2.000 metros quadrados por grama. Estes filtros são assim amplamente utilizados para adsorver substâncias gasosas ou líquidas.	Vantagens Operação simples, carvão ativado é particularmente bom em armadilhagem orgânica, bem como compostos inorgânicos como o cloro. Desvantagens Alto custo de capital, muitos outros produtos químicos não são atraídos pelo carbono em tudo - sódio, nitratos, etc. Isso significa que um filtro de carvão ativado só irá remover certas impurezas. Isso também significa que, uma vez que todos os locais de ligação estão cheios, um carvão ativado o filtro para de funcionar.
Tipo de técnica Desinfecção	Descrição Altamente eficaz em matar bactérias se adequadamente projetado e operado, requerendo baixa habilidade do operador.	Vantagens Operação simples, baixa manutenção, baixa custos de operação. Desvantagens Cloro e ozônio podem criar subprodutos tóxicos, ozônio e ultravioleta pode ser adversamente afetado por variações no conteúdo orgânico de água cinza.

Fonte: NovaTec Consultants Inc. 2004, apud Allen et al. (2010), adaptado autor (2019).

O aproveitamento de águas cinzas tem uma grande importância no ponto de vista energético, pois diminui o volume de efluentes a ser tratados nas estações de tratamento de esgotos. Para isso os sistemas de tratamento no próprio local de consumo possibilita um aproveitamento tanto em áreas urbanas quanto em áreas rurais (SANTANA, 2013).

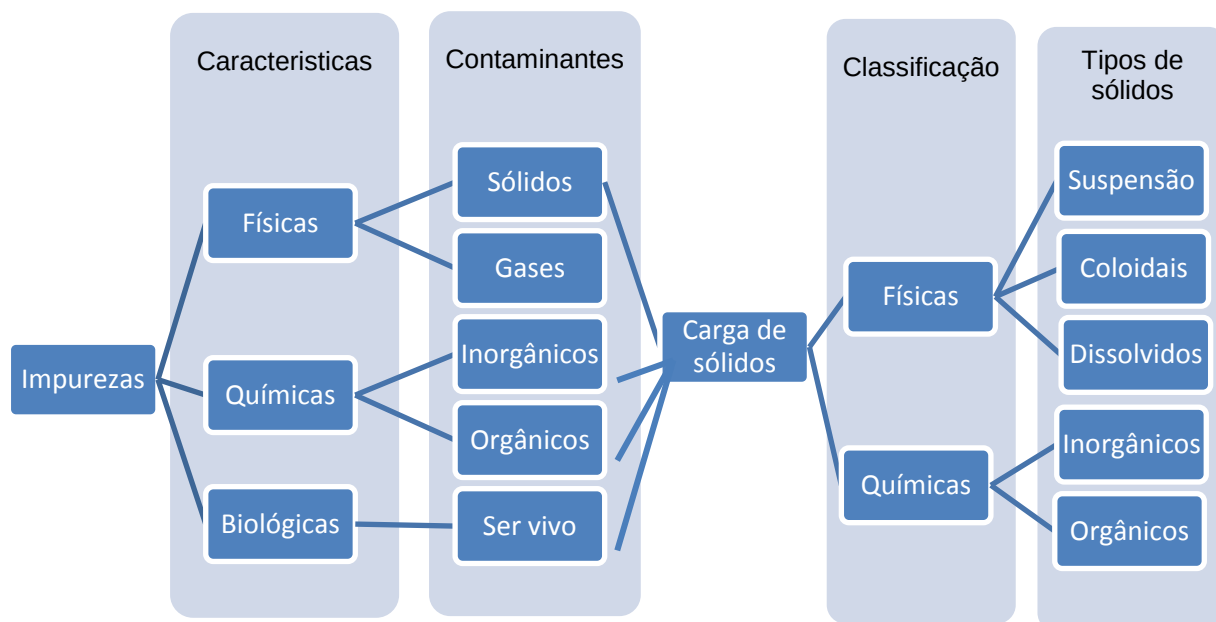
5.5 Tratamento de águas cinzas

5.5.1 Filtração

A operação de filtração está associada à tecnologia de sistemas fluidodinâmicos e partículas e se refere na separação entre fases fluidas e sólidas, dissolvidas em determinado fluido, utilizando um meio poroso, para o qual possibilita à retenção de partículas e permeável a fase líquida. Logo, é uma técnica bem difundida em diversos processos industriais como também no tratamento de efluentes industriais e domésticos (CREMASCO, 2012, apud CARVALHO, 2016).

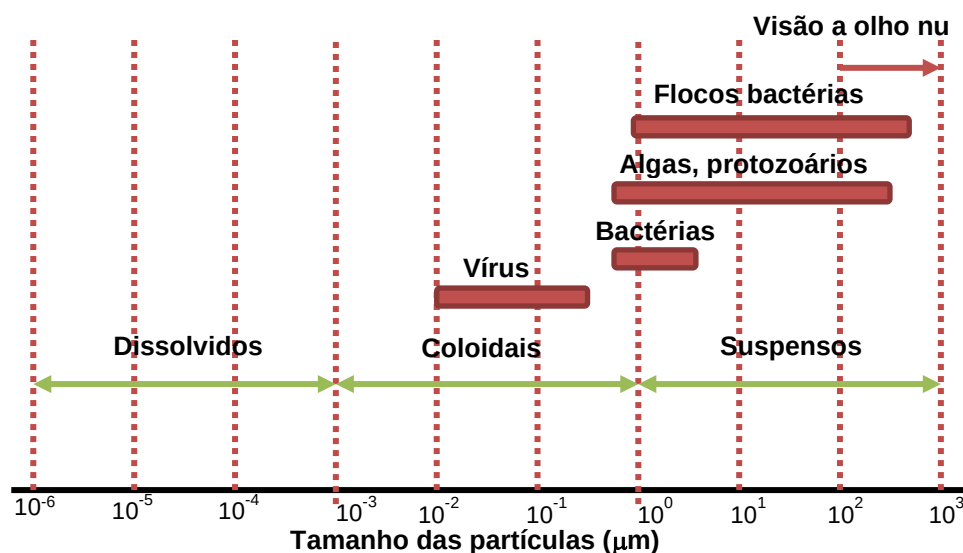
As impurezas encontradas nos efluentes são de características físicas, químicas e biológicas (Figura 6); o grau de impurezas está associado na quantidade expressas por esses parâmetros, no qual se introduz em dois tópicos: sólidos e organismos presentes na água. Dentre os contaminantes, com exceção dos gases, todos contribuem para formar a carga dos sólidos, podendo ter uma classificação física e química; as impurezas físicas estão distribuídas em sólidos em suspensão, coloidais e dissolvidos. Já categorias químicas estão associadas em orgânicos e inorgânicos, ou seja, as frações orgânicas são voláteis e as inorgânicas são os não voláteis (VON SPERLING, 1996).

Figura 6: Impurezas contidas nos efluentes



Fonte: Autor (2019).

Os sólidos podem ser classificados pelo tamanho. A rigor, são considerados sólidos filtráveis e não filtráveis (dissolvidos e suspensos), no entanto tem uma faixa intermediária que são os sólidos coloidais conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Classificação e distribuição dos sólidos em função do tamanho

Fonte: Von Sperling (1996), adaptado autor (2019).

