



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

KENIA PARENTE LOPES MENDONÇA

**TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZA PROVENIENTES DE
LAVANDERIAS VISANDO REÚSO**

PALMAS - TOCANTINS

2019

KENIA PARENTE LOPES MENDONÇA

**TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZA PROVENIENTES DE
LAVANDERIAS VISANDO REÚSO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Girlene Figueiredo Maciel
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS - TOCANTINS

2019

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

M539t Mendonça, Kenia Parente Lopes.

Tratamento de águas cinza provenientes de lavanderias visando reúso. /
Kenia Parente Lopes Mendonça. – Palmas, TO, 2019.

101 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins
– Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado)
Profissional em Engenharia Ambiental, 2019.

Orientador: Girlene Figueiredo Maciel

Coorientador: Marcelo Mendes Pedroza

1. águas cinza. 2. Reúso de água. 3. Tratamento químico. 4.
Enquadramento. 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).**

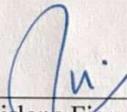
FOLHA DE APROVAÇÃO

KENIA PARENTE LOPES MENDONÇA

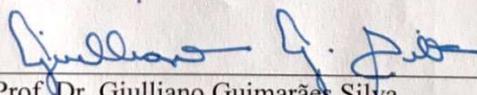
TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZA PROVENIENTES DE LAVANDERIAS
VISANDO REUSO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental,
Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca
Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

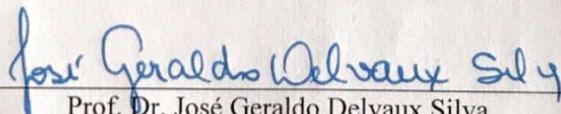
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Gilene Figueiredo Maciel
Universidade Federal do Tocantins (Presidente)



Prof. Dr. Giuliano Guimarães Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



Prof. Dr. José Geraldo Delvaux Silva
Secretaria do Trabalho e Desenvolvimento Social

Aprovada em: 13 de dezembro de 2019
Local de defesa: Bloco J - Sala 101
Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas



Aos amores da minha vida:
meus pais **Lairson e Tomariza**,
meu esposo **Jocélio**, e
meus filhos **Lucas e Luana**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, força viva em todos os momentos, alegres ou difíceis.

Aos meus pais Lairson Lopes e Tomariza Parente Lopes, pelo apoio incondicional e pelo exemplo diário.

Ao meu esposo Jocélio Cabral Mendonça, meu “técnico-mor”, pelo companheirismo e pelo incentivo.

Aos meus filhos, Lucas e Luana por toda compreensão.

Ao meu orientador Dr. Girlene Figueiredo Maciel, pela amizade e pelos ensinamentos.

Ao meu co-orientador Dr. Marcelo Mendes Pedroza, pela amizade e por todo o apoio na realização deste trabalho.

Aos membros da banca Dr. Giulliano Guimarães Silva e Dr. José Geraldo Delvaux Silva, pela dedicação na correção deste trabalho.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação nível de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins.

Aos colegas do mestrado, representados aqui pelas amigas Marcieli Coradin e Meriele Costa, amigadas fortalecidas durante esta etapa.

Aos proprietários de lavanderias de Palmas-TO, que nos receberam para realização desta pesquisa, representados aqui pela Sra. Sirlene Machado, Sr. Germano Brugger e Sra. Inês Brugger.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Uma das alternativas viáveis para o uso sustentável dos recursos hídricos é o reúso de águas cinza em fins não potáveis. Dentre as águas cinza, as provenientes de máquinas de lavar roupas são as que apresentam maior facilidade de tratamento por suas características físicas, químicas e microbiológicas. Este estudo estimou a quantidade de água cinza gerada mensalmente nas lavanderias de Palmas, caracterizou a água cinza gerada nessa atividade, avaliou alternativas de tratamento de águas cinza provenientes de lavanderias visando o reúso em fins não potáveis, e fez o enquadramento das suas características pós tratamento a exigências de legislação para reúso de águas cinza tratadas. Foram executados ensaios de bancada simulando três processos de tratamento de água cinza: a) filtração em filtro de areia; b) coagulação, floculação, sedimentação e filtração em filtro de areia e c) coagulação, floculação, sedimentação, filtração em filtro de areia e filtração em filtro de carvão ativado. Foram realizados ensaios de tratamento em *jar-test* com uso do coagulante sulfato de alumínio e para otimizar esse processo foram feitos os planejamentos fatoriais: delineamento fatorial fracionado (DFF), delineamento composto central (DCC) e delineamento composto central rotacional (DCCR). Os resultados dos ensaios de bancada mostraram que somente a filtração em areia não é suficiente para que a água cinza proveniente de lavanderia esteja apta ao reúso em classes definidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), mas quando submetida a coagulação, floculação e filtração em filtro de areia seguido ou não de filtração em filtro de carvão ativado, a água cinza proveniente da lavagem de roupas torna-se apta ao reúso em algumas das classes definidas por esses órgãos. Conseguiu-se com os tratamentos aplicados resultados favoráveis de remoção de nutrientes, como remoção de 98,8% e 99,3% de turbidez nas filtrações em filtro de areia e em filtro de areia seguido de filtração em carvão ativado, respectivamente e remoção de DQO de 73,1% e 89,5% quando também submetidos a esses tratamentos. A remoção de Sólidos Totais ficou em 66,3% e obteve-se uma remoção de 80,9% de coliformes totais. Os resultados demonstram ser viável o tratamento de águas cinza provenientes de lavanderia e o seu reúso em fins não potáveis, sendo indicados estudos em escala real para validação dos parâmetros aqui obtidos.

Palavras-chave: águas cinza, reúso, tratamento químico, enquadramento.

ABSTRACT

One of the viable alternatives for the sustainable use of water resources is the reuse of greywater for non-potable purposes. Among the greywaters, those coming from washing machines are those that present the easiest treatment due to their physical, chemical and microbiological characteristics. This study estimated the amount of greywater generated monthly in the Palmas-TO laundries, characterized the greywater generated in this activity, evaluated alternatives for the treatment of greywater from laundries aiming at reuse in non-potable purposes, and framed its characteristics after treatment legislation requirements for the reuse of treated greywater. Bench tests were performed simulating three greywater treatment processes: a) sand filter filtration; b) coagulation, flocculation, sedimentation and filtration on a sand filter and c) coagulation, flocculation, sedimentation, filtration on a sand filter and activated carbon filter filtration. Treatment tests were performed in jar-test using the aluminum sulfate coagulant and to optimize this process the factorial designs were made: fractional factorial design (DFF), central composite design (DCC) and rotational central composite design (DCCR). The results of bench tests showed that sand filtration alone is not sufficient for greywater from laundry to be reused in classes defined by the National Water Agency (ANA) and the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT), but when subjected to sand filter coagulation, flocculation and filtration followed or not by activated carbon filter filtration, greywater from laundry becomes suitable for reuse in some of the classes defined by ANA and ABNT. Favorable nutrient removal results were achieved with the applied treatments, such as 98.8% and 99.3% turbidity removal in the sand filter and sand filter filtration followed by activated charcoal filtration respectively and COD of 73.1% and 89.5% when also submitted to these treatments. Total solids removal was 66.3% and 80.9% total coliforms were removed. The results show that the treatment of greywater from laundry and its reuse in non-potable purposes is feasible. Therefore, full scale studies are indicated to validate the parameters obtained.

Keywords: greywater, reuse, chemical treatment, framing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da transição entre águas negras e águas cinza - escuras e claras.	22
Figura 2: Composição média do esgoto doméstico gerado na Austrália e na Irlanda.	25
Figura 3: Composição média do esgoto doméstico gerado na Dinamarca e em Bangladesh.	25
Figura 4: Composição média do esgoto doméstico gerado no Brasil.	26
Figura 5: Fluxograma do procedimento metodológico.	45
Figura 6: Material orientativo para visitas às lavanderias.	46
Figura 7: Dados coletados durante as visitas às lavanderias de Palmas.	47
Figura 8: Instalações de lavanderias visitadas em Palmas.	47
Figura 9: Coleta de amostras de águas cinza na Lavanderia A.	50
Figura 10: Transporte das amostras para o laboratório do IFTO.	51
Figura 11: Esquema da obtenção da amostra padrão de água cinza de lavanderia.	52
Figura 12: Amostra de água cinza preparada em proporção 1:3.	52
Figura 13: Esquema dos ensaios de bancada para tratamento das águas cinza.	54
Figura 14: Esquema do processo A de tratamento da AC.	55
Figura 15: Filtro de areia 1 usado no processo A de tratamento.	55
Figura 16: Amostra bruta (areia média e areia fina).	56
Figura 17: Curvas granulométricas - areia fina e areia média usadas no filtro.	57
Figura 18: Esquema do processo B de tratamento da AC.	58
Figura 19: Equipamento "Jar Test".	58
Figura 20: Representação do planejamento experimental dos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação.	59
Figura 21: Sistema de filtração de águas cinza após etapas de coagulação, floculação e sedimentação.	63
Figura 22: Detalhe do filtro de areia 2 utilizado no processo B de tratamento.	63
Figura 23: Esquema do processo C de tratamento de AC.	64

Figura 24: Sistema de filtração de águas cinza, contendo dois filtros em série.....	64
Figura 25: Percentual de geração de esgoto e água cinza nas lavanderias pesquisadas de Palmas-TO.....	68
Figura 26: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 – DFF 2^{4-1}	72
Figura 27: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 e X_2 – DCC 2^2	73
Figura 28: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 e X_2 – DCCR 2^2	75
Figura 29: Superfície de contorno para a variação da turbidez por meio do DCCR 2^2	75
Figura 30: Percentual de remoção de turbidez e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.	77
Figura 31: Percentual de remoção de DQO e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.	78
Figura 32: Percentual de remoção de CT e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.	78
Figura 33: Percentual de remoção de amônia e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.	79
Figura 34: Percentual de remoção de Sólidos Totais e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Forma de abastecimento de água e de aproveitamento de água cinza nas lavanderias.....	48
Tabela 2: Categorias de roupas lavadas, número e capacidade das máquinas instaladas. ..	48
Tabela 3: Consumo de água por categoria de roupa lavada.....	49
Tabela 4: Categorias de roupas lavadas por lavanderia visitada.....	49
Tabela 5: Ordem dos experimentos empregados no DFF 2^{4-1}	59
Tabela 6: Fatores e níveis empregados no DFF 2^{4-1}	60
Tabela 7: Ordem dos experimentos empregados no DCC 2^2	61
Tabela 8: Fatores e níveis empregados no DCC 2^2	61
Tabela 9: Ordem dos experimentos empregados no DCCR 2^2	62
Tabela 10: Fatores e níveis empregados no DCCR 2^2	62
Tabela 11: Previsão mensal de geração de esgoto em lavanderias de Palmas-TO.	67
Tabela 12: Caracterização da AC bruta e outras pesquisas em AC de máquinas de lavar. 68	
Tabela 13: Estimativas de valor de DBO_5 da AC bruta em função da DQO medida.	70
Tabela 14: Respostas de turbidez (AC após DFF 2^{4-1}).	71
Tabela 15: Efeitos das variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 no DFF 2^{4-1}	72
Tabela 16: Respostas de turbidez (AC após DCC 2^2).....	73
Tabela 17: Respostas de turbidez (AC após DCCR 2^2).....	74
Tabela 18: Ajuste de um modelo de regressão para as variáveis X_1 e X_2 do DCCR 2^2	74
Tabela 19: ANOVA para o teste de turbidez por meio do DCCR 2^2	76
Tabela 20: Caracterização da AC bruta e da AC tratada pelos processos A, B e C.	76
Tabela 21: Estimativas de valor de DBO_5 da AC tratada em função da DQO medida.	80
Tabela 22: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 1 segundo a ABNT.	81
Tabela 23: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 2 segundo a ABNT.	81
Tabela 24: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 3 segundo a ABNT.	81

Tabela 25: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 1 segundo a ABNT.....	82
Tabela 26: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 2 segundo a ABNT.....	82
Tabela 27: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 3 segundo a ABNT.....	83
Tabela 28: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 1 segundo a ABNT.....	83
Tabela 29: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 2 segundo a ABNT.....	84
Tabela 30: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 3 segundo a ABNT.....	84
Tabela 31: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 1 segundo a ANA.....	85
Tabela 32: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 2 segundo a ANA.....	85
Tabela 33: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 3 segundo a ANA.....	86
Tabela 34: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 1 segundo a ANA.....	86
Tabela 35: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 2 segundo a ANA.....	87
Tabela 36: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 3 segundo a ANA.....	87
Tabela 37: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 1 segundo a ANA.....	88
Tabela 38: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 2 segundo a ANA.....	89
Tabela 39: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 3 segundo a ANA.....	89
Tabela 40: Resumo dos enquadramentos da AC tratada às classes de reúso previstas pela ANA e pela ABNT.	90
Tabela 41: Comparações entre AC tratada e exigências de enquadramento do Canadá. ...	91
Tabela 42: Comparações entre AC tratada e exigências de enquadramento no estado do Arizona - EUA.....	92
Tabela 43: Índices da AC tratada e exigências no estado da Carolina do Norte – EUA para reúso de água cinza.....	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Padrões de qualidade de água por classe de uso não potável segundo ANA et al. (2005).	31
Quadro 2: Padrões de qualidade de água por classe de uso não potável segundo a NBR 13969.	31
Quadro 3: Recomendações canadenses para uso de águas cinza em descargas sanitárias.	32
Quadro 4: Parâmetros de qualidade indicados pela USEPA para reúso de águas cinza tratadas.	33
Quadro 5: Sugestões da USEPA para uso de água cinza tratada de acordo com o tratamento a que foi submetida.	33
Quadro 6: Densidade média de CT em função do grau de contato da água reciclada com o usuário.	34
Quadro 7: Padrão de qualidade pós-tratamento de AC definido pela EPA Victoria.	34
Quadro 8: Usos aprovados pela EPA Victoria para águas cinza em instalações domésticas.	35
Quadro 9: Critérios de qualidade da água de reúso definidos pela ASERSA.	35
Quadro 10: Parâmetros exigidos para água cinza tratada em Niterói-RJ.	37
Quadro 11: Metodologias empregadas nas análises dos parâmetros físico-químico-microbiológicos da AC.	53
Quadro 12: Características do meio filtrante.	56
Quadro 13: Composição granulométrica do material filtrante.	57
Quadro 14: Dados comparativos entre características de AC bruta e AC tratada.	65
Quadro 15: Dados a serem preenchidos para avaliação do potencial de reúso das AC tratadas.	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Águas Cinza
ACIPA	Associação Comercial e Industrial de Palmas-TO
ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
ANA	Agência Nacional de Águas
ANOVA	Análise de Variância
Art.	Artigo
ASERSA	<i>Asociación Española de Reutilización Sostenible del Agua</i>
CAG	Carvão Ativado Granular
CAP	Carvão Ativado Pulverizado
ACIPA	Associação Comercial e Industrial de Palmas
cm	Centímetro
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CT	Coliformes Termotolerantes
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCC	Delineamento Composto Central
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DF	Distrito Federal
DFE	Delineamento Fatorial Fracionário
DOE	Diário Oficial do Estado
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DUI	Declaração de Uso Insignificante
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
ETAC	Estação de Tratamento de Águas Cinza
EVOP	<i>Evolution Operation</i>
FBAS	Filtro Biológico Aerado Submerso
FCA	Filtro com Carvão Ativado
FSM	Filtro de Serragem de Madeira
FT	Filtro Terciário
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFTO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
IN	Instrução Normativa
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L	Litro

kg	Quilograma
MF	Módulo de finura
mg	Miligrama
mL	Mililitro
MS	Ministério da Saúde
Naturatins	Instituto Natureza do Tocantins
NBR	Norma Brasileira
ND	Não detectado
NE	Não especificado
NM	Não medido
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i> (Unidade Nefelométrica de Turbidez)
OD	Oxigênio Dissolvido
PB	Paraíba
pH	Potencial Hidrogeniônico
PR	Paraná
PRC	Portaria de Consolidação
PURAE	Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações
PVC	Policloreto de vinila
RJ	Rio de Janeiro
rpm	Rotações Por Minuto
RAC	Reator Anaeróbio Compartimentado
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SINJ-DF	Sistema Integrado de Normas Jurídicas do DF
SST	Sólidos Suspensos Totais
STAC	Sistema de Tratamento de Águas Cinza
SVS	Secretaria de Vigilância em Saúde
ufc	Unidade Formadora de Colônia
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFPE	Universidade Federal do Pernambuco
UnB	Universidade de Brasília
UNDP	<i>United Nations Development Programme</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
uT	Unidade de Turbidez
WWAP	<i>World Water Assessment Programme</i>



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. OBJETIVOS	20
1.1.1. Objetivo Geral.....	20
1.1.2. Objetivos Específicos.....	20
1.2. JUSTIFICATIVA	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. DEFINIÇÃO DE ÁGUAS CINZA	22
2.1.1. Histórico do uso de águas cinza.....	23
2.1.2. Vantagens do tratamento e reúso das águas cinza	23
2.1.3. Composição das águas cinza.....	24
2.2. MÉTODOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZA.....	26
2.2.1. Filtração	27
2.2.2. Coagulação, floculação e sedimentação	28
2.2.3. Carvão Ativado	29
2.3. USOS DA ÁGUA – LEGISLAÇÃO PERTINENTE	29
2.3.1. Legislação sobre parâmetros de qualidade da água para uso potável e não potável	30
2.3.2. Regulamentações internacionais da prática de reúso.....	32
2.3.2.1. Canadá.....	32
2.3.2.2. Estados Unidos da América	32
2.3.2.3. Austrália	34
2.3.2.4. Espanha	35
2.3.3. Legislações estaduais e municipais sobre reúso de água.....	36
2.3.4. Águas subterrâneas	37
2.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS CINZA.....	38
2.4.1. Temperatura	38
2.4.2. pH.....	38
2.4.3. Alcalinidade	39
2.4.4. Turbidez	39
2.4.5. Condutividade elétrica	40
2.4.6. Cloretos	40
2.4.7. Cloro residual.....	40

2.4.8. Sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis e sólidos sedimentáveis.....	40
2.4.9. Demanda Química de Oxigênio – DQO	41
2.4.10. Amônia.....	41
2.4.11. Coliformes totais e <i>E. coli</i>	42
2.5. EXPERIÊNCIAS EM TRATAMENTOS DE ÁGUAS CINZA.....	42
2.5.1. Tratamento de águas cinza de lavanderias.....	42
2.5.2. Tratamento de águas cinza diversas.....	43
3. METODOLOGIA	45
3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	45
3.2. CADASTRO E VISITA ÀS PRINCIPAIS LAVANDEIRAS DE PALMAS	46
3.3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA CINZA DE LAVANDERIA.....	50
3.3.1. Preparo das amostras.....	50
3.3.2. Execução dos ensaios de caracterização da água cinza de lavanderia.....	53
3.4. ENSAIOS DE BANCADA PARA TRATAMENTO DAS ÁGUAS CINZA	53
3.4.1. Detalhamento do processo A de tratamento de água cinza.....	54
3.4.2. Detalhamento do processo B de tratamento de água cinza.....	58
3.4.3. Detalhamento do processo C de tratamento de água cinza.....	64
3.4.4. Caracterização das amostras de água cinza tratada.....	65
3.5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REÚSO DAS AC TRATADAS	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1. VOLUME DE AC GERADAS NAS LAVANDEIRAS DE PALMAS	67
4.2. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA CINZA DE LAVANDERIA.....	68
4.2.1. Resultados da análise da água cinza bruta	68
4.2.2. Enquadramento da AC bruta a possíveis usos como água de reúso	70
4.3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	71
4.3.1. Delineamento Fatorial Fracionário (DFF 2 ⁴⁻¹).....	71
4.3.2. Delineamento Composto Central (DCC 2 ²).....	73
4.3.3. Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR 2 ²).....	74
4.4. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA CINZA TRATADA	76
4.5. POTENCIAL DE REÚSO DE ÁGUAS CINZA DE LAVANDERIA TRATADAS	80
4.5.1. Enquadramento dos parâmetros da AC tratada a exigências para águas de reúso	80

4.5.1.1. Enquadramento dos parâmetros pós-processo A às exigências da ABNT...	80
4.5.1.2. Enquadramento dos parâmetros pós-processo B às exigências da ABNT...	82
4.5.1.3. Enquadramento dos parâmetros pós-processo C às exigências da ABNT...	83
4.5.1.4. Enquadramento dos parâmetros pós-processo A às exigências da ANA.....	84
4.5.1.5. Enquadramento dos parâmetros pós-processo B às exigências da ANA.....	86
4.5.1.6. Enquadramento dos parâmetros pós-processo C às exigências da ANA.....	87
4.5.2. Resumo dos enquadramentos possíveis da AC tratada – legislação nacional	90
4.5.3. Considerações sobre possíveis enquadramentos em legislações internacionais.	91
5. CONCLUSÕES	94
6. REFERÊNCIAS	95



1. INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural de maior importância para a humanidade, e a natureza, a partir do ciclo hidrológico, vem trabalhando na depuração deste recurso finito ao longo de milhões de anos. Entretanto, com o crescimento da população e os constantes esforços pela melhoria da qualidade de vida, a pressão sobre a quantidade e qualidade de água disponível torna-se maior.