Como os filtros tem uma função de remoção de partículas em suspensão, torna-se eficaz para o reuso sustentável de águas cinzas, no qual poderá ser utilizado para outras demandas, diminuindo o uso excessivo de recursos hídricos (MANCUSO & SANTOS, 2003).

5.5.2 Adsorção (carvão ativado)

Materiais carbonáceos são caracterizados por sua área superficial e porosidade que possibilitam a capacidade de adsorção de moléculas tanto em fase líquida como em gasosa. Assim, possui vastas aplicações na indústria, e são muito utilizados para produção de filtros no tratamento de águas (BORGES et al., 2003).

Os materiais com alto teor de carbono como ossos, madeira, casca de coco, sementes de frutos, carvão mineral e de polímeros sintéticos, possuem certo grau de porosidade e uma área superficial que varia de 10 a 15 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$. No entanto, esses podem ser ativados, fazendo com que os átomos de carbonos oxidem, aumentando sua área superficial em torno de 800 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$, chegando a 1500 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$, após o processo de ativação (CLAUDINO, 2003 apud SANTANA, 2013).

O carvão ativado é produzido através de duas etapas: tratamento térmico (pirólise), que consiste na remoção de componentes voláteis e gases leves, produzindo um volume de carbono, e depois passará pela segunda etapa que é a ativação, que consiste em uma reação secundária, buscando aumentar a área superficial (BORGES et al., 2003; CLAUDINO, 2003 apud SANTANA, 2013).

A remoção de partículas em suspensão pode ocorrer simultaneamente com a adsorção. No entanto, com a presença significativa de material em suspensão, poderá

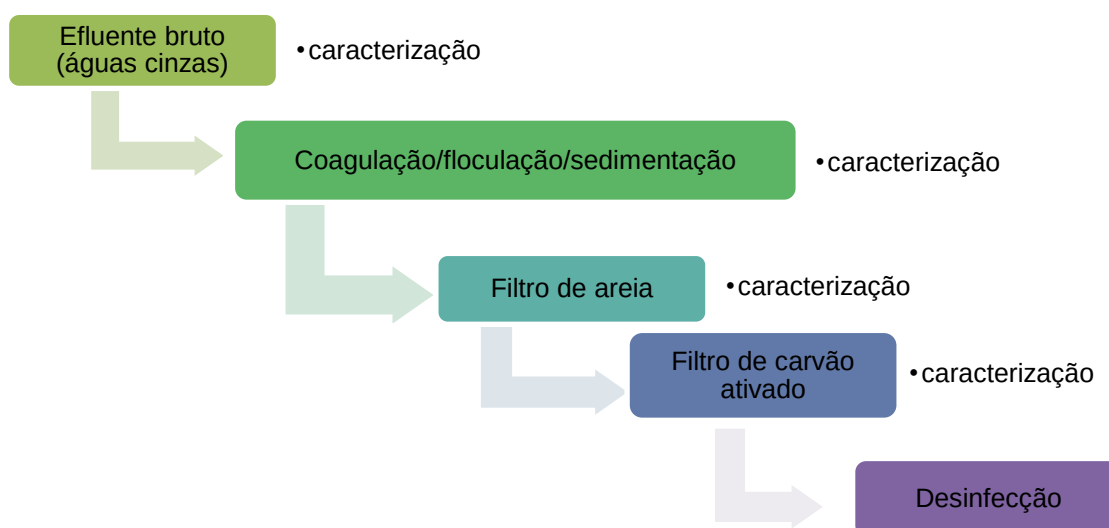
acarretar na obstrução dos poros, ocorrendo a saturação prematura do carvão ativado (SANTANA, 2013). Para isso, se faz necessário o tratamento de águas residuárias; neste caso águas cinzas com uso do carvão ativado um tratamento anterior ao fluxo no carvão ativado (RAPOPORT, 2004 apud SANTANA, 2013).

6 METODOLOGIA

O estudo foi estruturado buscando-se transformar RSU (podas de árvores) em um produto com valor agregado na utilização como meio filtrante (carvão ativado) na elaboração de um protótipo com garrafas *pet*, para formar um sistema de filtragem de águas cinzas de uma propriedade rural localizada em Palmas-Tocantins. O sistema proposto busca o polimento de águas de enxágue da máquina de lavar roupas, com o monitoramento da qualidade do efluente tratado.

O monitoramento das características do efluente foi feito após cada etapa dos métodos de tratamentos, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Sistema experimental para caracterização dos efluentes de águas cinzas



Fonte: Autor (2019).

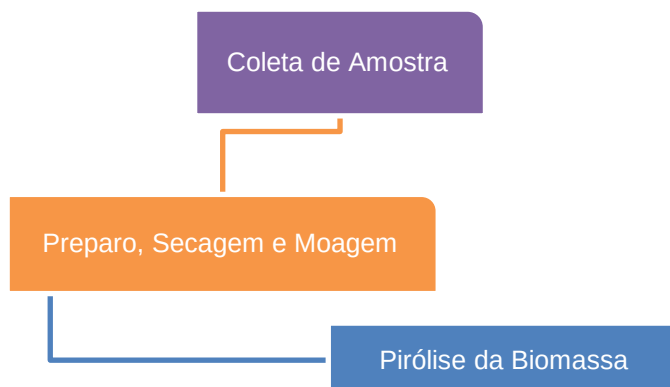
Para critérios de enriquecimento do estudo foi feito a caracterização do leito filtrante (areia) quanto a massa específica e composição granulométrica, servindo como base analítica com os dados do efluente após filtrado na areia.

A desinfecção foi feita por cloração do efluente tratado possibilitando segundo Fiori, Fernandes e Pizzo (2006) maior segurança quanto à reutilização, em especial em aplicações com exposição humana.

6.1 Tratamento térmico RSU (poda de árvores) para produção de carvão ativado

A Figura 9 apresenta um diagrama esquemático das atividades para produção do carvão ativado como coleta de amostra, preparação da matéria prima para o processo de produção e fabricação do briquete com os detritos das podas de árvores e o tratamento pirolítico com ativação.

Figura 9: Representação esquemática das atividades desenvolvidas na produção do carvão



Fonte: Autor (2019).

6.1.1 Tipos de Resíduos e Preparação de Amostras

As amostras dos resíduos foram coletadas nas dependências do Instituto Federal do Tocantins (IFTO) e transportadas em sacos plásticos identificados para as dependências do LARSEN-Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética, localizado no IFTO-Campus Palmas.

A secagem dos resíduos foi feita a 60 °C. Toda a amostra foi triturada em moinho de facas e peneiradas em peneira com abertura de 1,18 mm (ABNT 16, Tyler 14) para garantir a homogeneidade.

6.1.2 O reator pirolítico e o sistema experimental

O tratamento térmico da poda de árvores foi feito no laboratório da LARSEN, utilizando sistema de pirólise conforme (Figura 10).

Figura 10: Sistema de Pirólise.



Fonte: Fonte (2018).

A biomassa foi introduzida no reator na forma de briquete. A conversão térmica foi efetuada em um reator de leito fixo de aço inox, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. O reator foi aquecido por forno bipartido reclinável em uma

temperatura (550 °C). O tempo de residência da biomassa no reator foi de 30 min (sugerido por Vieira, 2009). O reator 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, todo o produto do processo (sólidos) foi coletado e pesado. 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.

6.2 Tratamento de águas cinzas

O tratamento adotado nessa pesquisa foi dividido em duas etapas: (a) Processo de Coagulação/Floculação/Decantação e (b) Filtração do efluente do sistema de coagulação em filtro de areia e carvão ativado produzido a partir de poda de árvores.

Os coagulantes que foram utilizados nos ensaios para determinação do produto químico que foi utilizado na pesquisa foram o sulfato de alumínio (1%) e o polímero catiônico 43,50 5H (0,5%), na seguinte proporções de 100, 200, 400 e 600 mg/L, com valores estabelecidos na literatura (SOUZA, 2012), como também foi feito os mesmos procedimentos com a correção do pH das amostras. Os ensaios de coagulação/floculação/sedimentação do efluente determinam o coagulante e a dosagem que foi utilizada no sistema de tratamento das águas cinzas. Foi realizado utilizando o “Jar Test” (Figura 11), os procedimentos de mistura rápida (velocidade igual a 165 rpm por 5 minutos) e mistura lenta (velocidade de 32 rpm e tempo de mistura de 30 minutos) e aproximadamente 1 hora de tempo de decantação.

Figura 11: Equipamento Jar Test



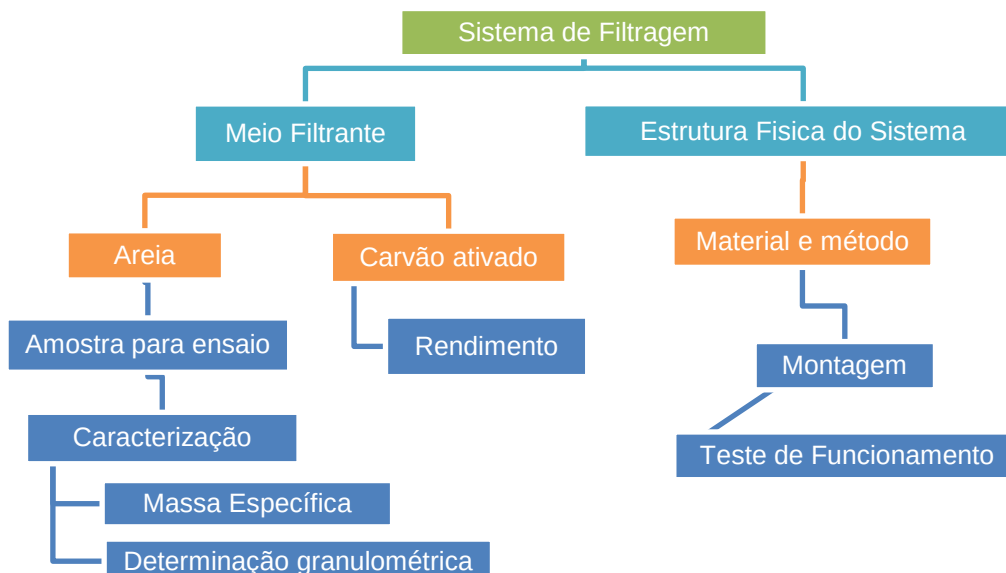
Fonte: Autor (2019).

O tratamento de águas cinzas foi feito através dos processos de coagulação/floculação/ sedimentação seguido da filtração com filtros de areia e carvão ativado proveniente da pirólise de podas de árvores.

6.3 Sistema de filtragem

O sistema foi constituído em etapas para caracterização dos materiais filtrantes e a confecção da estrutura física do filtro, demonstrado na Figura 12 pelo diagrama esquemático das atividades.

Figura 12: Representação esquemático da caracterização do sistema de tratamento



Fonte: Autor (2019).

6.3.1 Meios filtrantes

Entre os leitos filtrantes está o carvão ativado proveniente da pirólise de podas de árvores citado anteriormente no qual foi caracterizado apenas o rendimento desse material após o processo térmico.

O outro material filtrante é a areia lavada que foi coletada no IFTO/Campus Palmas, com um lote representado por transporte de caminhão caçamba (Figura 13). Assim, foi retirado 30 kg de amostra bruta e acondicionado em sacos lacrados, procedimentos adotados de acordo com a NBR 11799 (1990).

Figura 13: Amostra bruta (areia média e areia fina)



Fonte: Autor (2019).

Para os procedimentos de caracterização do meio filtrante (areia) foram feitas a coleta, a mistura e o quarteado para, portanto, retirar a amostra de ensaio de 1 kg, no qual passaram por ensaios de caracterização.

A caracterização do material foi feita em laboratórios do curso de construção civil do IFTO/Campus Palmas nos quais passou por procedimentos e padrões da NBR 11799 (1990). O agregado miúdo teve seus resultados comparados com os valores recomendados pela norma para os leitos filtrantes.

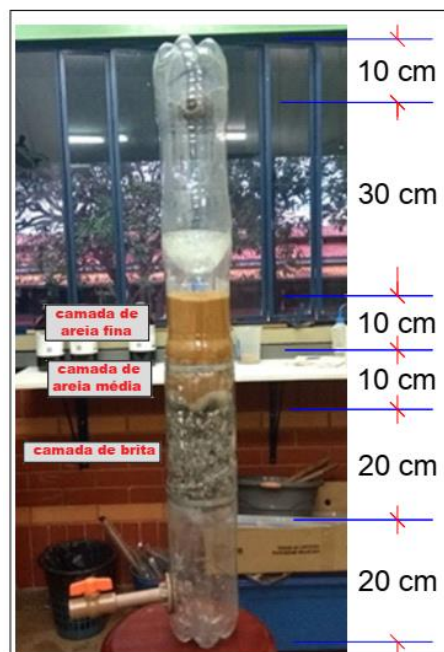
Os parâmetros de massa específica e determinação granulométrica são os dados necessários para definir, se o material é apropriado na utilização como meio filtrante (areia), com isto, a ABNT (1990) estabelece limites de resultados para aceitação.

A areia após sua caracterização deverá passar por um processo de preparação do meio filtrante, nos quais são: a mistura manual, o quarteamento e posteriormente lavagem, com a finalidade de remover materiais pulverulentos.

6.3.2 Estrutura Física do Sistema

O tratamento de águas cinzas foi realizado por um filtro de areia (Figura 14), com diâmetro de 10 cm e camadas de 10 cm de areia fina, 10 cm de areia média e 20 cm de camada suporte com brita seguido de um filtro produzido com o briquete de carvão ativado de podas de árvores, de 30 mm e 20 cm de altura, todos sendo operado com fluxo descendente conforme método utilizado por Pedroza et al. (2017).

O filtro de areia foi operado com uma taxa de aplicação superficial de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$ de acordo com Melo (2014). O efluente foi bombeado para um reservatório superior. Após esse procedimento o mesmo foi transportado por gravidade para o filtro de areia. O efluente do filtro de areia foi enviado na sequência para o filtro de carvão ativado de podas de árvores, com uma taxa de aplicação de $56,16 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$ conforme Vargas et al. (2014).

Figura 14: Protótipo do filtro

Fonte: Autor (2019).