O volume total de água doce no Planeta Terra não é hoje suficiente para atender a demanda da população mundial. Aproximadamente 40% da população global é afetada pela escassez de água, e pesquisas apontam que este número poderá subir a 75% da população global em 2025. Segundo a *United Nations Development Programme* (UNDP), mais de 1,7 bilhões de pessoas atualmente vivem em bacias hidrográficas em que o uso supera a produção de água (UNDP, 2017).

Como fazer o uso sustentável da água, garantindo que ela possa estar disponível a gerações futuras e que as atuais tenham suas necessidades satisfeitas, é uma pergunta para a qual uma das respostas pode ser a viabilização do reúso da água.

O uso da água para consumo humano exige que ela tenha certos padrões de potabilidade que garantam a saúde do seu usuário. Estes padrões estão definidos no Anexo XX da Portaria de Consolidação (PRC) nº 5, de 28 de setembro de 2017 (BRASIL, 2017). Isso implica que toda a água que abastece as cidades deve atender esses padrões de potabilidade. Porém, para determinados usos, como a irrigação de jardins, a lavagem de pisos e a descarga sanitária, mesmo que não tivesse padrões tão elevados de potabilidade, a água usada nessas atividades não necessariamente ofereceria riscos aos seus usuários.

Teoricamente, toda água que serviu para a realização de alguma atividade humana recebeu algum tratamento antes do seu uso e irá receber algum outro tratamento antes do seu retorno a um efluente.

A Norma *International Organization for Standardization* (ISO) 24512 (ISO, 2007) define como um dos objetivos principais dos sistemas de abastecimento de água, a promoção do desenvolvimento sustentável na comunidade: gestão dos recursos hídricos (proteção dos mananciais), redução da geração de resíduos e uso sustentável dos insumos.

Entende-se por proteção dos mananciais a preservação das suas características de qualidade e quantidade de água disponível. A redução do uso de água tratada está diretamente

ligada à redução da retirada desse recurso dos mananciais, sejam eles superficiais ou subterrâneos.

Para produzir água potável, há geração de resíduos devido a impurezas presentes da água e a necessidade de uso de produtos químicos para fazer esse tratamento. Um ganho direto da redução do uso da água potável através do reúso seria a diminuição dos resíduos gerados no tratamento e todas as implicações ambientais e financeiras exigidas para o descarte desses resíduos.

Para promoção do uso sustentável dos insumos, há que se buscar constantemente alternativas de reúso da água. A complexidade do tratamento é função direta da finalidade de uso da água. Para certos fins, especialmente no ambiente doméstico, não é exigido para a água todos os padrões de potabilidade e índices mais flexíveis para suas propriedades podem ser alcançados com etapas mais simples de tratamento aplicadas a águas servidas, desde que estas não contenham esgoto sanitário.

O uso em lavanderias é um dos exemplos em que a água residuária do processo de lavagem é caracterizada como uma água cinza, uma transição entre a água límpida, potável e a água negra, o esgoto sanitário. Ressalvas devem ser feitas para casos específicos como as lavagens de fraldas ou roupas usadas em ambiente hospitalar, mas geralmente as águas servidas em lavanderias estão isentas de coliformes e demais patógenos. Utiliza-se água potável para a realização da atividade principal das lavanderias e a água servida resultante desse processo, apesar de conter surfactantes e matéria orgânica, é passível de ser tratada domesticamente para destinação em demais usos considerados menos nobres, como a lavagem de pisos, irrigação de jardins e descargas em vasos sanitários.

O tratamento de águas cinza visando reúso poderá ser considerado um processo intermediário, que contém tanto características do tratamento de esgoto quanto do tratamento de água. Apesar das características das águas cinza não a identificarem como esgoto bruto, ela também não pode ser caracterizada como uma fonte ideal de água bruta, por possuir na sua composição nutrientes e compostos que podem dificultar o seu tratamento.

Neste trabalho, investigam-se as características das águas servidas das lavanderias de Palmas, avaliando o potencial de tratamento dessas águas por processos de simples operação e manutenção e caracterizando o efluente deste tratamento, indicando possíveis reúsos para essa água, considerando-se a legislação vigente.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar alternativas de tratamento de águas cinza provenientes de lavanderias da cidade de Palmas-TO visando o reúso em fins não potáveis.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Quantificar o volume de águas cinza geradas nas lavanderias de Palmas-TO;
- Determinar as características físico-químicas e microbiológicas das águas cinza geradas nos diversos processos envolvidos em lavanderias da cidade de Palmas-TO;
- Determinar as características físico-químicas e microbiológicas das águas cinza após serem submetidas em laboratório a três sistemas distintos de tratamento em formato de ensaios de bancada;
- Avaliar o potencial de reúso de águas cinza provenientes de lavanderias após terem sido submetidas a três sistemas distintos de tratamento.

1.2. JUSTIFICATIVA

O reúso de águas cinza traz além do benefício da redução do consumo de água potável, a redução da água residuária que segue para fossas sépticas ou para estações de tratamento de esgoto. Isso implica em menor consumo de energia e menor uso de produtos químicos tanto para o tratamento da água quanto para o tratamento do esgoto, além da redução dos resíduos provenientes do tratamento das águas e dos esgotos.

Escolheu-se para esse trabalho a avaliação das águas cinza provenientes da lavagem de roupas (máquinas de lavar domésticas ou lavanderias), que são as consideradas de mais fácil tratamento. O descarte dessas águas juntamente com as águas sanitárias pode ser considerado um grande desperdício pensando-se na quantidade gerada em uma residência. Quando se considera o descarte de uma quantidade de água utilizada em grande escala, como é o caso de lavanderias de grandes cidades, percebe-se que a possibilidade de aproveitamento de um recurso escasso está sendo negligenciada.

No caso de lavadeiras de grande escala, a maioria delas utiliza nas suas atividades águas de poços tubulares profundos, que não precisaram passar por processo de tratamento, e lançam toda a água residuária na rede de esgoto.

A análise das características do efluente e a definição dos requisitos de qualidade requeridos para o reúso desejado é que definem o tipo de tratamento necessário e adequado para cada tipo de água cinza. Há, portanto, que se caracterizar o efluente das lavanderias e verificar as características obtidas após serem submetidas a diversos tipos de tratamento para definição do enquadramento em possíveis usos.

São necessárias pesquisas para que a regulamentação da prática de reúso da água cinza seja realizada a partir de critérios técnicos bem definidos e adequados. Por isso, merece um estudo a possibilidade de reúso das águas cinza geradas em lavanderias comerciais e industriais da cidade de Palmas-TO, para que os resultados possam ser usados pelos proprietários das lavanderias para amparar alterações nas suas instalações hidrossanitárias, visando esse reúso. E também para que os resultados possam embasar legislações municipais ou estaduais futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEFINIÇÃO DE ÁGUAS CINZA

A Resolução nº 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) traz no seu Art. 2º as seguintes definições (BRASIL, 2005):

I - água residuária: esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não;

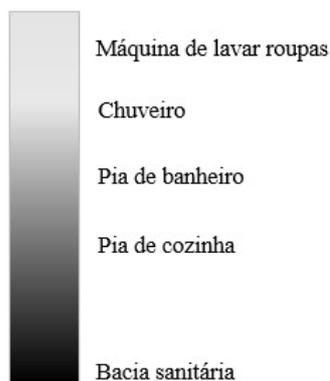
II - reúso de água: utilização de água residuária;

III - água de reúso: água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas;

IV - reúso direto de água: uso planejado de água de reúso, conduzida ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos.

Dentre as águas residuárias, destacam-se as águas cinza (AC), assim denominadas por terem uma aparência de coloração entre a água potável (límpida) e o esgoto bruto (marrom escuro). As águas cinza são as águas residuárias usadas em chuveiros, banheiras, máquinas de lavar e pias de cozinha, sem o esgoto sanitário proveniente das bacias sanitárias, e que por conterem menos patógenos e menos nitrogênio que o esgoto sanitário (água negra), são passíveis de reciclagem (ABEDIN; RAKIB, 2013). Otterpohl (2001) acrescenta ao conceito de águas negras (*blackwater*) e águas cinza (*greywater*) os termos: águas amarelas para efluentes representados somente pela urina e águas marrons para efluentes representados somente pelas fezes. Eriksson *et al.* (2002) dividem as águas cinza em águas cinza claras e escuras, considerando águas cinza claras as provenientes do chuveiro, lavatório e máquinas de lavar roupas e as águas cinza escuras, as provenientes da pia da cozinha e máquinas de lavar pratos (Figura 1).

Figura 1: Ilustração da transição entre águas negras e águas cinza - escuras e claras.



Fonte: adaptado de Mohamed (2011), Allen *et al.* (2010) e Eriksson *et al.* (2002).

Allen *et al.* (2010) consideram essas subdivisões das águas cinza de acordo com a composição provável delas, sendo que as AC provenientes do uso de pias de cozinha e lavadoras de louça são passíveis de terem maior concentração de matéria orgânica, óleos e graxas, além de bactérias e por isso as denomina "AC escura".

Estima-se que o esgoto sanitário é composto de aproximadamente 80% de águas cinza, o que evidencia o grande potencial de reaproveitamento deste recurso (SIDIBE, 2014).

Há que ser salientado também que os diversos aparelhos sanitários (pias e ralos do chuveiro) acabam por propiciar eventuais usos que contaminam as águas cinza (por exemplo urina no ralo do chuveiro). Portanto, apesar de consideradas como passíveis de reúso, não pode ser descartada a possível presença de bactérias patogênicas (RAMPELOTTO, 2014).

Importante registrar que as águas de chuva, que também podem ser coletadas para uso em atividades como irrigação, lavagens de pisos e descargas sanitárias não são consideradas águas cinza.

2.1.1. Histórico do uso de águas cinza

O conceito de reúso de águas cinza é aplicado em certas atitudes como, por exemplo, utilizar para lavagem de um piso a água usada no enxágue de roupas. De acordo com Angelakis *et al.* (2015), a primeira evidência histórica de reúso de água para irrigação remonta à Idade do Bronze em Creta, aproximadamente há 5000 anos. Na história mais recente, remonta aos anos 1500 a 1800 experiências com o que se chamava "*sewage farms*" (fazendas de esgoto – tradução livre). Estas fazendas eram utilizadas com o objetivo de proteção da saúde pública e o controle de poluição, pois usavam o esgoto como fonte de nutrientes para a agricultura.

2.1.2. Vantagens do tratamento e reúso das águas cinza

O reúso das águas cinza não somente reduz o consumo de água potável, como também reduz o volume de água descartada na rede de esgoto. Langergraber e Muellergger (2005) consideram um dos grandes problemas dos tratamentos de esgoto a mistura de quantidades comparativamente pequenas de substâncias potencialmente prejudiciais com grandes quantidades de água.

Hespanhol (2008) considera que as águas cinza, adequadamente tratadas, apresentam certo potencial de reúso para fins não potáveis. E apresenta como principais vantagens do seu

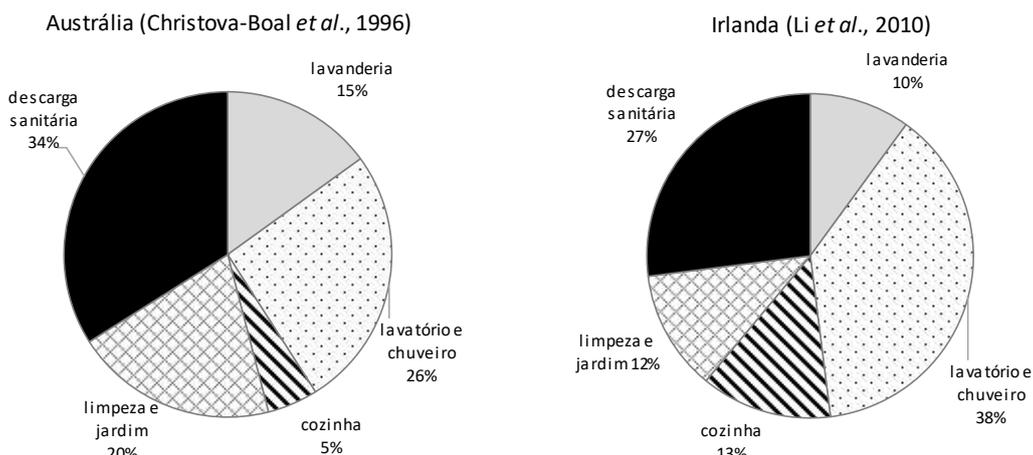
tratamento a pequena variação de vazão durante o ano, facilidade de coleta e menor concentração de carga orgânica e de organismos termotolerantes, exigindo, portanto, níveis de tratamento inferiores ao de esgotos sanitários.

Fiori *et al.* (2006) afirmam que embora o Brasil possua um dos maiores patrimônios hídricos do planeta, o reúso de águas cinza tem se tornado necessário. Indicam o uso de construções sustentáveis, com substituição de parte da água potável por uma de qualidade inferior para fins não nobres, reduzindo a demanda sobre os mananciais. Consideram ainda que cabe ao Estado institucionalizar, regulamentar e promover o reúso de água para que a prática use técnicas adequadas e seja economicamente viável.

2.1.3. Composição das águas cinza

Peprah *et al.* (2018) comentam que a composição das águas cinza é um reflexo do estilo de vida e do tipo e quantidade de produtos químicos usados em limpeza, banhos e lavagem de roupas. A qualidade da água potável e o tipo de distribuição também afetam as características das águas cinza. Também haverão importantes variações na composição das águas cinza dependentes da variação entre água consumida e água cinza gerada em cada atividade. Geralmente, as águas cinza contêm altas concentrações de matéria orgânica facilmente degradável. Isso inclui nutrientes como os nitratos e seus derivados, fósforo e seus derivados, e algumas podem incluir microrganismos como coliformes fecais, salmonella, dentre outros. Peprah *et al.* (2018) afirmam ainda que a composição de uma água cinza é, portanto, de difícil previsão, especialmente quando se considera que ela ainda pode eventualmente conter produtos farmacêuticos, aerossóis, tintas e metais pesados como chumbo, níquel, cádmio, cobre, mercúrio e cromo em quantidades consideráveis.

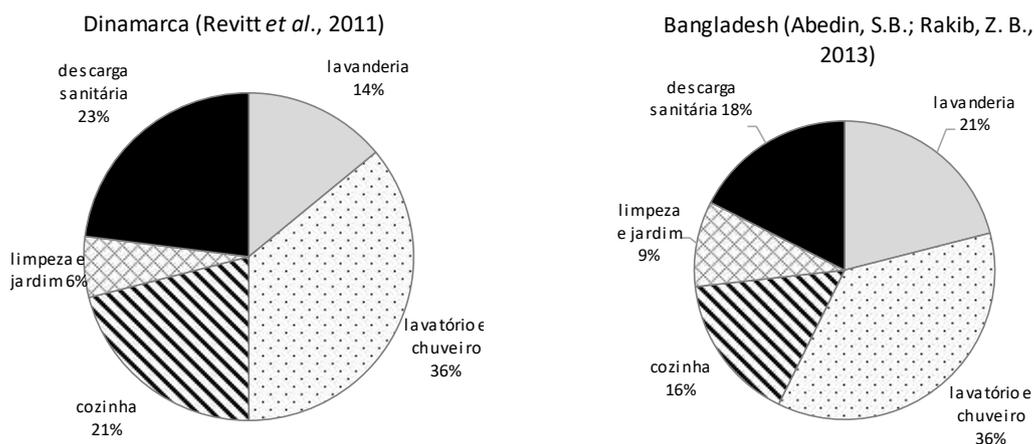
A Figura 2 mostra a composição média de esgoto doméstico gerados na Austrália, segundo pesquisa de Christova-Boal *et al.* (1996) e na Irlanda, segundo pesquisa de Li *et al.* (2010). Verifica-se nestas duas composições, que na Austrália a contribuição de água cinza seria de 66% do esgoto doméstico, enquanto na Irlanda seria de 73%.

Figura 2: Composição média do esgoto doméstico gerado na Austrália e na Irlanda.

Fonte: Própria autora (2019).

Quando se separa os aparelhos produtores de águas cinza, tem-se uma nova possibilidade de previsão de características, pois de acordo com Li *et al.* (2009), as águas cinza provenientes do chuveiro e banheira e da máquina de lavar roupas são deficientes em nitrogênio e fósforo, enquanto que as águas cinza provenientes da pia de cozinha contêm teores altos destes nutrientes.

Na Figura 3 apresentam-se as composições médias do esgoto doméstico gerado em um país subdesenvolvido (Bangladesh) e em um país desenvolvido (Dinamarca), de acordo com pesquisas de Abedin e Rakib (2013) e Revitt *et al.* (2011), respectivamente.

Figura 3: Composição média do esgoto doméstico gerado na Dinamarca e em Bangladesh.

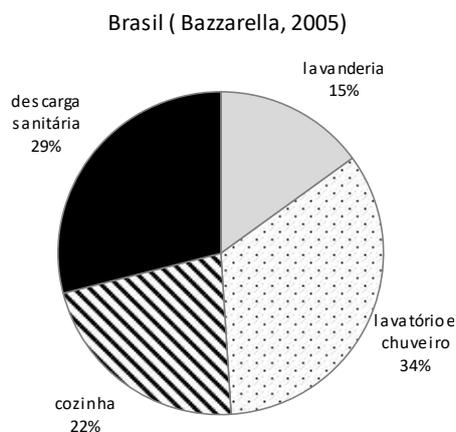
Fonte: Própria autora (2019).

Quanto à produção de AC, Edwin *et al.* (2014) observaram que o volume total de AC geradas a nível doméstico geralmente excedem o volume de demanda para descargas sanitárias e irrigação de jardins. E que a água cinza gerada na pia de cozinha é a que possui maior carga

de poluentes, e por isso é pouco recomendável o seu tratamento. Concluíram que as águas provenientes da máquina de lavar roupas e da pia e chuveiro dos banheiros, passíveis de tratamento, se reutilizadas, poderiam reduzir em 28,5% o consumo de água potável em uma residência normal na Índia.