O controle da vazão, na entrada e saída dos filtros, foi feito de forma manual, monitoramento visual para carga hidráulica (entrada), variando de 10 a 20 cm de coluna de água; e na saída, ajustando a vazão através de válvula na saída do filtro. O tempo de início de coleta de água cinza filtrada, foi de 20 minutos após o início da filtração, garantindo assim, a substituição do volume de água existente nos filtros, no início da filtração (Figura 15).

Figura 15: Sistema de filtragem

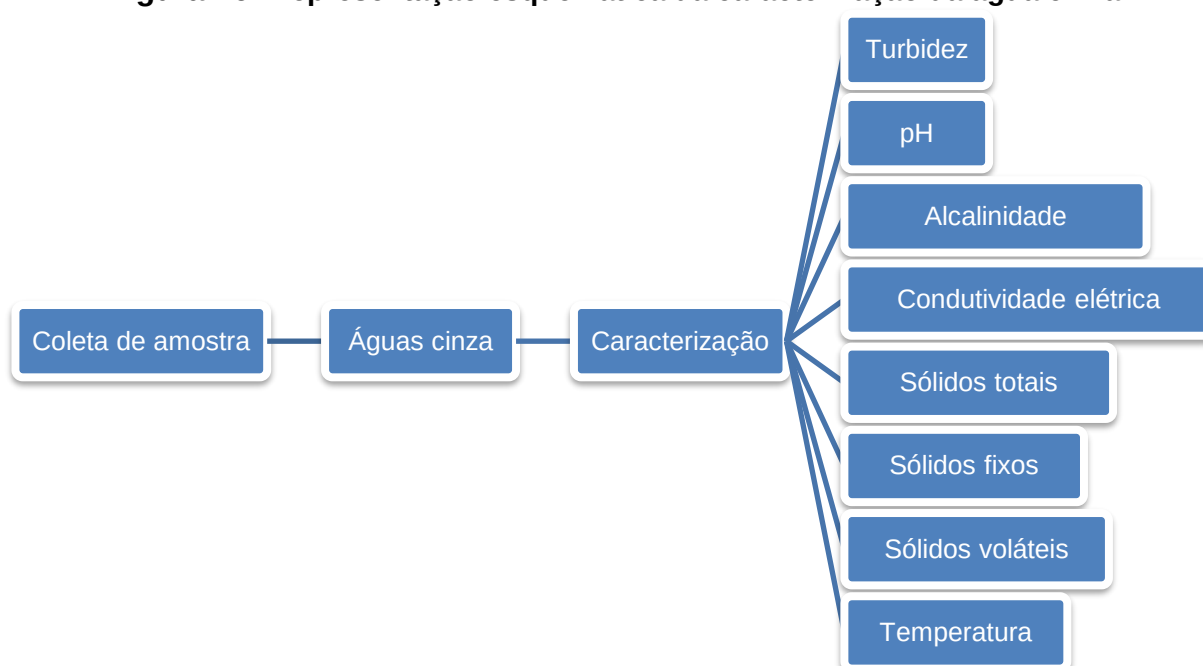
Fonte: Autor (2019).

6.4 Caracterização das Águas Cinzas

O ponto de coleta da amostra do efluente foi em uma propriedade rural localizada em Palmas-Tocantins. O plano e tipo de amostragem obedeceram ao Guia Nacional de Coleta (ANA, 2011) para efluentes líquidos. Portanto, o programa experimental fez coleta manualmente de amostragem simples³, com isto a amostra foi feita nos pontos de despejo de águas cinzas.

A Figura 16 apresenta o diagrama esquemático das atividades para caracterização das amostras de águas cinzas (enxágue da máquina e lavagem de roupas).

Figura 16: Representação esquemática da caracterização da água cinza



Fonte: Autor (2019).

Como o estudo está relacionado com o saneamento básico de uma propriedade rural, a fonte de captação de água para abastecimento é no caso de um poço de 8 m de profundidade, que possui níveis de água variáveis ao decorrer do ano, podendo o mesmo secar no período de estiagem. De acordo com Eriksson et al. (2002) apud Bazzarella (2005) isso define que as características do efluente dependem da qualidade da água de abastecimento.

³ “A amostra simples é indicada para os casos onde a vazão e a composição do líquido não apresentam variações (qualitativas e quantitativas) significativas e todas as informações que se deseja podem ser obtidas por meio de uma única amostra” (ANA, 2011).

A água utilizada para os serviços domésticos da propriedade rural da pesquisa não faz nenhum tipo de tratamento antes do uso, contendo as seguintes características conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização da água de abastecimento - zona rural (cisterna)

Parâmetro	Resultados
Turbidez (uT)	5,38
Temperatura (°C)	25,0
pH	4,5
Sólidos totais (mg/L)	101,0
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	1,0
C. E. (μS.cm ⁻¹)	107,8

Fonte: Autor (2019).

6.4.1 Parâmetros analisados nas amostras das águas cinzas

Com o objetivo de propor um sistema de tratamento desse tipo de efluente foi necessário a caracterização do mesmo, para verificar a eficiência do sistema. Assim, segundo a ABNT (1997), são definidos as classificações e respectivos valores de parâmetros para o esgoto tratado, conforme o reuso que foi destinado.

Os métodos para determinação dos parâmetros que foram analisados na caracterização do efluente foi conforme descrito Tabela 3.

Tabela 3: Resumo da metodologia das análises dos parâmetros físico-químicos

Parâmetro	Métodos
Turbidez (uT)	Nefelométrico
Temperatura (°C)	Eletrométrico
pH	Eletrométrico
Sólidos totais (mg/L)	Gravimétrico
Sólidos fixos (mg/L)	Gravimétrico
Sólidos Voláteis* (mg/L)	Gravimétrico
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	Potenciométrico e Titulométrico
C. E. (μS.cm ⁻¹)	Condutivímetro

*Os sólidos voláteis estão relacionados com a DBO, nos quais as matérias orgânicas influenciam nas suas concentrações.

Fonte: Autor (2019).

Os ensaios de caracterização foram executados no laboratório do IFTO-Campus Palmas, no entanto, foram realizados ensaios de caracterização preliminar do efluente e da água de abastecimento.

A determinação da turbidez, pH e temperatura foram obtidos através de equipamentos eletrônicos, conforme ilustrados nas Figuras 17 e 18.

Figura 17: Turbidímetro

Fonte: Autor (2019).

Figura 18: pHmetro

Fonte: Autor (2019).

Para determinação de resíduos (sólidos) nas amostras, foram arranjados os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 10664/1989, que descrevem o método gravimétrico. No entanto, foram feitos para sólidos totais, que consistem na evaporação parcial da amostra no banho maria (Figura 19). Posteriormente foi realizado a secagem na estufa com temperatura em torno de 100°C. Após estes procedimentos para obtenção dos resíduos totais foi feita a calcinação a 550°C por 1 hora dessa porção para determinação dos sólidos fixos e voláteis (Figura 20).

Figura 19: Procedimento para a evaporação da amostra (banho maria)



Fonte: Autor (2019).

Figura 20: Calcinação (mufla)



Fonte: Autor (2019).

Outro equipamento que foi utilizado é o condutímetro para medir a quantidade de sais presentes na amostra e que tem relação com a corrente elétrica do material, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21: Corrente elétrica (condutivímetro).



Fonte: Autor (2019).

A determinação da alcalinidade foi obtida através do método estabelecido pela ABNT NBR 13736/1996 – potenciômetro e titulométrico, que é medido pela capacidade que as águas têm de neutralizar ácidos, conforme Figura 22.

Figura 22: Métodos potenciométrico e titulométrico - Alcalinidade.



Fonte: Autor (2019).

7 RESULTADOS

7.1 Rendimento da Produção de Carvão Ativado a partir da pirólise de Poda de Árvores

A Figura 23 mostra o carvão ativado produzido a partir da pirólise de poda de árvores. O rendimento de carvão obtido a 550 °C foi de 54%. Mateus et al. (2018) enfatiza que o rendimento médio de carvão ativado é de 52% a essa mesma temperatura, e isso indica que empregando uma tonelada de poda de árvores tem-se a produção de 540 kg de carvão ativado no processo aqui adotado.

Figura 23: Carvão ativado de podas de árvores



Fonte: Autor (2019).

7.2 Caracterização da Areia

Estes materiais foram escolhidos por serem comumente utilizados e facilmente adquiridos na região onde foi realizada a pesquisa. O meio filtrante empregado foi a areia natural, proveniente do Rio Tocantins. A Tabela 3 apresenta as características do material empregado nessa pesquisa. As Figuras 24 e 25 apresentam as curvas granulométricas do material.

Tabela 4: Características do leito de areia

Caracterizações Determinadas	Resultados Obtidos	
	Areia fina	Areia média
Módulo de Finura	1,88	2,41
Dimensão Máx. Característica	2,36 mm	4,75 mm
Massa Específica	2,63 g/cm ³	2,86 g/cm ³
D ₁₀	0,25 mm	0,26 mm
D ₃₀	0,35 mm	0,40 mm
D ₆₀	0,45 mm	0,55 mm
Coeficiente de uniformidade	1,80	2,11
Coeficiente de curvatura	1,08	1,12

Fonte: Autor (2019).

De acordo com os dados da caracterização dos meios filtrantes ilustrados na Tabela 4, o módulo de finura obtido para areia fina foi de 1,88 e para areia média de 2,41 sendo então resultados baixos que procedem em um material mais fino. A dimensão máxima característica foi de 2,36 mm para areia fina e 4,75 para areia média, massa específica que equivale a 2,36 g/cm³ areia fina e 2,86 g/cm³ areia média.

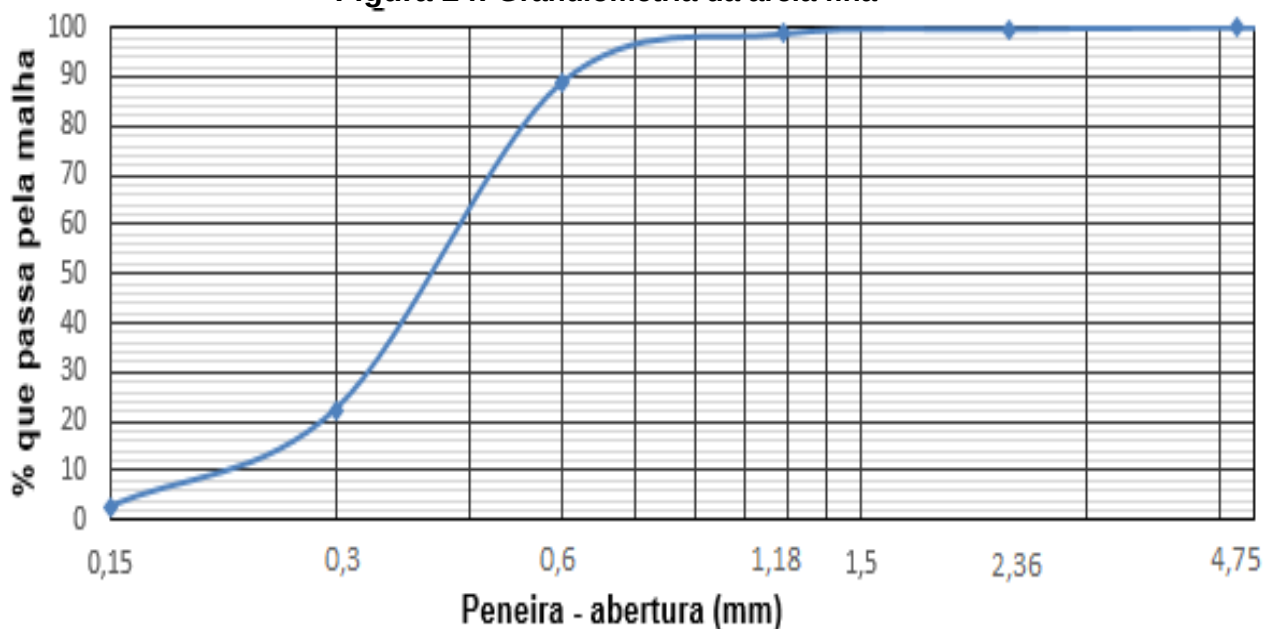
Tabela 5: Composição granulométrica do leito de areia

Peneiras	Porcentagem retida acumulada	
	Areia fina (MF = 1,88)	Areia média (MF = 2,41)
4,75		1,83%
2,36	0,31%	8,78%
1,18	1,29%	16,99%
0,6	11,08%	32,37%
0,3	77,62%	82,88%
0,15	97,47%	98,25%

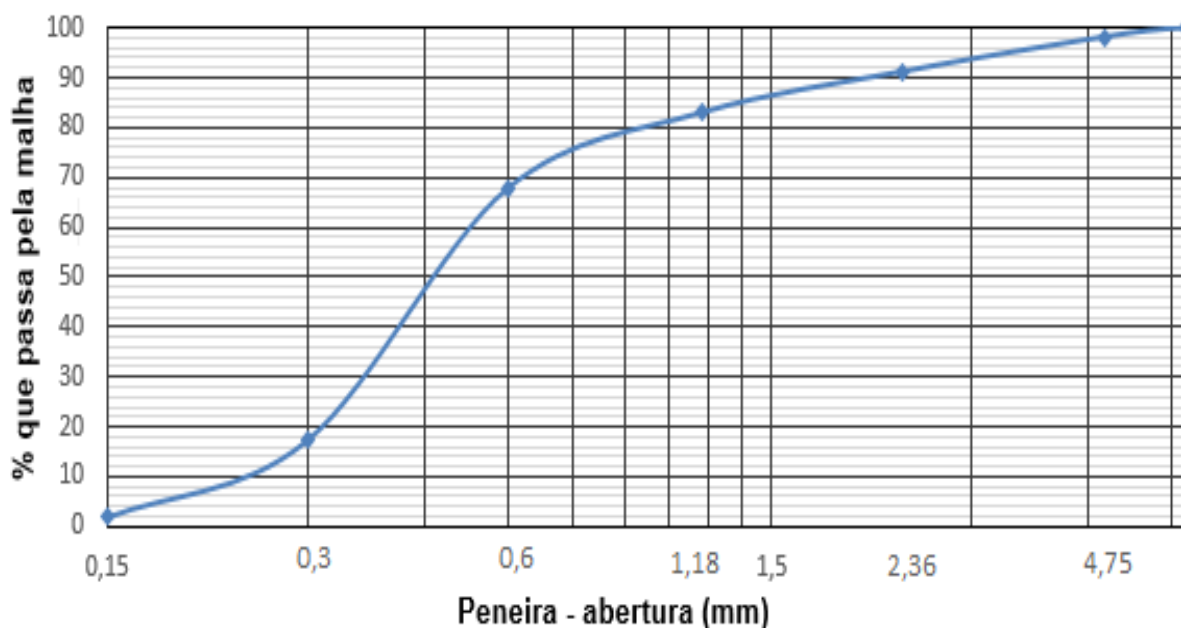
Fonte: Autor (2019).