Apresenta-se na Figura 4 a composição média de esgoto doméstico gerado no Brasil, conforme pesquisa de Bazzarella (2005), na qual 29% do esgoto doméstico seria composto de água negra e 71% seria composto de água cinza.

Figura 4: Composição média do esgoto doméstico gerado no Brasil.



Fonte: Pr6pria autora (2019).

Gonçaves (2006) afirma que de toda a água potável consumida, aproximadamente 40% é utilizada em fins não potáveis, sendo que Shouler *et al.* (1998 *apud* Lazarova *et al.*, 2003) salientam que em residências, aproximadamente 30% da água potável é utilizada em descargas sanitárias e esse percentual sobe a 60% quando trata-se de edificios comerciais.

Quanto às águas cinza geradas em lavanderias, Mohamed (2011) cita como principais características das águas provenientes das máquinas de lavar automáticas: alto potencial hidrogeniônico (pH), água mais quente, presença de alvejantes, nitrato, óleo e graxas, demanda de oxigênio, salinidade, sabões, sólidos suspensos e alta turbidez.

2.2. MÉTODOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZA

Entende-se por Sistema de Tratamento de Águas Residuárias o conjunto de processos usados para remover poluentes de forma a obter-se um efluente que atenda a condições de lançamento em um corpo d'água ou a condições de reúso.

A principal meta do tratamento de AC é a redução de compostos orgânicos de fácil degradação, evitando-se a formação de maus odores (RIDDERSTOLPE, 2004). Por isso, é necessário que o tratamento das AC seja feito imediatamente após o uso, pois o seu armazenamento antes de ser tratada pode ocasionar grande produção de ácido sulfídrico (H_2S) devido a sua alta concentração de matéria orgânica e sulfatos, e uma concentração de H_2S superior a 1 mg/L gera maus odores (BAZZARELLA, 2005).

Dependendo do nível de exposição humana a que a água cinza tratada será submetida, uma desinfecção adequada é necessária (TEODORO *et al.*, 2017). Conforme orientações de Austrália (2015), o uso de águas cinza tratadas sem desinfecção é recomendado somente para irrigação subsuperficial, sendo a desinfecção necessária para todos os demais usos.

O reúso de uma água cinza sem um pré-tratamento pode ter impactos negativos no solo, pode poluir o subsolo e as águas de superfície, ou ainda contribuir para a transmissão de doenças (SIDIBE, 2014).

De acordo com Lambe e Chougule (2009), os métodos de reúso de águas cinza variam de opções de baixo custo, como o simples reaproveitamento da água usada em uma banheira em lavagens no próprio local, a métodos de tratamento primário que grosseiramente separem óleos, graxas e sólidos da água cinza antes de uma irrigação, até tratamentos mais caros que tratem e desinfetem a água obtendo padrões mais elevados de qualidade.

2.2.1. Filtração

A filtração é o processo que remove partículas através da passagem da água por areia ou outro meio poroso. De acordo com a NBR 13969:1997 (ABNT, 1997), filtro de areia é um “tanque preenchido de areia e outros meios filtrantes, com fundo drenante e com esgoto em fluxo descendente, onde ocorre a remoção de poluentes, tanto por ação biológica quanto física”.

Os filtros de areia são utilizados em praticamente todos os sistemas de tratamento de água, pois são de simples operação, exigem pouca manutenção e por isso normalmente oferecem baixo custo de operação. O filtro de areia permite a adsorção de contaminantes do efluente, sendo que sua eficiência varia de acordo com a taxa de aplicação e a qualidade do efluente, a espessura e a granulometria das camadas filtrantes (ALLEN; SMITH; PALANIAPPAN, 2010).

A etapa de filtração é considerada uma etapa de tratamento primário, muito importante em caso de tratamento de águas cinza, devido a presença de sólidos grosseiros, mesmo que em dimensões reduzidas devido à presença de ralos e grelhas nas instalações hidrossanitárias (GONÇALVES, 2006).

Porém, conforme indicado por Li *et al.* (2009), o tratamento de águas cinza realizado com somente o processo físico de filtração não é suficiente para garantir uma adequada redução de matéria orgânica, nutrientes e surfactantes. O filtro de areia é portanto uma das etapas do processo, apesar de normalmente apresentar altas cargas de remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Tonetti *et al.* (2005) conseguiram uma remoção superior a 96% de DBO₅ e uma completa nitrificação em filtros de areia recebendo baixas cargas de efluente anaeróbio.

Di Bernardo (2003) chama a atenção para o fato de que a utilização de filtrações diretas descendentes em tratamento de água é fortemente limitada pela qualidade da água a ser tratada, sendo recomendada para águas naturais com baixos valores de cor, turbidez e concentração de algas.

2.2.2. Coagulação, floculação e sedimentação

Libânio (2010) define coagulação como a desestabilização das partículas coloidais e suspensas através de ações físicas e químicas entre estas partículas, a água e o coagulante, geralmente o Sulfato de Alumínio e o Cloreto Férrico, citados por Paula (2014) como os coagulantes mais utilizados em tratamento de água. Esta água coagulada tende a formar flocos através de uma leve agitação, e esse fenômeno é denominado floculação. Os flocos formados são pequenas partículas sólidas mais densas que a água, e tendem a se sedimentar, desde que a velocidade do fluxo não seja maior que a velocidade da sedimentação. Nestes processos, consegue-se uma clarificação da água, uma vez que mesmo partículas mais finas em suspensão conseguem sedimentar-se.

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) e o óxido de alumínio (Al_2O_3) são exemplos de coagulantes utilizados em tratamento de água. Campos e Di Bernardo (1975) consideram que o pH é um importante parâmetro a ser controlado no tratamento de água, pois o alumínio é um elemento anfótero (solubiliza-se tanto em soluções ácidas quanto em soluções básicas), mas não é solúvel em solução neutra.

De acordo com Driscoll (1987), quando o sulfato de alumínio é adicionado à água bruta para tratamento, ele pode tomar vários caminhos. Esses caminhos dependem de vários fatores:

concentração de alumínio no sal adicionado, tipos e concentração de materiais dissolvidos, temperatura e tipo e área superficial das partículas presentes. Mas qualquer dos caminhos tomados pelo alumínio resultam em formação e deposição de um precipitado.

2.2.3. Carvão Ativado

O carvão ativado é um adsorvente microporoso com uma área de adsorção muito grande, podendo chegar a $1500\text{m}^2/\text{g}$ em alguns casos, sendo considerado um dos materiais mais absorventes conhecido atualmente. O carvão ativado é produzido a partir de qualquer material orgânico com alto teor de carbono: madeira, turfa, cascas de côco (CIOFU, 2015).

Sidibe (2014) testou o uso de filtros de carvão ativado em águas cinza e conseguiu uma redução do nitrogênio, e considerou que essa remoção provavelmente se deu por adsorção na superfície do carvão ativado.

Casas (2004) afirma que existem dois tipos de carvão ativado: o Carvão Ativado Granular (CAG) e o Carvão Ativado Pulverizado (CAP). Dentre eles, o CAG é o mais usado como meio filtrante para remover os contaminantes da água.

Rapoport (2004) sugere que em tratamento de águas cinza, o uso de CAG seja realizado em uma sequência após um tratamento prévio (um filtro de areia por exemplo), para que não ocorra adsorção de materiais em excesso, obstruindo os poros, o que pode ocorrer caso a presença de sólidos em suspensão seja significativa.

Uma grande vantagem dos filtros de CAG é a sua reutilização. Os materiais previamente adsorvidos são passíveis de remoção das estruturas dos poros do carvão por diversos métodos, dentre eles a simples retrolavagem (SANTANA, 2013).

2.3. USOS DA ÁGUA – LEGISLAÇÃO PERTINENTE

Sant'ana (2017) afirma que a comercialização de sistemas de reúso de águas cinza em diversos usos não potáveis em edificações no Brasil iniciou-se no começo dos anos 2000. A cada ano mais edificações implementam estes sistemas prediais de água não potável e alguns estados e municípios instituíram legislação própria de indicação ou de regulação do reaproveitamento de águas cinza.

O princípio básico para a efetivação de um programa ou projeto de reúso de água é a segurança da saúde dos seus usuários. Existem dois tipos de legislação específica sobre o tema:

as que determinam os parâmetros de qualidade da água a ser reutilizada, e as que regulamentam a aplicação da prática de reúso.

2.3.1. Legislação sobre parâmetros de qualidade da água para uso potável e não potável

Independentemente da fonte (se do abastecimento público, de coleta de poços artesianos, ou provenientes de reúso), as águas a serem usadas para consumo humano devem obedecer critérios mínimos de potabilidade.

A seguir apresenta-se um breve histórico de publicações, alterações e revogações de Portarias e Decretos do Ministério da Saúde (MS), publicados entre os anos de 1977 a 2011, que tratam das características da água para consumo humano.

Em 1977, a Portaria 56 estabeleceu o primeiro padrão de potabilidade da água para consumo humano, pois definiu os limites máximos para suas diversas características físicas, químicas e biológicas. Em 1990, o MS publicou a Portaria 36, que trouxe novos parâmetros e restringiu alguns limites para as características da água potável. Já em 2000, o MS publicou a Portaria nº 1.469, estabelecendo limites qualitativos da água para consumo humano. Em função de alterações na estrutura do MS, ao ser instituída a Secretaria de Vigilância em Saúde (SVS), a Portaria 1.469:2000 foi revogada, e passou a vigorar a Portaria nº 518, a qual manteve inalterados os valores máximos de cada limite anteriormente determinados. A Portaria nº 518 foi revogada em 2011, estando em vigor atualmente o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5, a qual dispõe sobre os procedimentos e responsabilidades quanto ao controle e qualidade da água para o consumo humano (BRASIL, 2017). Em 2005, o CNRH publicou a Resolução nº 54 (BRASIL, 2005), que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, considerando reúsos para fins urbanos, agrícolas e florestais, ambientais, industriais e ainda para reúso na aquicultura.

A Agência Nacional de Águas (ANA), a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) e o Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (SINDUSCON-SP) definiram três classes de reúso de água e definiram para cada uma destas classes padrões de qualidade a serem seguidos, indicando parâmetros característicos: Coliformes fecais, pH, turbidez, odor e aparência, óleos e graxas, DBO₅, compostos orgânicos voláteis, nitrato, nitrogênio amoniacal, nitrito, fósforo total, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais, conforme Quadro 1 (ANA *et al.*, 2005).

Quadro 1: Padrões de qualidade de água por classe de uso não potável segundo ANA *et al.* (2005).

Parâmetros	Concentrações da Classe 1	Concentrações da Classe 2	Concentrações da Classe 3
Coliformes fecais	não detectáveis	≤ 1000 ufc/mL	≤ 200 ufc/100 mL
pH	entre 6,0 e 9,0	entre 6,0 e 9,0	entre 6,0 e 9,0
Turbidez (uT)	≤ 10	-	< 5
Odor e aparência	não desagradáveis	não desagradáveis	-
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1	≤ 1	-
DBO ₅ (mg/L)	≤ 10	≤ 30	< 20
Compostos orgânicos voláteis	Ausentes	Ausentes	-
Nitrato (mg/L)	< 10	-	-
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	≤ 20	-	-
Nitrito (mg/L)	≤ 1	-	-
Fósforo total (mg/L)	≤ 0,1	-	-
Sólido suspenso total (SST) (mg/L)	≤ 5	≤ 30	< 20
Sólido dissolvido total (SDT) (mg/L)	≤ 500	-	-
Classe 1	Descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais (chafarizes, espelhos de água); lavagem de veículos		
Classe 2	Lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira		
Classe 3	Irrigação de áreas verdes e rega de jardins		

Fonte: ANA *et al.* (2005).

A NBR 13969:1997 (anterior portanto à Resolução nº 54), que trata do projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementar e disposição de efluentes líquidos, não é específica para reúso de água, mas considera o aproveitamento de efluentes tratados como uma opção de destinação final. O item 5.6 desta norma trata especificamente do reúso local da água resultante do tratamento de esgoto tipicamente doméstico. Além disso, define classes de água de reúso (1 a 4), de acordo com parâmetros de qualidade para as características turbidez, Coliformes fecais, Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Oxigênio Dissolvido, pH e Cloro residual, conforme apresentado no Quadro 2 (ABNT, 1997).

Quadro 2: Padrões de qualidade de água por classe de uso não potável segundo a NBR 13969.

Classes de reúso		Turbidez (uT)	Coliforme fecal (NMP/100mL)	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	pH	Cloro residual (mg/L)
Classe 1	Lavagem de carros e outros usos com contato direto do usuário com a água	< 5	< 200	< 200	NE	6,0 a 8,0	0,5 a 1,5
Classe 2	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins	< 5	< 500	NE	NE	NE	> 0,5
Classe 3	Reúso nas descargas dos vasos sanitários	< 10	< 500	NE	NE	NE	NE
Classe 4	Reúso em pomares, cereais, forragens, pastagens para gado	NE	< 5000	NE	> 2,0	NE	NE

NE - não especificado

Fonte: adaptado de NBR 13969:1997 (ABNT, 1997).

Segundo a NBR 5626 (ABNT, 1998), as tubulações de água potável devem ser separadas da rede de água não potável. As tubulações, reservatórios e pontos de usos devem ser identificados por meio de símbolos ou cores, advertindo os usuários com o texto “ÁGUA NÃO POTÁVEL”. Em pontos de uso de água não potável recomenda-se o uso de uma ilustração de água imprópria para consumo.

2.3.2. Regulamentações internacionais da prática de reúso

2.3.2.1. Canadá

A *Health Canada* (2010) editou as Recomendações para reúso de água doméstica para uso em descargas sanitárias, considerando para esse uso os parâmetros definidos no Quadro 3, estabelecendo limites máximos para teores de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅ em mg/L), Sólidos Suspensos (SS em mg/L), Turbidez (NTU), Coliformes termotolerantes (CT em ufc/100 mL), *Escherichia coli* (*E. coli* em ufc/100 mL) e Cloro residual (mg/L).

Quadro 3: Recomendações canadenses para uso de águas cinza em descargas sanitárias.

Parâmetro	Unidade	Média	Máxima
DBO ₅	(mg/L)	≤ 10	≤ 20
Sólidos Suspensos	(mg/L)	≤ 10	≤ 20
Turbidez	(NTU)	≤ 2	≤ 5
Coliformes termotolerantes	(ufc/100 mL)	não detectado	≤ 200
<i>E. coli</i>	(ufc/100 mL)	não detectado	≤ 200
Cloro residual	(mg/L)	≥ 0,5	≥ 0,5

Fonte: *Health Canada* (2010).

2.3.2.2. Estados Unidos da América

Segundo a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), cerca de 30 dos 50 estados americanos possuem regulação própria para o reúso de águas cinza. Não existe, portanto, uma regulação nacional, sendo responsabilidade dos estados americanos a regulamentação do reúso da água. No Quadro 4 apresentam-se algumas indicações de parâmetros exigidos para o uso doméstico e urbano de água cinza reciclada em alguns estados americanos (USEPA, 2012).

Quadro 4: Parâmetros de qualidade indicados pela USEPA para reúso de águas cinza tratadas.

Estado	DBO ₅ (mg/L)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Turbidez (NTU)	<i>E. coli</i> (ufc/100 mL)
Arizona	sem limites	sem limites	< 2	0 (média mensal) < 23 (máximo diário)
Califórnia	sem limites	sem limites	< 2 (média) < 10 (máx)	< 2,2 (média mensal) < 23 (máximo diário)
Flórida	< 20 (média anual) < 30 (média mensal) < 45 (média semanal)	< 5	< 2,5	0 (75% das amostras) < 25 (máximo)
Hawai	< 30 ou < 60, dependendo do design do descarte	< 30 ou < 60, dependendo do design do descarte	< 2	< 2,2 (média da semana) Somente uma amostra em 30 dias pode exceder 23
Nevada	< 30 (média mensal)	< 30 (média mensal)	sem limites	< 2,2 (média mensal) < 23 (maxima diária)
New Jersey	sem limites	< 5	< 2	< 2,2 (média semanal) < 14 (maxima diária)
North Carolina	< 10 (média mensal) < 15 (máxima diária)	< 5 (média mensal) < 10 (máxima diária)	< 10	< 14 (média semanal) < 25 (maxima diária)
Texas	< 5	sem limites	< 3	< 20 (média mensal) < 75 (maxima diária)
Virgínia	< 10	sem limites	< 2	< 11 (média mensal)
Washington	< 30	< 30	< 2 (média mensal) < 5 (máxima diária)	< 2,2 (média semanal) < 23 (maxima diária)

Fonte: Extraído e adaptado de USEPA (2012).

O Quadro 4 mostra que alguns parâmetros em alguns dos estados não têm seus parâmetros limitados, como é o caso da DBO₅ nos estados do Arizona, Califórnia e New Jersey, o teor de Sólidos Suspensos no Arizona, Califórnia, Texas e Virgínia e a turbidez no estado de Nevada.

Em geral, a água para reutilização não potável não requer o mesmo nível de tratamento que a reutilização potável. USEPA (2012) sugere determinados usos de água cinza reciclada de acordo com o tratamento a que ela tiver sido submetida (Quadro 5).

Quadro 5: Sugestões da USEPA para uso de água cinza tratada de acordo com o tratamento a que foi submetida.

	Tipos de tratamento		
	Tratamento primário	Tratamento secundário	Tratamento terciário
Processos de cada tipo de tratamento	Sedimentação	Oxidação biológica e desinfecção	Coagulação química, filtração e desinfecção
Usos recomendáveis da água cinza tratada	Uso não recomendável	Irrigações (excetuando hortaliças, recargas de aquíferos não potáveis, determinados processos industriais, ...)	Irrigações, descargas sanitárias, lavagem de veículos,...

Fonte: Adaptado de USEPA (2012).

2.3.2.3. Austrália

De acordo com Anderson (2001 *apud* Gonçalves, 2006), o governo australiano prevê quatro graus de qualidade para água reciclada em termos microbiológicos. Dependendo da intensidade de contato da água reciclada do usuário, ficam definidas as densidades médias permitidas para o número de Coliformes Termotolerantes (CT), conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6: Densidade média de CT em função do grau de contato da água reciclada com o usuário.

Nível de contato do usuário com a água reciclada	Alto	Médio	Baixo	Acesso restrito
Contagem de coliformes termotolerantes (CT) (ufc/100mL)	< 10	< 100	<1.000	<10.000

Fonte: extraído e adaptado de Anderson (2001 *apud* Gonçalves, 2006).

Austrália (2015) considera que apesar do conceito geral de que águas cinza não contém patógenos, se essa possibilidade for negligenciada, pode representar risco à saúde humana e ao meio ambiente. Salienta que a água cinza bruta e a tratada contém sais, especialmente o sódio de detergentes, o que pode ter um efeito nocivo ao solo, se depositado nele sem tratamento. Considera também que a água cinza proveniente da cozinha contém óleos e gorduras, e, portanto, podem ser impróprias para o uso em jardins por reduzir a captação de oxigênio pelas plantas. Afirma ainda que aproximadamente 42% das águas cinza são provenientes das máquinas de lavar roupa, e que a qualidade dessas águas de lavanderia varia por etapa da lavagem. E salientam que águas provenientes da lavagem de roupas podem conter matéria fecal, óleos, graxas, tensoativos e nutrientes provenientes dos produtos de limpeza.