O processo de peneiramento foi aprovado, pois o mesmo teve uma variação do percentual retido acumulado inferior a 0,3% da massa total, com tamanhos de grãos de areia inferior a 4,75 mm. Assim foi obtido as curvas granulométricas com os percentuais passantes pelas malhas da série normal.

Figura 24: Granulometria da areia fina



Fonte: Autor (2019).

Figura 25: Granulometria da areia média

Fonte: Autor (2019).

A partir das curvas de frequências foi possível determinar o D_{10} , D_{30} e D_{60} que correspondem as peneiras que deixam passar estes percentuais 10%, 30% e 60% da massa de uma amostra total e o tamanho efetivo (D_{10}) da areia foi de 0,25 e 0,26 mm com valores recomendados pela norma de 0,45 mm a 0,55 mm. Com esses valores procedeu-se o cálculo do coeficiente de uniformidade, que resultou em 1,8 e 2,1 enquanto a NBR (1990) estabelece valores entre 1,4 a 1,6. Então o coeficiente de curvatura indica uma distribuição proporcional ao tamanho das partículas, para o qual os espaços deixados pelas partículas maiores sejam preenchidos por aquelas de tamanhos menores. Assim os leitos de areia foram enquadrados como bem graduados porque possuem valores entre 1 e 3.

7.3 Coagulação/ Floculação/ Sedimentação

Na Tabela 5 são apresentados os dados experimentais obtidos durante a caracterização das águas cinzas antes e após o processo de coagulação/floculação.

Tabela 6: Caracterização de águas cinzas brutas e após coagulação/floculação

Águas cinzas brutas								
pH (-)	Turbidez (NTU)		ST (mg/L)		SF (mg/L)		SV (mg/L)	
7,93	70,5		3.481,00		1.094,00		2.387,00	
Águas cinzas após coagulação/floculação (sem correção de pH)								
Variável analisada	Dosagem Polímero Catiônico 43,50 5H (mg/L)				Dosagem Sulfato de Alumínio (mg/L)			
	100	200	400	600	100	200	400	600
Turbidez (NTU)	38,8	10,3	10,4	-	118	133	173	-
ST (mg/L)	3.391,00	3.396,50	3.409,00	-	-	-	-	-
SF (mg/L)	2.693,00	2.733,50	2.566,50	-	-	-	-	-
SV (mg/L)	698,00	663,00	842,50	-	-	-	-	-
Águas cinzas após coagulação/floculação (com correção de pH - Ácido clorídrico HCl 1:9)								
Variável analisada	Dosagem Polímero Catiônico 43,50 5H (mg/L)				Dosagem Sulfato de Alumínio (mg/L)			
	100	200	400	600	100	200	400	600
Turbidez (NTU)	51,4	54,9	23,5	18,7	-	-	2,94	9,4
ST (mg/L)	-	-	-	-	-	-	1.080,00	1.517,00
SF (mg/L)	-	-	-	-	-	-	946,00	907,50
SV (mg/L)	-	-	-	-	-	-	134,00	609,50

Fonte: Autor (2019).

Com as caracterizações das amostras brutas foi possível determinar o valor da turbidez de 70,5 NTU, no qual reforça Souza (2012) com resultados de águas cinzas de lavanderia com turbidez de 72 NTU. Com relação aos sólidos totais 68,60% da amostra são sólidos orgânicos e 31,4% de sólidos inorgânicos.

A utilização do polímero catiônico na amostra bruta sem a correção de pH resultou na dosagem de 400 mg/L à uma redução de 85% da turbidez, um aumento de 134% nos sólidos inorgânicos e a diminuição de 65% nos sólidos voláteis.

O ensaio para o coagulante sulfato de alumínio sem o ajuste do pH obteve resultados desfavoráveis, tendo um aumento de 150% da turbidez, e não ocorrendo a redução dos sólidos.

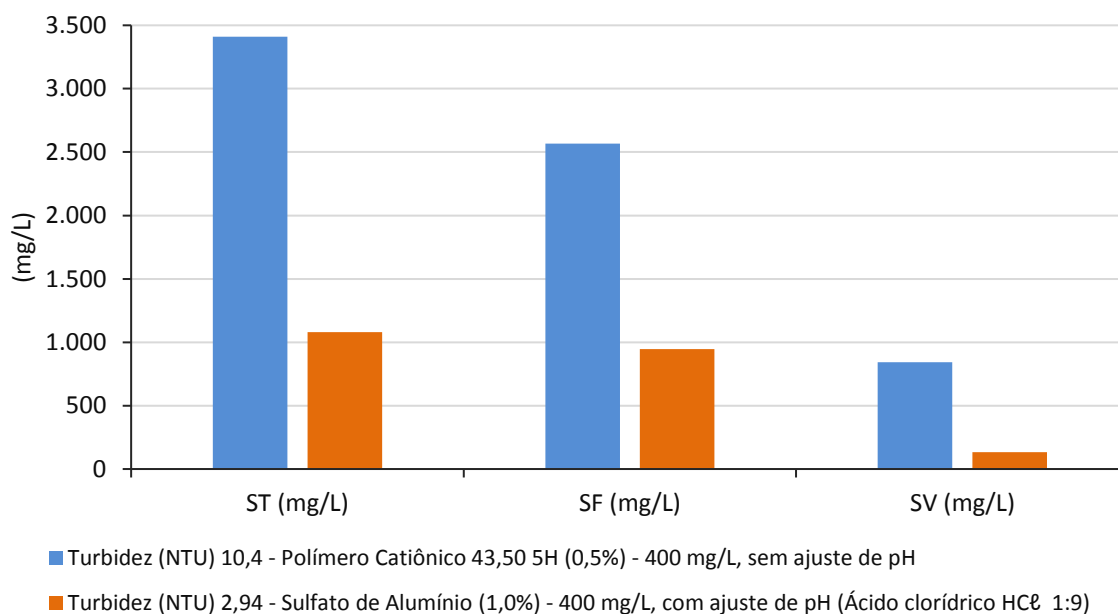
Com a correção do pH, o polímero catiônico teve reduções bem melhores nas maiores dosagens, em torno de 74% da turbidez e quando reduzido a proporção de mg/L de coagulante reduz apenas 23% da turbidez.

Com a correção do pH, os resultados melhoraram para o sulfato de alumínio com remoção de 95% da turbidez com a menor dosagem deste coagulante, induzindo

a redução de todos os sólidos, nos quais teve 69% de remoção de sólidos totais, 14% de sólidos inorgânicos e 94% de sólidos inorgânicos removidos.

A Figura 26 ilustra a comparação dos melhores resultados em todo processo experimental de coagulação/floculação/sedimentação dos dois produtos químicos, e neste caso sem correção de pH para o polímero catiônico e com correção de pH para o sulfato de alumínio.

Figura 26: Comparativo de melhor eficiência dos coagulantes



Fonte: Autor (2019).

Com base nesses resultados foi escolhido o coagulante sulfato de alumínio com correção de pH do efluente bruto e uma dosagem de 100 mg/L, que resultou em um efluente com teores de impurezas que foi removido nos processos subsequentes, fazendo com que aumentasse a vida útil reduzindo a colmatação dos leitos de filtragens.

7.4 Sistema de Tratamento

Com a coleta da amostra feita o efluente passa por processo de caracterização em todas as etapas do sistema, conforme os dados na Tabela 6 da amostra bruta até o polimento final de carvão ativado.

Tabela 7: Resultados obtidos durante o polimento de águas cinzas em sistema de filtração contendo carvão ativado produzido a partir da pirólise da poda de árvores

Parâmetro analítico	Resultados			
	P1	P2	P3	P4
Temperatura (°C)	25	25	25	25
pH (-)	7,93	7,0	6,9	6,3
Condutividade(uS/cm)	1.760,00	1.740,00	1.728,00	1.700,00
Sólidos Totais (mg/L)	3.481,00	1.080,00	827,00	790,00
Sólidos Fixos (mg/L)	1.094,00	946,00	808,33	784,7
Sólidos Voláteis (mg/L)	2.387,00	134,00	18,67	5,30
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	212,00	118,10	105,30	15,00
Turbidez (uT)	70,5	2,94	1,15	0,81

Onde: P1= Água cinza bruta; P2 = Água cinza após coagulação/floculação; P3 = Efluente filtro de areia; P4 = Efluente filtro de carvão ativado

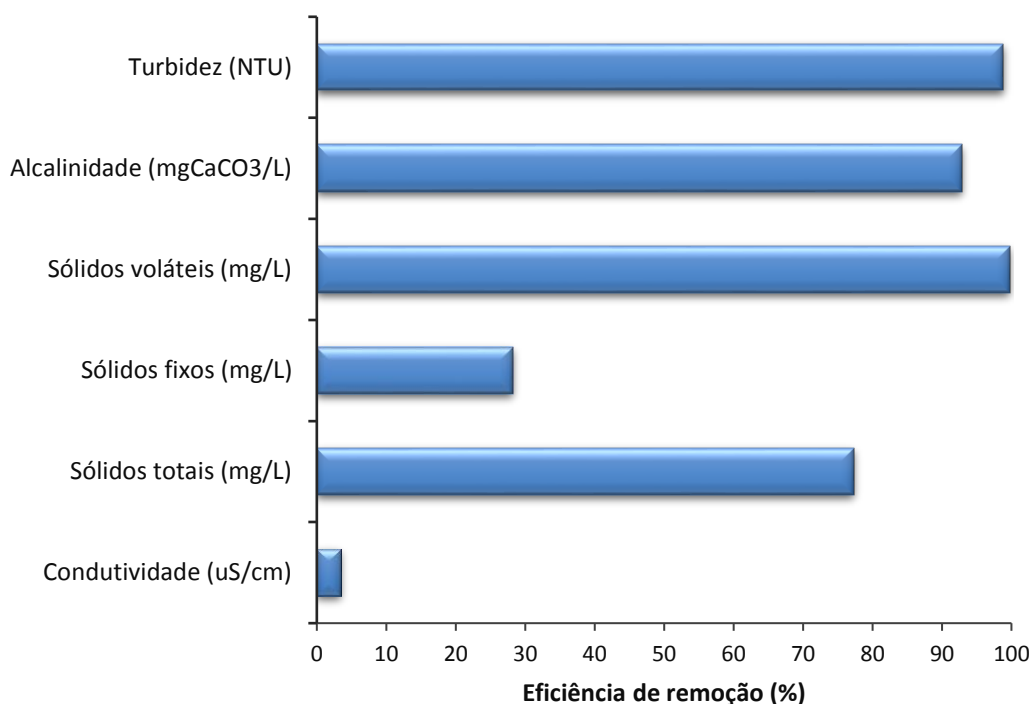
Fonte: Autor (2019).

Com a redução de 96% da turbidez já na etapa de coagulação/floculação os filtros trabalham com efluente de baixa turbidez, podendo aproximar-se de até 99% de redução deste parâmetro físico após as filtrações.

Todos os sólidos contidos no efluente bruto tiveram redução na primeira etapa de 69%, na segunda 23% e 34% na etapa final para sólidos totais. Os sólidos fixos tiveram redução de 13% na coagulação/floculação, 15% no filtro de areia e 13% na adsorção com o carvão. A parte orgânica dos sólidos já apresentaram remoções maiores chegando a retirada de 95% na primeira fase do tratamento, 86% no leito de areia e 45% no carvão ativado.

A verificação da redução de sólidos dissolvidos foi possível através do parâmetro de alcalinidade no qual se teve remoção no processo das etapas saindo no final do sistema com uma redução total de 93% da alcalinidade, afetando o crescimento dos microrganismos responsáveis pela oxidação, reforça Von Sperling (1996).

A Figura 27 ilustra a eficiência de remoção dos poluentes da amostra bruta de água cinza nos processos propostos no estudo em questão.

Figura 27: Eficiência de redução dos parâmetros das águas cinzas tratada

Fonte: Autor (2019).

Todos os parâmetros da caracterização das águas cinzas tiveram reduções satisfatórias como sólidos voláteis, turbidez, alcalinidade em valores percentuais acima de 90% e sólidos totais acima de 50%, possibilitando um efluente após o tratamento com menores teores de poluentes, ou seja, com a redução dos sólidos suspenso, dissolvidos e gases, Assim como tivemos excelentes resultados em questão da sensação olfativa, em função do carvão ativado permitindo a adsorção dos gases gerando um efluente sem odor.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando um coagulante químico verificou-se neste trabalho que para remoção dos poluentes do efluente foi necessário a correção do pH e utilização do sulfato de alumínio para obtemos os melhores resultados independente da dosagem. Com isto o sistema de coagulação trabalhou com a dosagem de 100 mg/L, devido o sistema está com processos subsequentes de tratamento, reduzindo a quantidade de produto químico (coagulante) e permanecendo uma boa taxa de remoção de poluentes.

Os processos de tratamento de águas cinzas avaliadas compostas por coagulação/floculação/sedimentação e sistema de filtragem apresentou desempenho satisfatório com percentuais de redução na concentração de sólidos totais, sólidos voláteis, turbidez na primeira etapa foi 69%, 95% e 96%. Na segunda etapa 23%, 86% e 61%. Na terceira etapa 28%, 24% e 30%. Nas três fases do processo tiveram redução em todos os parâmetros, mas somente na última fase (filtro de carvão ativado) foi possível ter um efluente sem odor desagradável.

O efluente bruto tem valor de pH elevado dificultando o desenvolvimento de microrganismos, no entanto, a desinfecção do efluente após o sistema de tratamento ser faz necessário para possibilitar águas cinzas tratadas com boas características de reuso.