O Código de Práticas de Reúso de Águas Cinza da EPA Victoria na Austrália considera alguns padrões para os Sistemas de Tratamento de Águas Cinza (STAC) com desinfecção e sem desinfecção (Quadro 7).

Quadro 7: Padrão de qualidade pós-tratamento de AC definido pela EPA Victoria.

Método de tratamento	Padrão	DBO (mg/L)	Sólidos Suspensos (mg/L)	E. coli (ufc/100 mL)
STAC sem desinfecção	(20/30)	< 20	< 30	-
STAC com desinfecção	(20/30/10)	< 20	< 30	< 10
STAC com tratamento secundário avançado e desinfecção	(10/10/10)	< 10	< 10	< 1

Fonte: extraído e adaptado de EPA VICTORIA (2016).

Os usos possíveis da água cinza doméstica na Austrália são definidos a partir do padrão alcançado no tratamento (Quadro 8), onde considera-se irrigação de superfície a aplicação no nível do terreno, com uso de mangueiras ou aspersores e a irrigação subterrânea seria a aplicada em profundidades entre 10 e 30 cm.

Quadro 8: Usos aprovados pela EPA Victoria para águas cinza em instalações domésticas.

Método de tratamento	Padrão	Irrigação de superfície	Irrigação subterrânea	Descarga sanitária	Máquina de lavar
reúso imediato	-	n/a	n/a	sim	sim
dispositivo de desvio	-	sim	não	não	não
STAC sem desinfecção	(20/30)	sim	não	não	não
STAC com desinfecção	(20/30/10)	sim	sim	não	não
STAC com tratamento secundário avançado e desinfecção	(10/10/10)	sim	sim	sim	sim

Fonte: extraído e adaptado de EPA VICTORIA (2016).

2.3.2.4. Espanha

A Regulação Espanhola de Águas de Reúso foi instituída pelo Decreto 1.620 de 07 de dezembro de 2007 (ASERSA, 2011) e nela estão previstos os critérios mínimos de qualidade da água de reúso de acordo com o uso que se pretende fazer dela (Quadro 9). Dividem os reúsos possíveis nas categorias: uso urbano, uso na agricultura, usos industriais, usos recreacionais e usos ambientais, e estipulam parâmetros máximos para teores de *E. coli* (em ufc/100mL), Sólidos Suspensos (em mg/L) e Turbidez (em NTU), sendo que esta última para alguns dos usos não apresenta limites máximos estipulados.

Quadro 9: Critérios de qualidade da água de reúso definidos pela ASERSA.

Uso	Exemplos de uso da água de reúso	<i>E. coli</i> (ufc/100 mL)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Turbidez (NTU)
Uso urbano	Irrigação de jardins privados; descargas sanitárias	< 0	< 10	< 2
Uso na agricultura	Irrigação de áreas urbanas; Combate a incêndio; lavagem de ruas e lavagem industrial de veículos	< 200	< 20	< 10
	Irrigação de hortaliças (culturas que serão consumidas cruas)	< 100	< 20	< 10
	Irrigação de culturas que serão processadas industrialmente; irrigação de pastos de criação de animais	< 1000	< 35	sem limites
	Irrigação de flores ornamentais e de árvores frutíferas em que a água não terá contato direto com os frutos	< 10000	< 35	sem limites
Usos industriais	Usos industriais excetuando-se processamento de alimentos	< 10000	< 35	< 15
Usos recreacionais	Lagos ornamentais em que o acesso público é proibido	< 10000	< 35	sem limites
Usos ambientais	Recarga de aquíferos pela percolação de água no solo	< 1000	< 35	sem limites
	Irrigação de áreas verdes sem acesso ao público, silvicultura	sem limites	< 35	sem limites

Fonte: extraído e adaptado de ASERSA (2011).

2.3.3. Legislações estaduais e municipais sobre reúso de água

Citam-se a seguir algumas leis e programas municipais e estaduais no Brasil que versam sobre o reúso da água cinza em edificações e espaços públicos ou privados.

A Prefeitura Municipal de Curitiba-PR criou o Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações (PURA) e define como Águas Servidas, as “águas utilizadas no tanque ou máquina de lavar e no chuveiro ou banheira” (CURITIBA, 2003). E no seu Art. 8º dispõe que “as águas servidas serão redirecionadas, através de encanamento próprio, a reservatório destinado a abastecer as descargas dos vasos sanitários e, apenas após tal utilização, será descarregada na rede pública de esgotos”.

A Prefeitura Municipal de Maringá-PR (MARINGÁ, 2003) instituiu o Programa de reaproveitamento de águas de Maringá a partir da promulgação da Lei nº 6345 em 2003, onde os munícipes foram incentivados a “instalar reservatórios para a contenção de águas servidas na base de chuveiros, banheiras, lavatórios e em outros locais julgados convenientes, bem como para o recolhimento de águas das chuvas, e também dispositivos para a utilização dessas águas na descarga de vasos sanitários e mictórios e lavagem de pisos, terraços e outros procedimentos similares”. Porém, essa lei não prevê controle da qualidade da água que está sendo armazenada.

O Estado do Espírito Santo instituiu a Lei nº 9.439/2010 (ESPÍRITO SANTO, 2010), que dispõe sobre a obrigatoriedade dos postos de combustíveis, lava-jatos, transportadoras, empresas de ônibus e locadoras de veículos a instalarem equipamentos de tratamento e reutilização da água usada na lavagem de veículos.

O Governo do Distrito Federal (DF) possui um convênio entre a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA) e a Universidade de Brasília (UnB), o projeto de pesquisa Reúso-DF, o qual busca verificar a viabilidade de sistemas prediais voltados ao aproveitamento de águas pluviais e reúso de águas cinza nas diferentes tipologias edilícias do DF. A ideia é que os resultados desta pesquisa sirvam de respaldo para a regulamentação e a normatização da prática (SANT’ANA, 2017). A Lei n. 5.890, de 12 de junho de 2017, do Governo do DF, estabelece diretrizes para políticas públicas de uso de água não potável em edificações não industriais do DF. Esta lei define reúso de água como o uso de água não potável, e indica o reúso em: irrigação paisagística, uso ornamental em espelhos d’água e chafarizes, sistemas de combate a incêndio, descargas sanitárias, lavagem de pisos, fachadas, veículos e roupas, resfriamento de equipamentos e em ar condicionado central. E

considera que as diretrizes, critérios e parâmetros de qualidade desta água de reúso devem ser construídas e definidas pelo órgão regulador de água e saneamento. (SINJ-DF, 2017).

A Prefeitura Municipal de Niterói-RJ (NITERÓI, 2011) estendeu em 2011 as obrigações da Lei nº 2856, de 2009, instituindo mecanismos de estímulo à instalação de sistema de coleta e reutilização de águas servidas em edificações públicas e privadas. Esta lei obrigou as obras a partir daquela data que tivessem consumo de volume igual ou superior a 20 m³ de água por dia, a instalarem sistemas de tratamentos próprios das águas cinza utilizadas em chuveiros, banheiras, lavatórios, tanques e máquinas de lavar. Indicou os parâmetros a serem atingidos pela água cinza, conforme Quadro 10.

Quadro 10: Parâmetros exigidos para água cinza tratada em Niterói-RJ.

Turbidez	pH	Cloro residual	Coliformes totais	Coliformes termotolerantes	Sólidos dissolvidos totais	Oxigênio dissolvido (OD)
inferior a 5 uT	entre 6 e 9	entre 0,5 mg/L e 2 mg/L	ausência em 100 mL	ausência em 100 mL	inferior a 200 mg/L	acima de 2 mg/L

Fonte: Lei nº 2856 (NITEROI, 2011).

2.3.4. Águas subterrâneas

As águas subterrâneas são consideradas parte integrante e indissociável do ciclo hidrológico. De toda a água doce disponível para uso no planeta, 98,5% estão armazenadas em aquíferos, conforme Reis *et al.* (2019), o qual afirma também que “a água subterrânea situa-se no coração da crise hídrica global e futura”.

Segundo a *World Water Assessment Programme* (WWAP), as águas subterrâneas são fonte de praticamente metade de toda a água potável distribuída no mundo (WWAP, 2015). Os aquíferos precisam, portanto, de uma gestão adequada para garantir que a água retirada seja recarregada e preservada como fonte para as gerações futuras (SOLDERA, 2017).

Abedin & Rakib (2013) chamam atenção para o fato de na cidade de Dhaka City, em Bangladesh, o nível d’água no subsolo apresentar rebaixamento médio anual de 66 cm, por terem a demanda superior à recarga do aquífero.

No estado do Tocantins, o Instituto Natureza do Tocantins (Naturatins), a partir da Instrução Normativa (IN) 003/2019, publicada no Diário Oficial do Estado (DOE) no dia 03/07/2019, regulamentou a emissão de anuência prévia para perfuração de poços e a Declaração de Uso Insignificante (DUI) da água de uma forma menos burocratizada. Para

emissão da DUI, o volume de água a ser utilizado diariamente deverá ser igual ou menor a 21,6m³, e essa emissão passa a ser on-line e com caráter autodeclaratório. Com a anuência prévia, o usuário pode fazer uso da água para diversas finalidades, tais como: uso doméstico em chácaras, sítios ou fazendas, abastecimento de piscinas, uso em jardins, pequenas indústrias, lavajatos... (TOCANTINS, 2019).

2.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS CINZA

Ao se pensar no possível aproveitamento de águas cinza é necessário o cuidado com a qualidade desta água, visando a saúde e o bem-estar dos usuários. Os compostos orgânicos e inorgânicos presentes nos afluentes de sistemas de tratamento de águas cinza podem representar risco à saúde de acordo com a concentração que apresentarem de determinados parâmetros. Por isso, a importância da caracterização físico-química e microbiológica das águas cinza tratadas, para que suas características sejam (ou não) enquadradas em determinado uso. As propriedades físico-químicas que caracterizam uma água cinza são: temperatura, pH, Alcalinidade, Turbidez, Condutividade elétrica, Cloretos, Cloro residual, Sólidos Totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis, Sólidos Sedimentáveis, DQO e Amônia. Os parâmetros microbiológicos importantes de serem caracterizados são: coliformes totais e *E. coli*. A seguir, apresentam-se breves comentários sobre cada um desses parâmetros.

2.4.1. Temperatura

De acordo com Richter e Azevedo Netto (2003), a temperatura da água é importante por sua influência na velocidade de reações químicas, porque reduz a solubilidade dos gases e porque acentua a sensação de sabor e odor. Altas temperaturas em águas cinza podem favorecer o crescimento de micro-organismos (BAZZARELLA, 2005).

2.4.2. pH

O potencial hidrogeniônico (pH) representa a concentração de íons hidrogênio em uma solução. O valor do pH varia entre 0 e 14, sendo o valor 7 o do pH neutro; com valores de pH abaixo de 7, a água é considerada ácida; e acima de 7, a água é considerada alcalina. Na água, esse índice é de fundamental importância, principalmente nos processos de tratamento, onde o

seu valor precisa ser constantemente ajustado para melhorar o processo de coagulação e floculação da água, e também para o controle da desinfecção (BRASIL, 2013).

Gonçalves (2006) afirma que a água cinza geralmente apresenta pH próximo da neutralidade, tal como esgotos sanitários típicos. Mas o sabão em pó e o amaciante utilizados em lavanderias e em máquinas de lavar contribuem para o aumento do pH das águas cinza geradas nessas atividades. Ferreira (2013) verificou em água cinza de lavanderia o pH 7,31.

2.4.3. Alcalinidade

A alcalinidade é a quantidade de íons na água que reagirão para neutralizar os íons de hidrogênio, conforme definição dada por Von Sperling (2015). É, portanto, uma medida da capacidade da água de neutralizar os ácidos (capacidade tampão).

A alcalinidade total de uma água é dada pela soma das diferentes formas de alcalinidade existentes; é a soma das concentrações de hidróxidos (OH^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-), expressas em termos de carbonato de cálcio. Durante o processo de tratamento de água, a medida da alcalinidade é fundamental, pois a dosagem dos produtos químicos a ser utilizados no tratamento depende desse teor. A alcalinidade está relacionada com a coagulação, redução de dureza e prevenção da corrosão em tubulações (VON SPERLING, 2005).

2.4.4. Turbidez

A turbidez da água é a característica que reduz sua transparência, e é devida a presença de materiais sólidos em suspensão, os quais provocam a dispersão da luz, dando a ela uma aparência nebulosa e esteticamente indesejável. As partículas que causam a turbidez variam de suspensões grosseiras a colóides. A turbidez é determinada com o uso do Nefelômetro, e sua unidade é a unidade de Turbidez (uT) ou Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU). Von Sperling (2005) afirma que numa água com turbidez igual a 10 uT, nota-se ligeira nebulosidade enquanto com uma turbidez igual a 500 uT, a água apresenta-se praticamente opaca. A desinfecção de uma água é tanto mais eficaz quanto menor for a sua turbidez (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

2.4.5. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica indica a quantidade de sais dissolvidos na água e é aproximadamente proporcional à sua quantidade. Este índice está relacionado ao conteúdo de sólidos de uma amostra (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

2.4.6. Cloretos

Os cloretos nas águas cinza são advindos da dissolução de sais. Em águas cinza provenientes da pia da cozinha esse parâmetro normalmente é elevado pela presença do cloreto de sódio. Normalmente as águas cinza de lavanderia não apresentam alto teor de cloretos. Sua concentração é expressa em mg/L e podem estar presentes nas águas em forma de cloretos de sódio, de cálcio e de magnésio. Métodos convencionais de tratamento de água não removem cloretos (BRASIL, 2013).

2.4.7. Cloro residual

O cloro é um produto químico utilizado na desinfecção da água. De acordo com a NBR 12216:1992 (ABNT, 1992), deve-se manter em toda a extensão do sistema de distribuição de água potável, um teor de no mínimo 0,2 mg/L de cloro residual, sendo que o teor máximo de cloro residual livre em qualquer ponto deve ser 2 mg/L.

2.4.8. Sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis e sólidos sedimentáveis

Conforme Von Sperling (2005), todos os contaminantes da água, com exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a carga de sólidos. Toda matéria que permanece como resíduo após evaporação à temperatura de 103°C a 105°C é considerada como sólidos totais (RAPOPORT, 2004).

Os dados de sólidos presentes nas águas cinza têm sua importância para a verificação da eficiência dos sistemas de tratamento das águas residuárias. Uma quantidade excessiva de qualquer tipo de sólidos contribui negativamente para diversos parâmetros de qualidade da água, especialmente a turbidez e parâmetros microbiológicos.

2.4.9. Demanda Química de Oxigênio – DQO

A matéria orgânica presente nos esgotos é uma característica de primordial importância, de acordo com Von Sperling (2005). É a matéria orgânica a causadora do principal problema de poluição das águas: o consumo do oxigênio dissolvido pelos microrganismos que utilizam e estabilizam esta matéria orgânica. Os principais componentes orgânicos são os compostos de proteína, os carboidratos, a gordura e os óleos, a ureia, os surfactantes, fenóis, pesticidas, dentre outros. A medida da Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um método indireto para quantificação da matéria orgânica ou do seu potencial poluidor, pois mede o consumo de oxigênio ocorrido durante a oxidação química da matéria orgânica, obtida através de um forte oxidante (dicromato de potássio) em meio ácido.

Dentre as principais vantagens do uso do teste de DQO, Von Sperling (2005) cita:

- Apenas 2 a 3 horas são gastas na realização do teste;
- O resultado dá uma indicação do oxigênio requerido para a estabilização orgânica;
- O teste não é afetado pela nitrificação, dando uma indicação da oxidação apenas da matéria orgânica carbonácea (e não da nitrogenada).

Gonçalves (2006) afirma que mesmo não possuindo contribuição dos vasos sanitários, o conteúdo de matéria orgânica na água cinza é bastante significativo, sendo que em casos específicos, a concentração de DQO na AC pode até superar as concentrações características de esgotos sanitários concentrados.

2.4.10. Amônia

Dentro do ciclo do nitrogênio na biosfera, esse elemento aparece em diversas formas e estados de oxidação. A amônia é uma dessas formas, e ocorre predominantemente nos esgotos brutos. Para converter a amônia em nitrito e esse a nitrato, há consumo do oxigênio dissolvido no meio. O nitrogênio na forma de amônia livre é diretamente tóxico a espécies aquáticas. Trata-se, portanto, de um dos importantes padrões de qualidade de efluentes (VON SPERLING, 2005).

2.4.11. Coliformes totais e *E. coli*

Coliformes totais são descritos em Austrália (2015) como bactérias do grupo coliforme, bacilos gram-negativos, aeróbios ou anaeróbios facultativos, que servem como indicadoras de contaminação fecal. A *Escherichia coli* é uma bactéria do grupo coliforme, e é considerado o mais específico indicador de contaminação fecal recente e de eventual presença de organismos patogênicos. São determinados pelo Método dos Tubos Múltiplos. Os resultados são expressos em ufc/100 mL de amostra.

Em geral, o número de *E. coli* nas águas cinza é baixo, a menos que ela tenha sido gerada pela lavagem de fraldas ou roupas contaminadas com fezes ou vômitos. Mas é um parâmetro de importante controle, pois se uma água cinza for estocada ela pode tornar-se séptica, exalando maus odores e tornando-se um local apropriado a proliferação de microrganismos. Coliformes termotolerantes podem multiplicar entre 10 a 100 vezes durante as primeiras 24 a 48 horas de estocagem. Por isso, o armazenamento de águas cinza sem tratamento não deve ser superior a 24 horas (AUSTRALIA, 2015).

Birks *et al.* (2007) salientam que apesar do conceito geral de que as águas cinza são mais “aceitáveis” que as águas residuárias sanitárias por conterem um nível mais baixo de contaminação, elas possuem significantes índices microbiológicos, os quais devem ser caracterizados para que sejam avaliados os riscos potenciais de contaminação e a viabilidade econômica do tratamento necessário de acordo com o reúso indicado.

2.5. EXPERIÊNCIAS EM TRATAMENTOS DE ÁGUAS CINZA

2.5.1. Tratamento de águas cinza de lavanderias

Apresenta-se a seguir descrições sucintas de resultados obtidos em pesquisas de eficiência de tratamento de águas cinza oriundas de lavanderias.

Sostar-Turk *et al.* (2005) descrevem os resultados obtidos em tratamento de águas cinza provenientes de lavanderias usando os métodos convencionais de coagulação, filtro de areia e adição de carbono ativado. Com este processo conseguiram reduzir a DQO de 280 mg/L para 20 mg/L, a DBO₅ de 195 mg/L para 35 mg/L e os Sólidos Suspensos Totais (SST) de 10 mg/L para menos de 5 mg/L. Com somente a etapa de coagulação conseguiram a remoção de 51% da DBO₅ e 100% dos SS também foram removidos nesta etapa.

Rampelotto (2014) avaliou em laboratório o potencial de tratamento de águas cinza oriundas da máquina de lavar roupas e a possibilidade de reuso dessas águas para fins não potáveis em residências populares. Usou processo químico de tratamento através de coagulação, floculação, flutuação e flotação, filtração em meio granular e pós-tratamento por adsorção em carvão ativado. Caracterizou inicialmente as águas cinza coletadas do efluente da máquina de lavar em uma residência multifamiliar; determinou pelo teste de jarros (“Jar-Test”) as melhores condições de concentração do coagulante e definiu o melhor material granular após passar o material em vários meios granulares. Obteve bons resultados, conseguindo reduções dos índices de turbidez de 36,6 NTU para 0,04 NTU; cor aparente, de 276 uC para 20 uC; DQO de 228 mg/L para 34 mg/L e surfactantes de 1,09 mg/L para 0,20 mg/L.