9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar outros fatores que podem influenciar no rendimento de carvão da poda de árvores, como vazão de gás inerte e tempo de pirólise;
- Caracterização das biomassas contidas nas podas de árvores através das seguintes variáveis analíticas: umidade, material volátil, cinzas, poder calorífico;
- Realizar o processo de pirólise fazendo a separação dos tipos de espécies contidas nas podas de árvores;
- Caracterizar o carvão produzido pela pirólise de podas de árvores com os seguintes parâmetros: solubilidade em ácido, determinação granulométrica e massa específica.
- Avaliar a remoção de poluentes de águas cinzas empregando polímeros naturais no processo de coagulação/floculação/decantação seguido de filtração através de carvão da poda de árvores;
- Realizar a filtração com diferentes taxas de aplicações para analisar o tempo de colmatação e características das águas cinzas tratadas;
- Alterar as ordens das camadas filtrante para analisar a eficiência de remoção dos poluentes presente na água cinza.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.969: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação.** Rio de Janeiro, 1997.

ALLEN, L.; SMITH, J. C.; PALANIAPPAN, M.; **Overview of Greywater Reuse: The Potential of Greywater Systems to Aid Sustainable Water Management.** Pacific Institute, Oakland, California, 2010.

ANA. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos** / Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; Organizadores: Carlos Jesus Brandão ... [et al.]. -- São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.736: Determinação de alcalinidade -Métodos potenciométrico e titulométrico.** Rio de Janeiro, 1996.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.664: Águas - Determinação de resíduos (sólidos) - Método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 1989.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11.799: Material filtrante – Areia, antracito e pedregulho.** Rio de Janeiro, 1990.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 12 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

_____. Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 31 ago. 1981.

_____. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 jan. 1997.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, Resolução nº 404, de 11 de novembro de 2008. Dispõe sobre os critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 novembro 2008, Seção 1, p. 93.

_____. Fundação Nacional de Saúde. FUNASA. Saneamento Rural: O desafio de universalizar o saneamento rural. Boletim informativo, edição nº 10, dezembro de 2011.

_____. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 novembro 2011, Seção 1, p. 39.

BORGES, F. M.; SILVA, F. P.; CARVALHO, M. C.; FILHO, A. G. Desenvolvimento e criação de uma unidade produtiva de carvão ativado. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2003. Ouro Preto. **Anais eletrônicos...** Ouro

Preto: Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO), 2003. 8 p.
Disponível em
<http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGETP2003_TR0502_0601.pdf>. Acesso em 20/10/2018.

BALDASSIN JUNIOR, R., 1979 – **Pirolise rápida de cana-de-açúcar integral em reator piloto de leito fluidizado**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2015.

BAZZARELLA, B. B., **Caracterização e aproveitamento de água cinza para uso não-potável em edificações**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória, Espírito Santo, 2005.

COUTO, E. A., **Avaliação de reuso de águas cinzas em ambientes aeroportuários**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2012.

CARVALHO, P. C. A. P., Tratamento combinado de água produzida de petróleo: filtração, adsorção e fotorredução. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Natal, RN, 2016.

CORTEZ, C. L., **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Energia) – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARVALHO, N. L., Hentz, P., Silva, J. M., Barcellos, A. L., **Reutilização de águas residuais** - Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM, Santa Maria. Revista Monografias Ambientais – REMOA, V. 14, p. 3164 – 3171, N. 2, março: 2014.

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

HEMPE, C., NOGUERA, J. O. C. A Educação Ambiental e os Resíduos Sólidos Urbanos - uma revisão. Artigo, UFSM, Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. (5), nº5, p. 682 - 695, 2012.

MELLO, F. A., OLIVO, A. M., **Recursos Hídricos: Poluição, Escassez, Qualidade Microbiológica e Química da Água**. Colloquium Vitae, vol. 8, n. Especial, Jul–Dez, 2016, p. 36-42.

MELO, A. R. B., Pós-Tratamento de Efluente De Reator UASB por Filtração em Areia e Carvão Ativado. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, 2014.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos. Conceito de Reúso de Água. **Reúso de Águas**. Barueri: Manole, cap. 2, p. 22-36, 2003.

MOTA, S. **Conservação e preservação de recursos hídricos**, 2a ed. revisada e atualizada, Editora ABES, Rio de Janeiro, 2008.

Pesquisa nacional por amostra de domicílios - PNAD: síntese de indicadores 2013 / IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento. - 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

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.

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

_____. 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.

_____. PAZ, E. C. S., OLIVEIRA, L. R. A., PAZ, R. R. S., BITTENCOURT, P. O. Estudo do Potencial de Adsorção do Carvão e Poder Calorífico Obtido a Partir de Biomassa do Coco Da Baía. Jornada de Iniciação Científica e Extensão, VII, 2017.

PALMAS. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas - TO**, 2014. Disponível em: <http://www.palmas.to.gov.br/media/doc/arquivoservico/PMSB_Palmas_Volume_04_Residuos_Solidos_Versao_Final.pdf>.

RIBEIRO, Gustavo G. et al. **Reciclagem de resíduos orgânicos**. Universidade do Estado de Mato Grosso, 2011. Disponível em http://www.unemat.br/proec/compostagem/docs/folder_reciclagem_residuos_organicos.pdf, acesso em 10 de agosto de 2018.

RAMPELOTTO, G., **Caracterização e Tratamento de Águas Cinzas Visando Reúso Doméstico**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2014.

RODRIGUES, C. R., **Degradação Térmica da Casca de Arroz e Utilização do Carvão Obtido no Processo para Polimento de Águas Cinzas**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Tocantins, 2019.

SANTOS, K. G., **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: Fluidodinâmica e cinética do processo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pós-Graduação em Engenharia Química, Minas Gerais, 2011.

SILVA, C. V., **Caracterização do bio-óleo produzido por pirólise rápida do bagaço de cana-de-açúcar**. Mestrado, do Instituto da Química da Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2013.

SANTANA, E. A., **Desenvolvimento de um sistema de filtragem para Tratamento de água cinza visando o seu reúso**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2013

SOUZA, R. C., **Tratamento de Efluentes de lavanderia hospitalar para fins de reúso**. UEM, Maringá – PR, 2012.

TOCANTINS. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins**, 2017.
Disponível em: <<https://semarh.to.gov.br/-residuos-solidos/>>. Acesso em 20/10/2018.

TOCANTINS. **Tribunal de Contas do Estado – TCE: Processo nº 048/2013 e Processo nº 035512/2013**, 2013.

_____. **Tribunal de Contas do Estado – TCE: Processo nº 36.244/2007**, 2011.

_____. **Tribunal de Contas do Estado – TCE: Processo nº034804/2012**, 2012.

VIEIRA, G. E. G., ROMEIRO, G. A., SELLA, S. M., DAMASCENO, R. N., PEREIRA, R. G. **Low temperature conversion (LTC) – An alternative method to treat sludge generated in an industrial wastewater treatment station – Batch and continuous process comparison**. *Bioresource Technology*, 100, p.1544–1547, ago. 2009.

VARGAS, G. D. L. P., MOREIRA, R. F. P. M. **Adsorptive filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, 2014.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias - Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: DESA-UFGM, 1996.

WIECHETECK, M., **Aproveitamento de Resíduos e Subprodutos Florestais, Alternativas Tecnológicas e Propostas de Políticas ao Uso de Resíduos Florestais Para Fins Energéticos**. Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio Às Políticas Públicas Na Área de Gestão e Controle Ambiental, Curitiba – PR, 2009.