Baracuhy *et al.* (2015) avaliou a eficiência da remoção de coliformes totais e fecais do efluente tratado em unidades de produção agrícola através de fitorremediação, usando águas cinza provenientes de uma lavanderia pública de Cabaceiras-PB. No tratamento sem fitorremediação os coliformes totais variaram de $1,583 \times 10^3$ a $2,022 \times 10^3$ ufc/100 mL. Com o tratamento com fitorremediação usando capim roxo, os coliformes totais variaram de $1,354 \times 10^3$ a $2,022 \times 10^3$ ufc/100 mL e conseguiu-se uma redução significativa em *E. coli*.

2.5.2. Tratamento de águas cinza diversas

Neste item, apresentam-se descrições sucintas de pesquisas de eficiência de tratamento de águas cinza em geral e não somente as oriundas de lavanderias, objeto desse trabalho.

Paula e Fernandes (2018) otimizaram o tratamento de água cinza proveniente de lavatório e chuveiro de uma residência unifamiliar através da associação dos coagulantes químicos sulfato de alumínio e cloreto férrico, preparados em solução de 5%. Otimizaram as concentrações dos coagulantes com testes em laboratório e avaliaram a eficiência do tratamento proposto. Definiram como dosagem ideal o sulfato de alumínio a 0,470 g/L e o cloreto férrico a 0,115 g/L. Atingiram uma remoção de turbidez da água cinza de até 94%, redução de coliformes termotolerantes e do cloro residual, atingindo para esses índices valores que possibilitam o reuso em descargas de bacias sanitárias e em irrigação. Alguns parâmetros, por exemplo o pH, não atenderam a valores estabelecidos, por isso a indicação de uso não foi mais abrangente.

Almeida *et al.* (2013) propuseram o tratamento de água cinza composta por água de torneira, sabão em pó e óleo de cozinha (caracterizada como água de lavagem de roupas e de

louças). O tratamento proposto foi a floculação com sulfato de alumínio a 1% e a 2%, sulfato ferroso a 2% e tripolifosfato de alumínio a 2%. Conseguiram bons resultados com o uso do sulfato de alumínio a 1% e 2%, obtendo redução de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), poucas alterações de pH e Oxigênio Dissolvido (OD) próximos aos valores de água potável.

Santana (2013) desenvolveu um sistema de filtragem para tratamento de águas cinza provenientes de uma residência rural visando o seu reaproveitamento. Usou filtros de serragem de madeira (FSM) de 40, 60 e 80 cm de espessura e filtros com carvão ativado (FCA) com espessuras de 10, 20 e 30 cm, e testou também a combinação dos FSM com os FCA. Os FSM apresentaram bom desempenho na remoção de sólidos e turbidez e os FCA foram essenciais na remoção de DQO, DBO₅, surfactantes e *E. coli*. Obteve o melhor desempenho no tratamento do conjunto FSM 80 com o FCA 30, porém não conseguiu atender a todos os critérios de reúso exigidos pelos órgãos regulamentadores.

May (2009) fez o monitoramento de um sistema de tratamento de águas cinza com uso de tratamento biológico aeróbio e obteve reduções bastante significativas em muitos dos parâmetros estudados: cor aparente – 95,1%, turbidez – 98,2%, SST – 94,1%, DBO₅ – 93,4%, DQO – 86,3%, Coliformes totais – 97,8% e coliformes termotolerantes – 99,8%. Manteve em todos os ensaios um residual mínimo e máximo de cloro de 0,6 a 1,2 mg/L. Considerou com estes resultados que o uso da água cinza tratada deve ser estimulado para fins não potáveis.

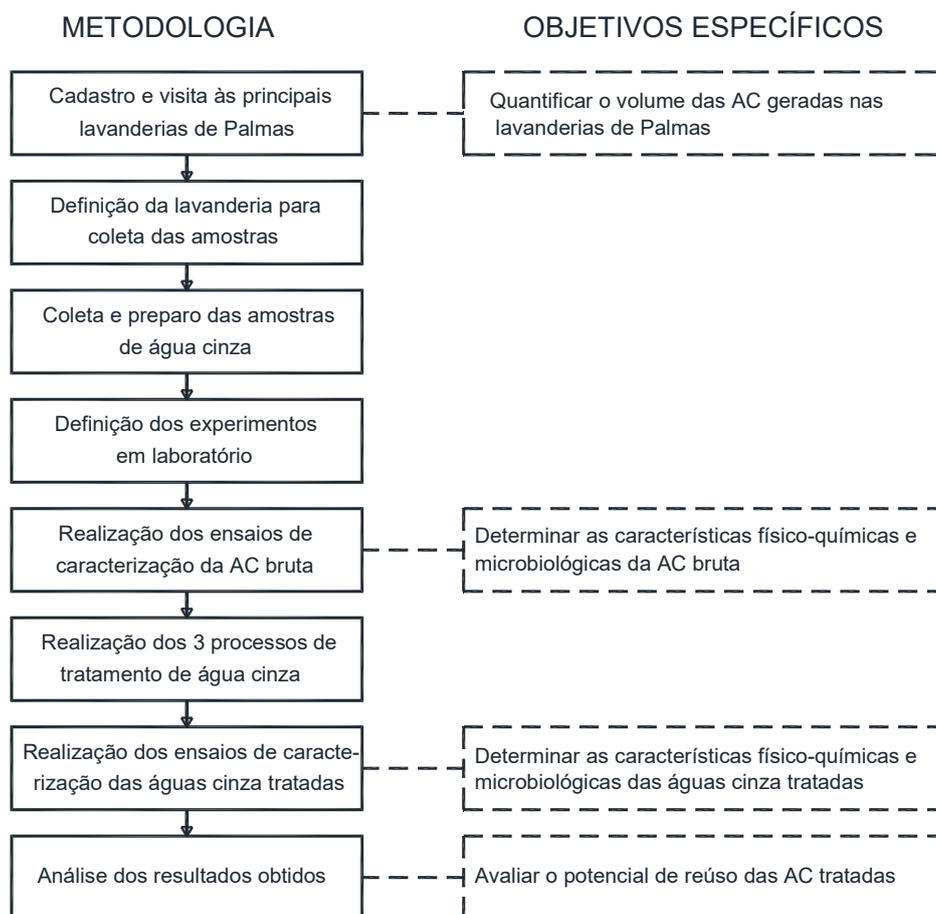
Bazzarella (2005) monitorou um sistema de reúso implantado em um prédio da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). O prédio conta com uma Estação de Tratamento de Águas cinza (ETAC), cujo processo é baseado na associação de um reator anaeróbio compartimentado (RAC), de um filtro biológico aerado submerso (FBAS), de um filtro terciário (FT) e de desinfecção à base de cloro. A ETAC foi dimensionada para atender somente a águas cinza provenientes dos lavatórios e chuveiros dos banheiros dos alunos. Mas para a pesquisa, fez-se coleta de águas cinza de cozinha e de máquina de lavar roupa e foram adicionadas às produzidas no local em proporção aproximada de composição de águas cinza normais em edificações. Confirmou elevada eficiência na remoção de turbidez, cor, DBO₅, DQO e *E. coli* e características compatíveis com os padrões exigidos para uso não-potável.

3. METODOLOGIA

3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa consistiu na realização de etapas conforme descrito na Figura 5, cujas conclusões sucessivas implicaram no cumprimento dos objetivos específicos propostos. A primeira etapa consistiu no cadastro e visita às principais lavanderias de Palmas, quando foi realizada a quantificação do consumo de água nessas lavanderias, obtendo-se uma estimativa de águas cinza geradas nessa atividade. Em seguida foi coletada em uma lavanderia a amostra estudada em laboratório. Essa amostra foi submetida a ensaios de caracterização dos parâmetros físico-químicos e biológicos, e posteriormente submetida a três tipos de tratamento para águas cinza. Com os resultados obtidos, avaliou-se o potencial de tratamento das águas cinza de cada um dos métodos testados e fez-se o enquadramento das características obtidas a indicações de usos de águas cinza conforme legislação ambiental.

Figura 5: Fluxograma do procedimento metodológico.



Fonte: Própria autora (2019).

3.2. CADASTRO E VISITA ÀS PRINCIPAIS LAVANDEIRAS DE PALMAS

Inicialmente foi realizado um cadastro das lavanderias comerciais e industriais de Palmas, conforme informações levantadas na Associação Comercial e Industrial de Palmas (ACIPA). Posteriormente, propôs-se um roteiro (Figura 6) a partir deste levantamento e preparou-se um material para nortear a obtenção de dados durante a realização das visitas.

Figura 6: Material orientativo para visitas às lavanderias.

CADASTRO DE VISITAS A LAVANDEIRAS EM PALMAS				
LAVANDERIA:		ENDEREÇO:		TELEFONE:
RESPONSÁVEL PELAS INFORMAÇÕES:			CARGO/FUNÇÃO:	TELEFONE
USO DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTO				
Forma de abastecimento de água		É feito algum aproveitamento da água utilizada?		Existe interesse em fazer o aproveitamento da AC?
Forma de coleta de esgoto		Consumo mensal de água		
Observações sobre as instalações hidrossanitárias da lavanderia				
CAPACIDADE INSTALADA DA LAVANDERIA				
Quantidade de máquinas	Capacidade da máquina (em kg de roupas)	Ciclo da máquina (minutos)	Turno de trabalho (horas)	Observação
CATEGORIAS DAS ROUPAS LAVADAS NA LAVANDERIA				
Categoria	Percentual	Observações		
Doméstico				
Hospitalar				
Comercial				
Observações adicionais:			Data e horário da realização da visita:	

Fonte: Própria autora (2019).

Durante as visitas às lavanderias, realizadas entre os dias 18/09 e 24/09/2019, foram registradas, além das informações indicadas no material orientativo, algumas das reações que a abordagem causava nos proprietários e/ou gerentes dos estabelecimentos, e os resultados tabulados conforme apresentado na Figura 7. Foram consideradas roupas domésticas as usadas em residências; roupas comerciais os uniformes, roupas de cama e banho de hotéis e roupas hospitalares as roupas de cama e uniformes usados em hospitais.

Figura 7: Dados coletados durante as visitas às lavanderias de Palmas.

Lavanderia (LAV)	Categorias de roupas lavadas (cat)	Abastecimento de água	Máquinas (n _{maq})	Aproveitamento de água cinza	Ciclos (Cic)	Jornada de trabalho (JT) (h/dia)
	<input type="button" value="▼"/> comercial doméstico hospitalar	<input type="button" value="▼"/> poço artesiano abastecimento público		<input type="button" value="▼"/> faz não faz		

Fonte: Própria autora (2019).

A Figura 8 mostra instalações de uma das lavanderias que fez parte da pesquisa.

Figura 8: Instalações de lavanderias visitadas em Palmas.



Fonte: Própria autora (2019).

O abastecimento de água das lavanderias de Palmas-TO é realizado pela concessionária de distribuição de água ou por poços tubulares profundos, e nessas não há controle da quantidade de água consumida mensalmente. A Tabela 1 mostra a forma de abastecimento de água da lavanderia e a informação de aproveitamento ou não da água cinza gerada.

Tabela 1: Forma de abastecimento de água e de aproveitamento de água cinza nas lavanderias.

Lavanderia	Abastecimento de água	Aproveitamento de água cinza
A	poço artesiano	não faz
B	poço artesiano	não faz
C	abastecimento público	não faz
E	abastecimento público	não faz
D	abastecimento público	não faz
G	abastecimento público	não faz
I	abastecimento público	não faz
H	poço artesiano	uso em irrigação
J	poço artesiano	não faz
K	poço artesiano	não faz
L	poço artesiano	não faz

Fonte: Própria autora (2019).

A Tabela 2 mostra a categoria das roupas lavadas por lavanderia e o número de máquinas e a capacidade de cada uma (quilos de roupas lavados por ciclo).

Tabela 2: Categorias de roupas lavadas, número e capacidade das máquinas instaladas.

Lavanderia	Categorias de roupas lavadas	máquinas
A	comercial e doméstico	5 para 13kg + 2 para 15 kg
B	comercial e hospitalar	5 para 100 kg
C	doméstico	1 para 16 kg
E	doméstico	1 para 30 kg
D	doméstico	1 para 17,3 kg
G	doméstico	1 para 16 kg e 1 para 17 kg
I	doméstico	5 para 15 kg
H	doméstico	1 para 30 kg
J	doméstico	2 para 16 kg
K	comercial	1 para 50 kg
L	comercial	1 para 20 kg

Fonte: Própria autora (2019).

As estimativas de consumo de água por quilo de roupa lavada estão indicadas na Tabela 3, as quais foram obtidas a partir de informações verbais dos proprietários das lavanderias. A informação refere-se ao total de água consumida em todos os processos. As roupas hospitalares apresentam um consumo de água superior ao das demais roupas comerciais, pois passam por uma desinfecção inicial, para somente depois desta etapa serem lavadas conforme o procedimento normal de molho inicial, enxágues e enxágue final com uso de amaciante (DIAS, 2016).

Tabela 3: Consumo de água por categoria de roupa lavada.

Descrição	Consumo (Litros/kg de roupa) *
Roupas hospitalares	42 L / kg
Roupas de hotéis, motéis, restaurantes, uniformes	30 L / kg
Roupas domésticas	10 L / kg

* Informações verbais dos proprietários das lavanderias

Fonte: Própria autora (2019).

Na Tabela 4 estão apresentados os percentuais de categorias de roupas lavadas nas lavanderias visitadas. Todas as informações foram verbais, dadas pelos proprietários ou por funcionários por eles indicados.

Tabela 4: Categorias de roupas lavadas por lavanderia visitada.

lavanderia	hospitalar	comercial	doméstico
A	-	90%	10%
B	60%	40%	-
C	-	-	100%
E	-	-	100%
D	-	-	100%
G	-	-	100%
I	-	-	100%
H	-	-	100%
J	-	-	100%
K	-	100%	-
L	-	100%	-

Fonte: Própria autora (2019).

A capacidade instalada de cada uma das lavanderias foi calculada pela Equação 1.

$$CI_{LAV} = \sum_{n=1}^{n_{maq}} Cap_n * JT_n * Cic_n \quad [1]$$

Fonte: Própria autora (2019).

Em que:

CI_{LAV} = capacidade diária instalada da lavanderia em kg/dia;

n = número de máquinas instaladas na lavanderia;

Cap_n = capacidade em kg de cada ciclo de lavagem de cada uma das máquinas;

JT_n = jornada de trabalho por máquina em horas/dia;

Cic_n = Ciclo de cada uma das máquinas por hora.

A partir do valor da capacidade instalada, da categoria de roupas lavadas, do percentual de cada uma delas na produção da lavanderia, e do consumo de água por quilo de roupa lavada, calculou-se o consumo médio diário de água de cada uma das lavanderias, utilizando-se a Equação 2.

$$CDA_{LAV} = \sum_{n=1}^{cat} CI_{LAV} * PC_n * CS_n \quad [2]$$

Fonte: Própria autora (2019).

Em que:

CDA_{LAV} = Consumo diário de água por lavanderia (em litros);

cat = Categoria de roupas lavadas (hospitalar, comercial ou doméstico);

CI_{LAV} = capacidade diária instalada da lavanderia em kg/dia;

PC_n = Percentual de roupas lavadas diariamente por categoria;

CS_n = Consumo de água por kg de roupa lavada por categoria (em litros).

Considerou-se ainda que em lavanderias a geração de esgoto é de 100% do volume de água consumida no processo de lavagens. Para estimativa do volume mensal de esgoto gerado nas lavanderias de Palmas-TO, definiu-se o mês com 25 dias trabalhados.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA CINZA DE LAVANDERIA

3.3.1. Preparo das amostras

Foram coletadas amostras na lavanderia A de Palmas-TO (Figura 9) no dia 03 de outubro de 2019, após um processo de lavagem de águas domésticas.

Figura 9: Coleta de amostras de águas cinza na Lavanderia A.



Fonte: Própria autora (2019).

A lavanderia A foi a escolhida por fazer lavagens de roupas domésticas e de rede hoteleira. Não faz lavagens da rede hospitalar, o que não é objeto desse estudo, por não serem consideradas águas cinza apropriadas para reúso (pela presença de patógenos). Um outro item interessante para a escolha dessa lavanderia como fornecedora da amostra de água cinza foi o fato de apresentar instalação hidrossanitária apropriada para coleta após cada um dos ciclos de lavagem. A sua máquina principal tem uma manivela de abertura, que é acionada manualmente para descarga após cada etapa da lavagem de roupas. Essa instalação foi executada dessa forma, pois a lavanderia A aguarda por um estudo que indique um tratamento adequado que viabilize o reúso da sua água cinza.

As amostras foram dispostas em 3 bombonas, num total de 150 litros de água cinza. Em cada uma das bombonas foi coletada a água cinza de cada um dos processos da lavagem: a) molho inicial; b) 1º enxágue e c) enxágue final com uso do amaciante. As amostras foram identificadas e transportadas ao Laboratório de Análises Físico-Químicas de Água do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO). As coletas foram realizadas no período matutino para que as amostras fossem levadas ao laboratório para início das análises em um tempo máximo de 4 horas. As bombonas foram lavadas, e na ocasião da coleta foram enxaguadas com o próprio líquido, exatamente antes de serem utilizadas.

A Figura 10 mostra o transporte das amostras identificadas para o laboratório de Análises Físico-Químicas do IFTO.

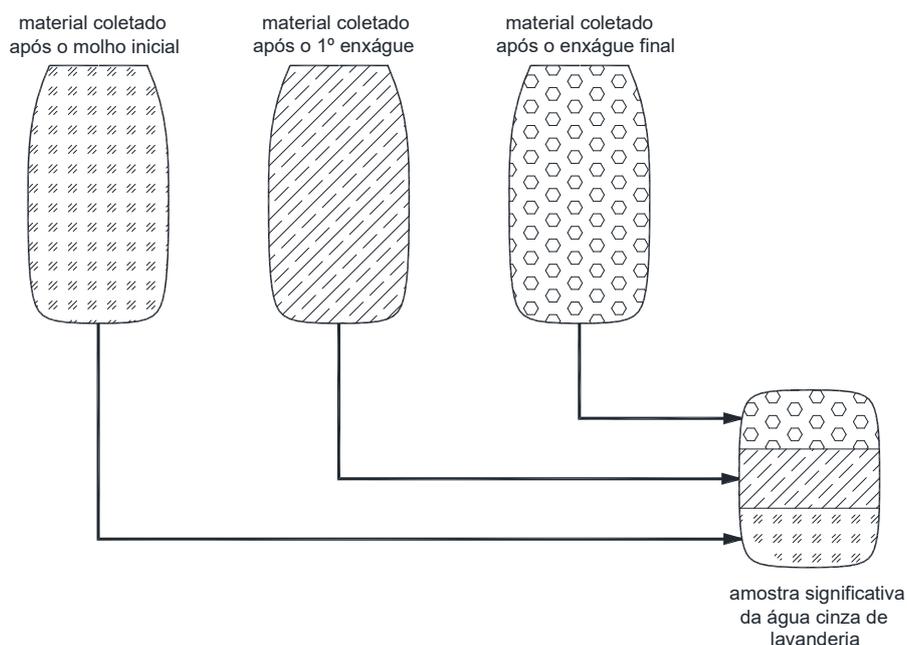
Figura 10: Transporte das amostras para o laboratório do IFTO.



Fonte: Própria autora (2019).

A amostra padrão de água cinza de lavanderia foi preparada usando-se a proporção 1:3 de cada uma das etapas constituintes do processo de lavagem, conforme esquema indicado na Figura 11.

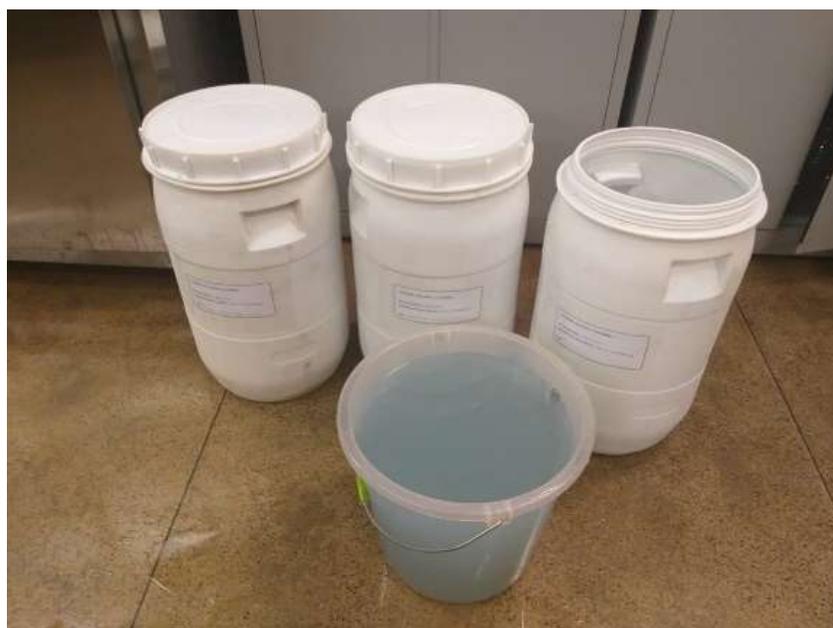
Figura 11: Esquema da obtenção da amostra padrão de água cinza de lavanderia.



Fonte: Própria autora (2019).

A amostra preparada (Figura 12) segundo a proporção indicada (1:3) de cada um dos processos de lavagem foi então dividida em quatro partes. Uma das partes ficou disponível para os ensaios de caracterização da água cinza bruta, e as outras três partes da amostra ficaram disponíveis para serem submetidas aos ensaios de bancada de simulação dos tratamentos de água cinza pelo Processo A, Processo B e Processo C.

Figura 12: Amostra de água cinza preparada em proporção 1:3.



Fonte: Própria autora (2019).

3.3.2. Execução dos ensaios de caracterização da água cinza de lavanderia

Os parâmetros analisados na amostra de águas cinza são: temperatura, pH, Alcalinidade, Turbidez, Condutividade elétrica, Cloretos, Cloro residual, Sólidos Totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis, Sólidos Sedimentáveis, DQO, Amônia, Coliformes totais e *E. coli*. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Análises Físico-Químicas do IFTO e seguiram as instruções do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA *et al.*, 2005), de acordo com o apresentado no Quadro 11.

Quadro 11: Metodologias empregadas nas análises dos parâmetros físico-químico-microbiológicos da AC.

Parâmetro analítico	Unidade	Metodologia	Método de referência
Temperatura	° C	Termômetro de mercúrio	2550B
pH	-	Eletrométrico	4500-H ⁺ B
Alcalinidade	mg/L de CaCO ₃	Titulométrico	2320B
Turbidez	uT	Nefelométrico	2130B
Condutividade elétrica	µS/cm	Eletrométrico	2510B
Cloretos	mg/L	Mohr	4500-Cl ⁻
Cloro residual	mg/L	Espectrofotométrico	4500-Cl ⁻
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	2540B
Sólidos Fixos	mg/L	Gravimétrico	2540B
Sólidos Voláteis	mg/L	Gravimétrico	2540B
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	Gravimétrico	2540B
DQO	mg/L	Frascos Padrões	5220D
Amônia	mg/L	Espectrofotométrico	4500-NH ₃
Coliformes totais	ufc/100mL	Tubos múltiplos	9221B
<i>E. coli</i>	ufc/100mL	Tubos múltiplos	9221B

Fonte: APHA *et al.* (2005).

3.4. ENSAIOS DE BANCADA PARA TRATAMENTO DAS ÁGUAS CINZA

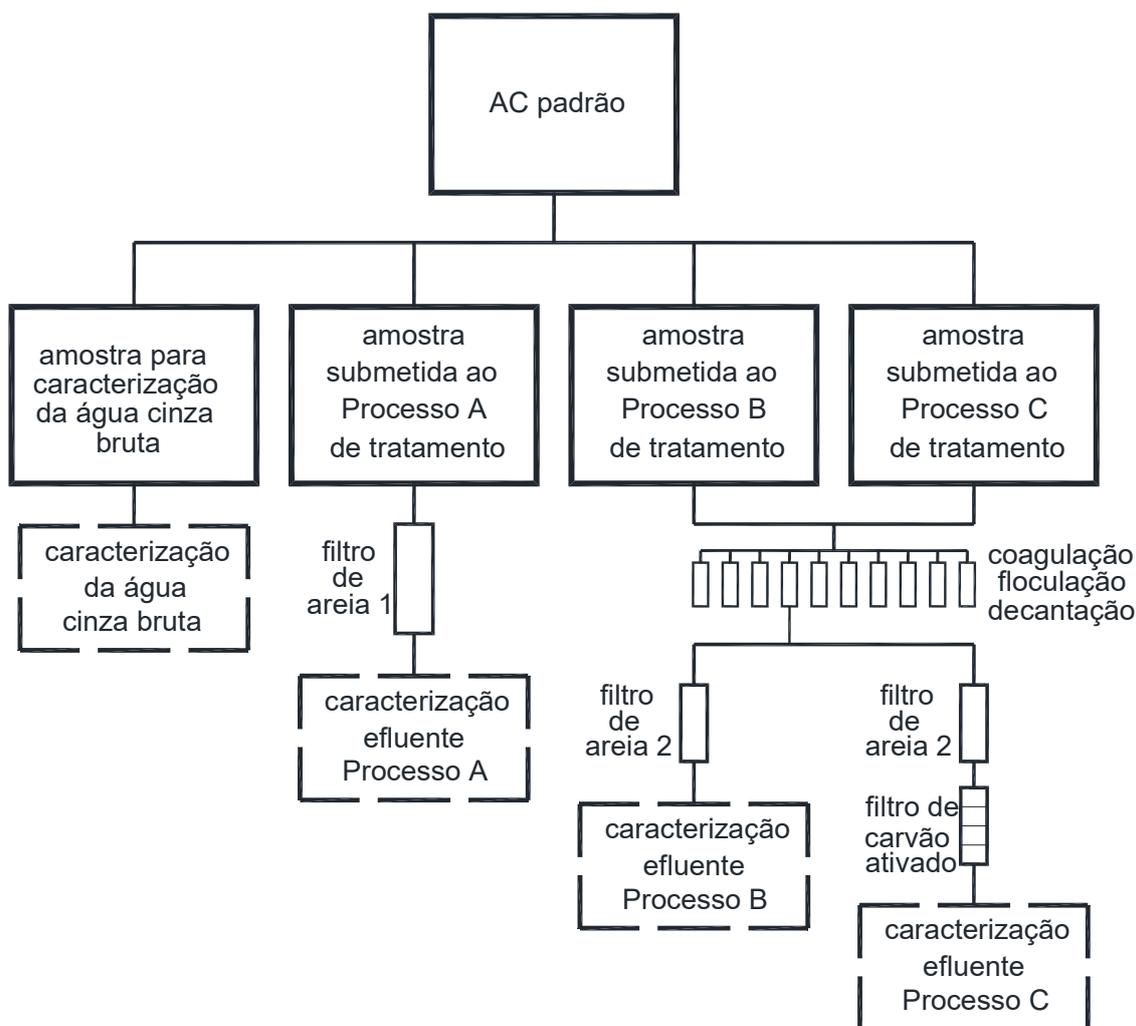
Nessa investigação científica foram empregados três tipos de processos de tratamento de águas cinza:

- a) Processo A: Filtração em filtro de areia;
- b) Processo B: Coagulação, floculação, sedimentação e filtração em filtro de areia;
- c) Processo C: Coagulação, floculação, sedimentação, filtração em filtro de areia e carvão ativado em série.

O processo A apresenta uma filtração em filtro de areia de dimensões distintas ao filtro utilizado nos processos B e C.

A Figura 13 apresenta o esquema dos três processos de tratamento aos quais a água cinza padrão de lavanderias foi submetida.

Figura 13: Esquema dos ensaios de bancada para tratamento das águas cinza.

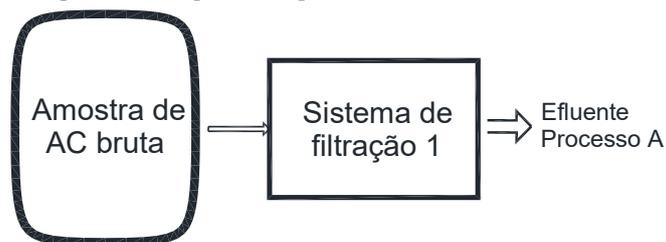


Fonte: Própria autora (2019).

3.4.1. Detalhamento do processo A de tratamento de água cinza

O primeiro processo de tratamento de águas cinza de lavanderias testado foi a filtração do efluente em filtro de areia, o qual está nessa pesquisa designado como Processo A. O esquema do processo A de tratamento de águas cinza, composto somente da etapa de filtração, está apresentado na Figura 14.

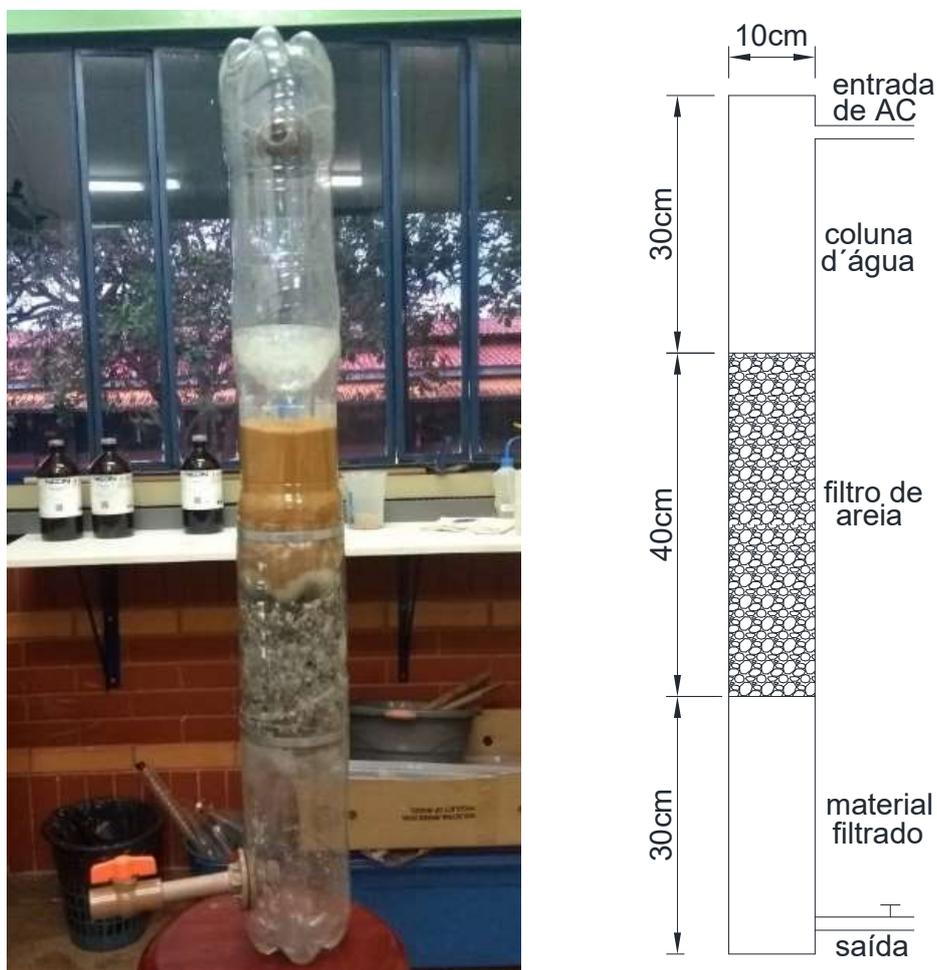
Figura 14: Esquema do processo A de tratamento da AC.



Fonte: Própria autora (2019).

O filtro de areia usado no processo A de tratamento foi construído conforme Lôbo (2019), com material filtrante coletado do estoque de areia do Laboratório de Construção Civil do IFTO/Campus Palmas (Figura 15). Possui diâmetro de 10 cm e altura de 40 cm.

Figura 15: Filtro de areia 1 usado no processo A de tratamento.



Fonte: Própria autora (2019).

Foram adotados procedimentos de acordo com a NBR 11799 (ABNT, 2016) para retirada da amostra bruta (Figura 16) e seu acondicionamento em sacos lacrados.

Figura 16: Amostra bruta (areia média e areia fina).

Fonte: Própria autora (2019).

Após a coleta, foi feita a mistura, o quarteado, em seguida foi retirada uma amostra de 1 kg, na qual procederam-se os ensaios de caracterização. A caracterização do material foi feita no laboratório do curso de Construção Civil do IFTO/Campus Palmas, seguindo os procedimentos e padrões da NBR 11799:2016 (ABNT, 2016). O Quadro 12 contém as características do material filtrante.

Quadro 12: Características do meio filtrante.

Caracterizações Determinadas	Resultados Obtidos	
	Areia fina	Areia média
Módulo de Finura	1,88	2,41
Dimensão Máxima 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	0,25 mm	0,40 mm
D ₆₀	0,45 mm	0,55 mm
Coefficiente de uniformidade	1,8	2,11
Coefficiente de curvatura	1,08	1,12

Fonte: LÔBO (2019).

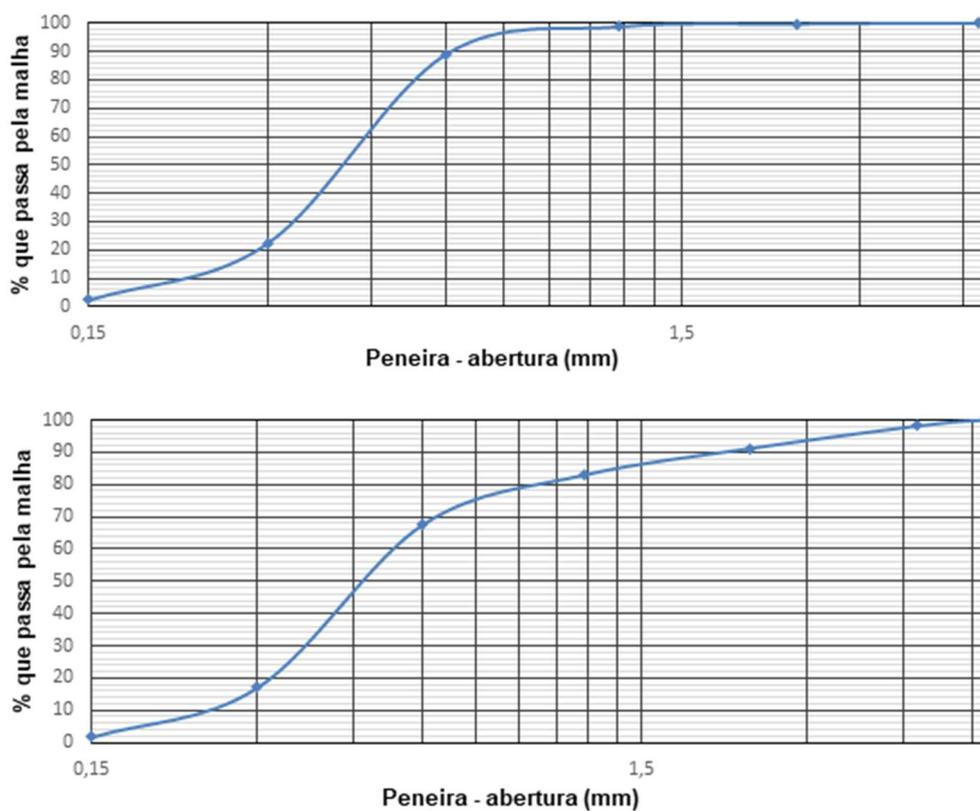
O Quadro 13 mostra a composição granulométrica da areia utilizada como meio filtrante. Os resultados obtidos no agregado miúdo (massa específica e composição granulométrica) foram comparados com os valores recomendados pela norma para os leitos filtrantes, pois esta norma estabelece limites de índices para aceitação do material granular para uso com a função de filtragem. Após sua caracterização, a areia foi preparada e lavada para remoção de materiais pulverulentos.

Quadro 13: Composição granulométrica do material filtrante.

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%
0,60	11,08%	32,37%
0,30	77,62%	82,88%
0,15	97,47%	98,25%

Fonte: LÔBO (2019).

A Figura 17 apresenta as curvas granulométricas da areia fina e da areia média usadas como meio filtrante no filtro de areia do Processo A de tratamento.

Figura 17: Curvas granulométricas - areia fina e areia média usadas no filtro.

Fonte: LÔBO (2019).

O filtro de areia foi operado com uma taxa de aplicação superficial de $56,16 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$ conforme Vargas *et al.* (2014). O controle da entrada e saída dos filtros foi feito de forma manual, com monitoramento visual para carga hidráulica (entrada), variando a coluna de água entre 10 a 20 cm. O tempo de início de coleta de água cinza filtrada foi de 20 minutos após o

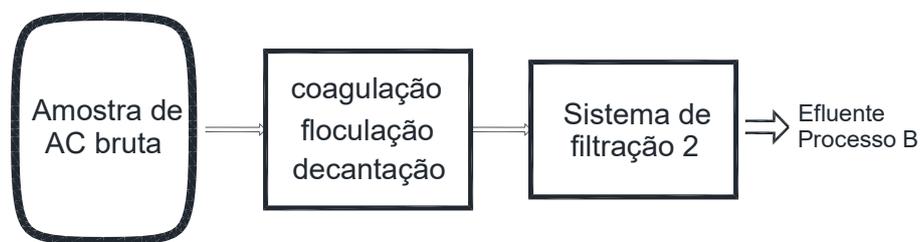
início da filtração, garantindo assim, a substituição do volume de água existente nos filtros, no início da filtração.

A amostra de água cinza tratada pelo processo A foi submetida à caracterização físico-química e microbiológica conforme ensaios indicados no Quadro 11, página 53.

3.4.2. Detalhamento do processo B de tratamento de água cinza

O tratamento que consiste na realização de coagulação, floculação e sedimentação antes da filtração está nessa pesquisa denominado de Processo B (Figura 18) e foi dividido em duas etapas: a) Processo de Coagulação, Floculação e Sedimentação e b) Filtração do efluente do sistema de coagulação em filtro de areia.

Figura 18: Esquema do processo B de tratamento da AC.



Fonte: Própria autora (2019).

O coagulante utilizado nos ensaios foi o sulfato de alumínio. Os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação foram realizados utilizando o “Jar Test” (Figura 19), modelo 218-3LDB.

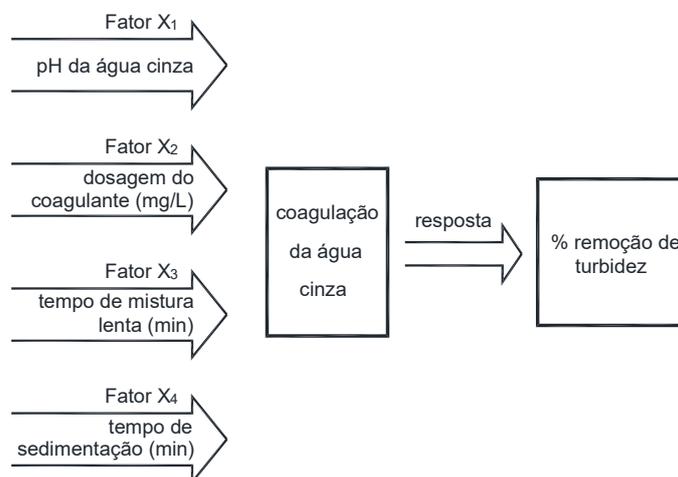
Figura 19: Equipamento "Jar Test".



Fonte: Própria autora (2019).

Verificou-se através de planejamento multivariável o efeito de quatro fatores nos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação para se obter as melhores respostas em remoção de turbidez (Figura 20).

Figura 20: Representação do planejamento experimental dos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação.



Fonte: Própria autora (2019).

Aplicou-se um Delineamento Fatorial Fracionado (DFF 2^{4-1}), com 8 experimentos, com a utilização da geratriz $I = abcd$ (Tabela 5). Os fatores estudados foram: pH da água cinza (fator X_1), dosagem do coagulante (fator X_2), tempo de mistura lenta (fator X_3) e tempo de sedimentação (fator X_4).

Tabela 5: Ordem dos experimentos empregados no DFF 2^{4-1} .

Ordem dos Experimentos	Fatores			
	X_1 (pH)	X_2 (dosagem do coagulante)	X_3 (tempo de mistura lenta)	X_4 (tempo de sedimentação)
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1

Fonte: Própria autora (2019).

O número de experimentos foi definido pela Equação 3:

$$n_{exp} = r \cdot 2^{k-p} + cp$$

[3]

Fonte: (RODRIGUES; COSTA, 2014).

Em que:

n_{exp} = número de experimentos;

r = repetições genuínas;

k = número de variáveis;

p = geradores;

cp = pontos centrais.

Os domínios das faixas dos parâmetros (valores mínimos e máximos para os fatores) estão de acordo com Rodrigues (2019) e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Fatores e níveis empregados no DFF 2^{4-1} .

Fatores	Níveis	
	(-)	(+)
pH da água cinza (-)	7	8
Dosagem do coagulante (mg/L)	200	400
Tempo de mistura lenta (min)	10	30
Tempo de sedimentação (min)	10	40

Fonte: Própria autora (2019).

Após o estabelecimento de quais fatores são significativos no processo de coagulação da água cinza (Planejamento fatorial 2^{4-1}), efetuou-se um planejamento fatorial do tipo 2^2 com ponto central (Tabela 7) a fim de se obter os melhores índices de remoção de turbidez nas proximidades do ponto central.

O número de experimentos foi definido pela Equação 4:

$$n_{exp} = r \cdot 2^k + cp \quad [4]$$

Fonte: (RODRIGUES; COSTA, 2014).

Em que:

n_{exp} = número de experimentos;

r = repetições genuínas;

k = número de variáveis;

cp = pontos centrais.

Empregou-se a metodologia *Evolution Operation* (EVOP), mudando-se a direção dos fatores para se obter as melhores respostas em torno do ponto central. Tendo-se a preocupação com custo do tratamento, como também a preocupação ambiental com geração de lodo, é sempre viável a busca por menores dosagens de coagulante.

Tabela 7: Ordem dos experimentos empregados no DCC 2².

Ensaio	Fatores	
	X ₁ (dosagem do coagulante)	X ₂ (tempo de sedimentação)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	0	0
6	0	0
7	0	0

Fonte: Própria autora (2019).

Nesse planejamento os fatores foram utilizados segundo valores apresentados na Tabela 8. Nos sete ensaios deste planejamento, o tempo de mistura lenta foi de 10 minutos e o pH da água cinza foi ajustado a 7,5.

Tabela 8: Fatores e níveis empregados no DCC 2².

Fatores	Níveis		
	(-1)	0	(+1)
Dosagem do coagulante (mg/L)	170	270	370
Tempo de sedimentação (min)	10	25	40

Fonte: Própria autora (2019).

Como o modelo quadrático possui mais termos em sua equação que o número de níveis dos experimentos (apenas 5, como mostrado na Tabela 7), é impossível determinar todas as estimativas do modelo. Assim sendo, foi aplicado um novo fatorial 2² com ponto central mais estrela, com o objetivo de calcular todas as estimativas do modelo quadrático. Neste modelo, o número de experimentos é calculado segundo a Equação 5.

$$n_{exp} = r \cdot (2^k + 2 \cdot k) + cp \quad [5]$$

Fonte: (RODRIGUES; COSTA, 2014).

Em que:

n_{exp} = número de experimentos;

r = repetições genuínas;

k = número de variáveis;

cp = pontos centrais.

Na Tabela 9 apresenta-se o planejamento fatorial DCCR 2^2 com 11 experimentos.

Tabela 9: Ordem dos experimentos empregados no DCCR 2^2 .

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	X_1	X_2
	Dosagem do coagulante	Tempo de sedimentação
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1,41	0
6	+1,41	0
7	0	-1,41
8	0	+1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: Própria autora (2019).

Os níveis de dosagem do coagulante em mg/L e o tempo de sedimentação em minutos adotados estão indicados na Tabela 10, com condições fixas para tempo de mistura lenta de 10 minutos e pH da água cinza de 7,5.

Tabela 10: Fatores e níveis empregados no DCCR 2^2 .

Fatores	Níveis				
	(-1,41)	(-1)	0	(+1)	(+1,41)
Dosagem do coagulante (mg/L)	109	150	250	350	391
Tempo de sedimentação (min)	3,8	10	25	40	46,2

Fonte: Própria autora (2019).

Após as etapas de Coagulação, Flocculação e Sedimentação, o efluente foi enviado para o processo de filtração. O teste foi feito em filtro descendente contendo como meio filtrante o filtro de areia 2. O experimento foi realizado em fluxo contínuo e a alimentação do filtro foi

feita por gravidade, mantendo-se uma vazão média de 300 mL/h. O sistema de filtração usado no Processo B está apresentado na Figura 21.

Figura 21: Sistema de filtração de águas cinza após etapas de coagulação, floculação e sedimentação.



Fonte: Própria autora (2019).

A Figura 22 apresenta em detalhe o filtro de areia 2 que foi utilizado no processo B de tratamento da água cinza, o qual possui 2 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento.

Figura 22: Detalhe do filtro de areia 2 utilizado no processo B de tratamento.

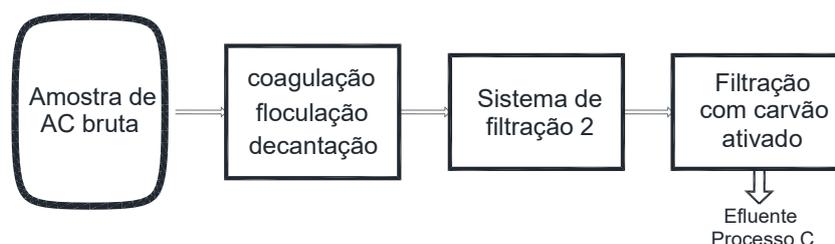


Fonte: Própria autora (2019).

3.4.3. Detalhamento do processo C de tratamento de água cinza

Foi denominado como Processo C o tratamento que consistiu na adição da etapa de filtro de carvão ativado comercial às etapas de coagulação, floculação e sedimentação e passagem por filtro de areia do processo B descrito no item 3.5.2. O esquema geral do Processo C está apresentado na Figura 23.

Figura 23: Esquema do processo C de tratamento de AC.



Fonte: Própria autora (2019).

Após a etapa de coagulação, floculação e sedimentação, descrita no item 3.5.2, e estando definidas a dosagem do coagulante e o tempo de sedimentação ótimos, foi empregado um sistema de filtração de águas cinza em uma série de dois filtros em regime contínuo (areia e carvão ativado comercial).

O sistema foi feito de um tubo de plástico de Policloreto de Vinila (PVC) no formato cilíndrico, com as seguintes dimensões: comprimento total do tubo 40 cm, altura do carvão na coluna 11 cm, diâmetro do tubo de 2,0 cm. Cada um dos dois filtros está composto de 20 gramas de material. O sistema foi operado com a vazão de 10 mL/min. A Figura 24 ilustra o sistema de filtração utilizado no processo C.

Figura 24: Sistema de filtração de águas cinza, contendo dois filtros em série.



Fonte: Própria autora (2019).

3.4.4. Caracterização das amostras de água cinza tratada

As amostras de água cinza tratadas foram coletadas em vasilhames plásticos após serem submetidas aos 3 sistemas de tratamento de água cinza. Foram realizados todos os ensaios de caracterização físico-química e microbiológicos executados anteriormente com a amostra de água cinza bruta, adotando-se os mesmos procedimentos metodológicos, conforme indicado no Quadro 11, página 53.

3.5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REÚSO DAS AC TRATADAS

Os resultados dos ensaios executados nos efluentes dos processos A, B e C de tratamento foram comparados aos resultados obtidos na caracterização físico-química e microbiológica da água cinza proveniente da lavanderia A para obter-se uma avaliação do potencial de reúso das águas cinza (Quadro 14).

Quadro 14: Dados comparativos entre características de AC bruta e AC tratada.

Parâmetro	Unidade	AC bruta	AC tratada (processo A)	AC tratada (processo B)	AC tratada (processo C)
Temperatura	° C				
pH	-				
Alcalinidade	mg/L				
Turbidez	uT				
Condutividade elétrica	µS/cm				
Cloretos	mg/L				
Cloro residual	mg/L				
Sólidos Totais	mg/L				
Sólidos Fixos	mg/L				
Sólidos Voláteis	mg/L				
Sólidos Sedimentáveis	mg/L				
DQO	mg/L				
Amônia	mg/L				
Coliformes totais	ufc/100mL				
<i>E. coli</i>	ufc/100mL				

Fonte: Própria autora (2019).

Fez-se então o enquadramento das AC tratadas às exigências da ANA e da ABNT. Os resultados dos enquadramentos foram tabulados conforme mostra o Quadro 15, onde preencheu-se com “OK” ou “não”, conforme a amostra de água cinza tratada pelos processos A, B e C tenha sido ou não enquadrada nas exigências das Classes 1, 2 ou 3, obtendo-se assim

um panorama geral de para quais usos esta AC tratada estaria liberada, considerando-se as exigências da ABNT e da ANA.

Quadro 15: Dados a serem preenchidos para avaliação do potencial de reúso das AC tratadas.

Classes de reúso		Processos de tratamento			Descrição do uso para cada uma das classes
		A	B	C	
NBR 13.969:1997	Classe 1				Lavagem de carros e outros usos com contato direto do usuário com a água
	Classe 2				Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins
	Classe 3				Reúso nas descargas dos vasos sanitários
ANA <i>et al.</i> (2005)	Classe 1				Descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais; lavagem de veículos
	Classe 2				Lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira
	Classe 3				Irrigação de áreas verdes e rega de jardins

Fonte: Própria autora (2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. VOLUME DE AC GERADAS NAS LAVANDERIAS DE PALMAS

Os resultados obtidos a partir da Equação 1 (página 49) e da Equação 2 (página 50) para previsão do consumo diário e mensal de água nas atividades das lavanderias de Palmas-TO estão apresentados na Tabela 11.

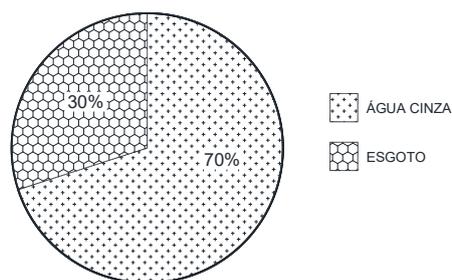
Tabela 11: Previsão mensal de geração de esgoto em lavanderias de Palmas-TO.

Lavanderia	Capacidade diária instalada (kg de roupa)	Previsão diária de consumo de água (litros)	Previsão diária de geração de AC (m ³)	Previsão diária de geração de esgoto (m ³)	Previsão mensal de geração de AC (m ³)	previsão mensal de geração de esgoto (m ³)
A	1.520,0	42.560	42,6	0,0	1.064,0	0,0
B	2.400,0	83.520	33,4	50,1	835,2	1.252,8
C	320,0	3.200	3,2	0,0	80,0	0,0
E	523,2	5.232	5,2	0,0	130,8	0,0
D	276,8	2.768	2,8	0,0	69,2	0,0
G	422,4	4.224	4,2	0,0	105,6	0,0
I	750,0	7.500	7,5	0,0	187,5	0,0
H	399,0	3.990	4,0	0,0	99,8	0,0
J	524,8	5.248	5,2	0,0	131,2	0,0
K	100,0	3.000	3,0	0,0	75,0	0,0
L	120,0	3.600	3,6	0,0	90,0	0,0
TOTAL	7.356,2	164.842	114,7	50,1	2.868,3	1.252,8

Fonte: Própria autora (2019).

Considerando-se esgoto a água servida nas lavanderias que obrigatoriamente deve seguir para a rede coletora, pois é proveniente da lavagem de roupas hospitalares, e a água cinza como a água proveniente das lavagens de roupas comerciais e domésticas, obteve-se como previsão de geração de AC nas lavanderias visitadas o volume de 2.868,3 m³ e como geração de esgoto o volume de 1.252,8 m³.

Estes volumes de água cinza e de esgoto representam 70% e 30% da água residuária gerada, respectivamente, conforme mostra o gráfico da Figura 25.

Figura 25: Percentual de geração de esgoto e água cinza nas lavanderias pesquisadas de Palmas-TO.

Fonte: Própria autora (2019).

Considerando-se que as lavanderias participantes da pesquisa correspondem a aproximadamente 70% das lavanderias em funcionamento, estima-se o volume total de geração mensal de AC em lavanderias de Palmas-TO como 4.150 m³.

4.2. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA CINZA DE LAVANDERIA

4.2.1. Resultados da análise da água cinza bruta

A Tabela 12 contém os resultados dos parâmetros medidos na AC bruta e os valores desses parâmetros obtidos em pesquisas que também tratam de AC provenientes de máquinas de lavar domésticas.

Tabela 12: Caracterização da AC bruta e outras pesquisas em AC de máquinas de lavar.

Parâmetro	Unidade	Autora (2019)	Rampelotto (2014)	Edwin <i>et al.</i> (2014)	Bazzarella (2005)	Sostar-Turk <i>et al.</i> (2005)	Siegrist <i>et al.</i> (1976) <i>apud</i> Eriksson <i>et al.</i> (2002)	Christova-Boal <i>et al.</i> (1996)
Temperatura	°C	25	25 ± 3,5	-	-	62	32,0	-
pH	-	7,5	7,4 ± 1,2	9,1	9,1	9,6	-	9,3-10
Alcalinidade	mg/L	45,0	-	721,0	74,2	-	-	83-200
Turbidez	uT	122,0	49 ± 36	108,6	58,0	-	-	50-210
Condutividade elétrica	µS/cm	216,0	364 ± 196	641,6	524,0	-	-	190-1400
Cloretos	mg/L	53,7	-	37,3	23,6	-	-	9-88
Cloro residual	mg/L	0,1	-	-	-	< 0,1	-	-
Sólidos Totais	mg/L	460,0	391 ± 215	586,0	1004,0	-	1340,0	-
Sólidos Fixos	mg/L	213,0	-	-	-	-	-	-
Sólidos Voláteis	mg/L	247,0	-	-	-	-	-	-
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	0,1	1,0 ± 0,8	-	-	2,0	-	-
DQO	mg/L	280,0	300 ± 142	-	521,0	180,0	-	-
Amônia	mg/L	7,1	-	3,7	3,6	2,5	-	-
Coliformes totais	ufc/100mL	1,119 × 10³	ND a 9,6 × 10 ⁵	-	0,54 × 10 ¹	-	85 × 10 ⁵	10 ³ -10 ⁵
<i>E. coli</i>	ufc/100mL	ND	ND a 1,8 × 10 ⁵	-	2,73 × 10 ¹	-	9 × 10 ⁴	10 ² -10 ³

ND = não detectado

Fonte: Própria autora (2019).

O pH obtido na amostra de água cinza (7,5) está dentro do intervalo encontrado por Rampelotto (2014), mas é inferior aos obtidos por Edwin *et al.* (2014), Bazzarella (2005), Sostar-Turk *et al.* (2005) e Christova-Boal *et al.* (1996). Bazzarella (2005) afirma que o pH da água cinza depende basicamente do pH da água de abastecimento. Mas alguns produtos químicos podem contribuir para o seu aumento, e como exemplo cita o uso de sabão em pó e de amaciante contribuindo para o pH alcalino das amostras de águas cinza provenientes de lavanderias.

O valor do parâmetro de alcalinidade em águas cinza de máquinas de lavar encontrado nesta pesquisa foi de 45 mg/L, enquanto Bazzarella (2005) encontrou o valor de 74,2 mg/L; Christova-Boal *et al.* (1996) definiu um intervalo entre 83 a 200 mg/L, mas Edwin *et al.* (2014) encontrou um valor de 721 mg/L para a alcalinidade de amostra de lavanderia.

Os parâmetros obtidos para turbidez (122 uT), condutividade elétrica (216 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Cloretos (53,7 mg/L) e coliformes totais ($1,119 \times 10^3$) estão todos dentro dos intervalos encontrados para esses parâmetros por Christova-Boal *et al.* (1996). Bazzarella (2005) obteve como turbidez característica de água cinza proveniente de máquina de lavar o valor de 58 uT, e para condutividade elétrica encontrou o valor médio de 524 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Rampelotto (2014) definiu o intervalo de 168 a 560 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo que o intervalo proposto por Christova-Boal *et al.* (1996) é de 190 a 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

O Cloro residual obtido nesta pesquisa (0,1 mg/L) foi exatamente o limite superior encontrado por Sostar-Turk *et al.* (2005).

Esta pesquisa encontrou o valor de 280 mg/L para a DQO, enquanto Rampelotto (2014) define esse valor em um intervalo entre 158 e 442 mg/L. A DQO encontrada nesta pesquisa foi 55,5% superior à definida por Sostar-Turk *et al.* (2005) – 180 mg/L. Valores médios de DQO para águas cinza provenientes de máquinas de lavar foram definidos por Bazzarella (2005) como em um intervalo de 190 a 920 mg/L, estando a média em 521 mg/L.

Bazzarella (2005) encontrou concentrações de amônia no valor de 1,5 mg/L para amostras de águas cinza provenientes de máquina de lavar, enquanto nesta pesquisa, encontrou-se a concentração de 7,1 mg/L.

Não foi detectada presença nesta pesquisa de *E. coli*, sendo que Siegrist *et al.* (1976 *apud* Eriksson *et al.*, 2002) indicaram a presença de 9×10^4 ufc/100mL e Christova-Boal *et al.*

(1996) definiram um intervalo de 10^2 a 10^3 ufc/100mL para detecção provável de *E. coli* em amostras de águas cinza provenientes de lavanderias.

Os coliformes totais identificados ($1,119 \times 10^3$ ufc/mL) também estão de acordo com parâmetros descritos por Christova-Boal *et al.* (1996), embora consideravelmente inferiores à quantidade detectada por Siegrist *et al.* (1976 *apud* Eriksson *et al.*, 2002).

As diferenças de valores entre os parâmetros detectados entre esta pesquisa e os diversos autores reforçam o afirmado em Eriksson *et al.* (2002), de que as características da água cinza variam conforme a qualidade da água distribuída, o tipo de distribuição, e ainda os hábitos e cultura dos usuários da água.

4.2.2. Enquadramento da AC bruta a possíveis usos como água de reúso

A Tabela 13 contém estimativas de valores de DBO₅ em função da DQO medida na AC bruta. Como DBO₅ é um dos parâmetros exigidos por Ana *et al.* (2005) para enquadramento de água para uso não potável, e esse índice não foi medido nesta pesquisa, fez-se uma estimativa de valor de DBO₅ em função do valor de DQO medida. Usou-se o indicado por Halasheh *et al.* (2008), que sugere que a relação DBO₅/DQO em águas cinza varia entre 0,31 e 0,71 e a indicação de Boyjoo *et al.* (2013), que afirma que essa relação é de 0,25.

Tabela 13: Estimativas de valor de DBO₅ da AC bruta em função da DQO medida.

Parâmetro	Observação	AC bruta
DQO	medido	280,0
DBO ₅	estimado conforme Boyjoo <i>et al.</i> (2013)	70,0
	estimado conforme Halalsheh <i>et al.</i> (2008)	86,8 a 198,8

Fonte: Própria autora (2019).

A amostra de água cinza bruta de lavanderia não se enquadra nas classes de reúso 1, 2 ou 3 previstas pela ABNT 13969:1997 (Quadro 2, página 31), tampouco nas classes de reúso previstas por Ana *et al.* (2005) (Quadro 1, página 31), pois apresenta turbidez (122 uT) muito superior aos limites estipulados e Cloro residual (0,1 mg/L) inferior aos limites exigidos. Os sólidos dissolvidos totais (460 mg/L) também não atendem ao valor exigido, tampouco a DBO₅.

4.3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para execução dos processos B e C de tratamento foram executados planejamentos experimentais na sequência abaixo, buscando a otimização dos fatores de interferência na remoção de turbidez das águas cinza:

- Delineamento Fatorial Fracionado (DFF);
- Delineamento Composto Central (DCC);
- Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

4.3.1. Delineamento Fatorial Fracionário (DFF 2^{4-1})

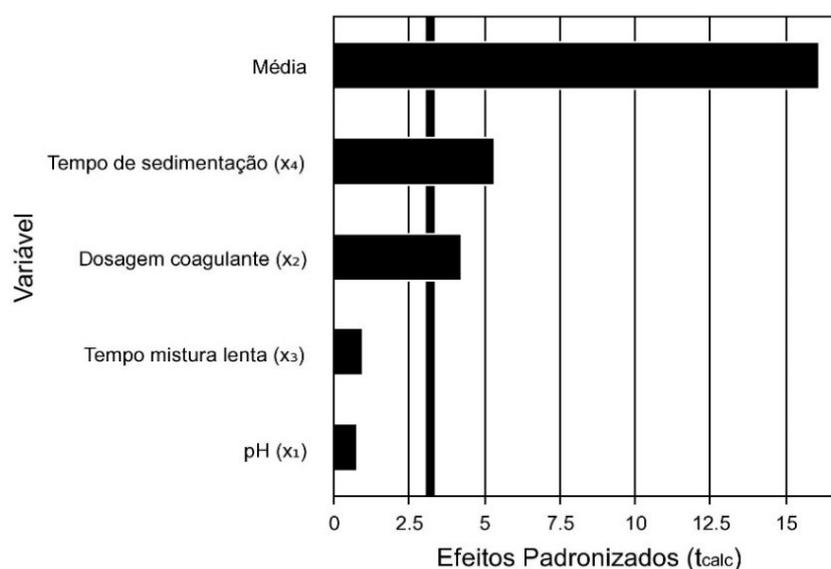
Os valores obtidos para o parâmetro turbidez quando realizado o Delineamento Fatorial Fracionário (DFF) 2^{4-1} com verificação do comportamento dos fatores X_1 (pH da água cinza), X_2 (dosagem do coagulante), X_3 (tempo de mistura) e X_4 (tempo de sedimentação) no processo de coagulação, floculação e sedimentação da AC estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Respostas de turbidez (AC após DFF 2^{4-1}).

Ordem dos Experimentos	Fatores				Resposta: Turbidez (uT)
	X_1 (pH)	X_2 (dosagem do coagulante - mg/L)	X_3 (tempo de mistura lenta - min)	X_4 (tempo de sedimentação - min)	
1	7 (-1)	200 (-1)	10 (-1)	10 (-1)	17,4
2	8 (+1)	200 (-1)	10 (-1)	40 (+1)	8,5
3	7 (-1)	400 (+1)	10 (-1)	40 (+1)	17,6
4	8 (+1)	400 (+1)	10 (-1)	10 (-1)	29,5
5	7 (-1)	200 (-1)	30 (+1)	40 (+1)	8,7
6	8 (+1)	200 (-1)	30 (+1)	10 (-1)	16,2
7	7 (-1)	400 (+1)	30 (+1)	10 (-1)	28,7
8	8 (+1)	400 (+1)	30 (+1)	40 (+1)	11,3

Fonte: Própria autora (2019).

Observa-se respostas de turbidez entre 8,5 uT e 29,5 uT. Para análise da força de cada uma das variáveis, os dados foram lançados no *software* Protimiza, onde obteve-se o Gráfico de Pareto apresentado na Figura 26, considerando-se um nível de significância de 5%.

Figura 26: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 – DFF 2^{4-1} .

Fonte: *Software Protimiza*.

Os maiores efeitos foram da variável X_2 - dosagem do coagulante (9,08) e da variável X_4 - tempo de sedimentação (-11,42), conforme mostrado na Tabela 15. Estes dois fatores tiveram influência significativa nos índices de turbidez, sendo o efeito positivo para a dosagem do coagulante indicador de que quanto maior for a dosagem do coagulante, maior será a turbidez e o efeito negativo para o tempo de sedimentação indicativo de que quanto maior o tempo de sedimentação, menor a turbidez.

Tabela 15: Efeitos das variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 no DFF 2^{4-1} .

nome	efeito	erro padrão	t calculado	p-valor
média	17,24	1,07	16,09	0,0005
pH (X_1)	-1,72	2,14	-0,8	0,4797
dosagem do coagulante (X_2)	9,08	2,14	4,23	0,0241
tempo de mistura lenta (X_3)	-2,02	2,14	-0,94	0,4144
tempo de sedimentação (X_4)	-11,42	2,14	-5,33	0,0129

Fonte: Própria autora (2019).

Observa-se também que dentre estas duas variáveis, o tempo de sedimentação é o que apresenta maior efeito no resultado de turbidez da amostra. O tempo de mistura lenta e o pH não apresentaram efeito significativo nos índices de turbidez.

4.3.2. Delineamento Composto Central (DCC 2²)

Definidas as variáveis com maior efeito na resposta remoção de turbidez, foi montado o Delineamento Composto Central (DCC) com essas variáveis, agora considerando-se X_1 a dosagem do coagulante e X_2 o tempo de sedimentação. Empregou-se a metodologia EVOP como forma de diminuir gastos, usando valores mais baixos de dosagem do coagulante, o que além do ganho econômico (menor quantidade de coagulante) proporciona ganho ambiental em tratamentos (menor produção de lodo nos tratamentos). Foi analisada a turbidez em cada uma das 7 combinações. As respostas obtidas estão apresentadas na Tabela 16.

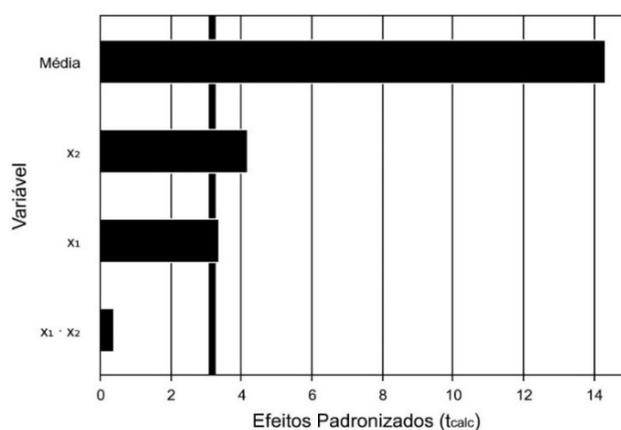
Tabela 16: Respostas de turbidez (AC após DCC 2²).

Ensaio	Fatores		Resposta: Turbidez (uT)
	X_1 (dosagem do coagulante - mg/L)	X_2 (tempo de sedimentação - min)	
1	170 (-1)	10 (-1)	16,8
2	370 (+1)	10 (-1)	24,4
3	170 (-1)	40 (+1)	5,2
4	370 (+1)	40 (+1)	14,7
5	270 (0)	25 (0)	11,9
6	270 (0)	25 (0)	11,8
7	270 (0)	25 (0)	12,0

Fonte: *Própria autora (2019)*.

O Gráfico de Pareto com os dados obtidos no DCC 2² está apresentado na Figura 27, onde verifica-se a significância dos dois fatores na resposta obtida (X_1 – dosagem do coagulante e X_2 – tempo de sedimentação). Observa-se também que a interação entre elas ($X_1.X_2$) não foi significativa.

Figura 27: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 e X_2 – DCC 2².



Fonte: *Software Protimiza*.

4.3.3. Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR 2²)

Buscando-se a otimização da dosagem do coagulante, fez-se novos experimentos, considerando-se agora o Delineamento Composto Central Rotacional, e os resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Respostas de turbidez (AC após DCCR 2²).

Ordem dos Experimentos	Fatores		Resposta: Turbidez (uT)	Turbidez (uT) (modelo)
	X ₁	X ₂		
	Dosagem do coagulante (mg/L)	Tempo de sedimentação (min)		
1	150 (-1)	10,0 (-1)	16,1	19,5
2	350 (+1)	10,0 (-1)	25,3	28,0
3	150 (-1)	40,0 (+1)	5,4	6,1
4	350 (+1)	40,0 (+1)	15,4	15,3
5	109 (-1,41)	25,0 (0)	15,2	13,0
6	391 (+1,41)	25,0 (0)	26,7	25,5
7	250 (0)	3,8 (-1,41)	28,0	24,3
8	250 (0)	46,2 (+1,41)	5,7	6,0
9	250 (0)	25,0 (0)	12,5	12,3
10	250 (0)	25,0 (0)	12,4	12,3
11	250 (0)	25,0 (0)	11,9	12,3

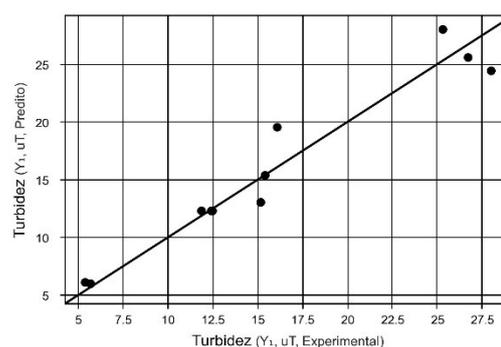
Fonte: Própria autora (2019).

Obteve-se como resultados turbidez entre 5,4 e 28,0 uT, sendo que o modelo de regressão obtido (Tabela 18) fornece também a turbidez esperada para o modelo definido por essa regressão.

Tabela 18: Ajuste de um modelo de regressão para as variáveis X₁ e X₂ do DCCR 2².

nome	coeficiente	erro padrão	t calculado	p-valor
média	12,27	1,61	7,64	0,0006
X ₁	4,43	0,98	4,51	0,0064
X ₁ ²	3,50	1,17	2,99	0,0303
X ₂	-6,52	0,98	-6,63	0,0012
X ₂ ²	1,45	1,17	1,24	0,2692
X ₁ · X ₂	0,20	1,39	0,14	0,8913

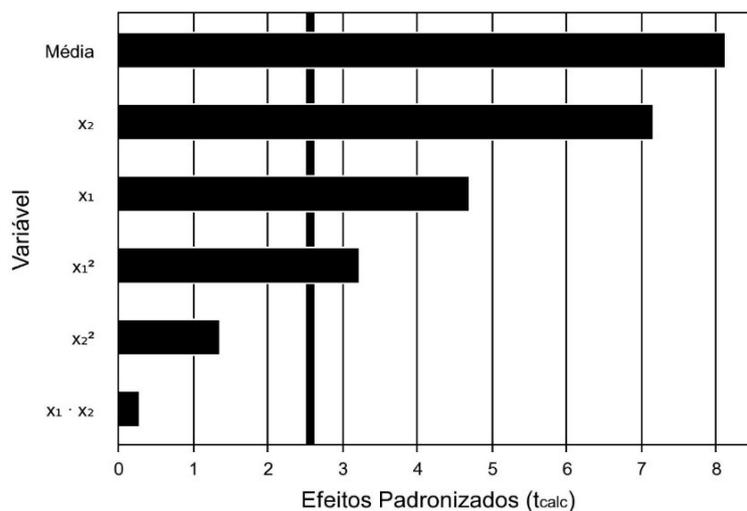
$$Y_1 = 12,27 + 4,43 \cdot X_1 + 3,50 \cdot X_1^2 - 6,52 \cdot X_2 + 1,45 \cdot X_2^2 + 0,20 \cdot X_1 \cdot X_2$$



Fonte: Software Protimiza.

As duas variáveis X₁ e X₂ apresentaram considerável significância para a resposta, como apresentado no Gráfico de Pareto da Figura 28.

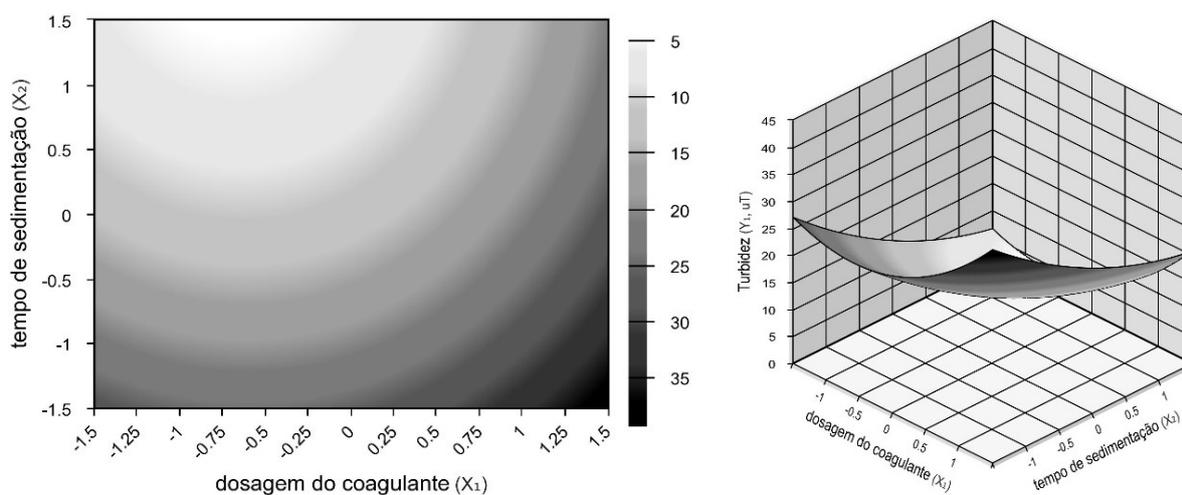
Figura 28: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 e X_2 – DCCR 2².



Fonte: *Software Protimiza*.

Na Figura 29 apresenta-se a superfície de resposta ao DCCR 2², onde percebe-se a influência das variáveis tempo de sedimentação quando varia entre os níveis (-1,41) e (+1,41) (3,8 e 46,2 minutos) e da dosagem do coagulante quando varia entre os níveis (-1,41) a (+1,41) (109 a 391 mg/L), repetidamente. Em todo o planejamento experimental procurou-se obter respostas para um consumo mínimo de coagulantes por ser esse um item que onera os tratamentos, e na superfície de resposta verifica-se que os valores de turbidez mínimos ocorrem nos valores bem próximos aos mínimos testados para esse consumo.

Figura 29: Superfície de contorno para a variação da turbidez por meio do DCCR 2².



Fonte: *Software Protimiza*.

Na Tabela 19 apresenta-se a Análise de Variância (ANOVA) para o teste de turbidez da amostra de AC por meio do planejamento experimental DCCR 2². O coeficiente R² conseguido foi de 0,9362, mostrando um bom ajuste do modelo.

Tabela 19: ANOVA para o teste de turbidez por meio do DCCR 2².

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	567,6	5	113,5	14,7	0,00521
Resíduos	38,7	5	7,7		
Falta de ajuste	38,5	3	12,8	124,1	0,00800
Erro puro	0,2	2	0,1		
Total	606,3	10			

R² = 93,62%

Fonte: *Software Protimiza*.

4.4. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA CINZA TRATADA

A Tabela 20 mostra a caracterização da água cinza tratada pelos três processos de tratamento (processo A, processo B e processo C) indicados na Figura 13, página 54.

Tabela 20: Caracterização da AC bruta e da AC tratada pelos processos A, B e C.

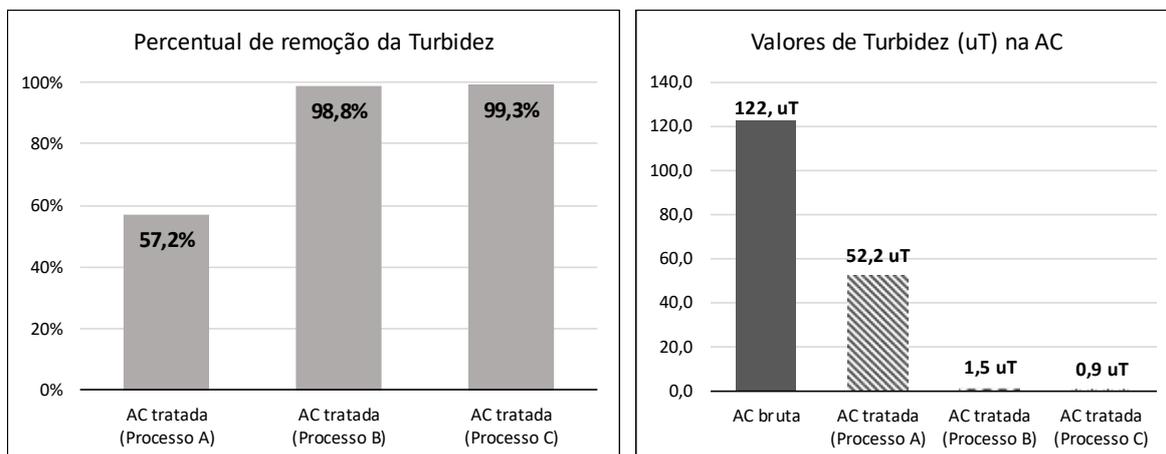
Parâmetro	Unidade	AC bruta	AC tratada (processo A)	AC tratada (processo B)	AC tratada (processo C)
Temperatura	° C	25	25	25	25
pH	-	7,5	6,9	6,3	6,5
Alcalinidade	mg/L	45,0	40,0	29,0	25,1
Turbidez	uT	122,0	52,2	1,5	0,9
Condutividade elétrica	µS/cm	216,0	192,0	151,0	147,0
Cloretos	mg/L	53,7	49,7	37,3	35,8
Cloro residual	mg/L	0,1	0,1	ND	ND
Sólidos Totais	mg/L	460,0	316,0	220,0	155,1
Sólidos Fixos	mg/L	213,0	161,0	132,0	112,0
Sólidos Voláteis	mg/L	247,0	155,0	88,0	43,1
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	0,1	ND	ND	ND
DQO	mg/L	280,0	142,0	75,3	29,4
Amônia	mg/L	7,1	6,5	6,0	2,1
Coliformes totais	ufc/100mL	1,119 x 10 ³	0,818 x 10 ³	0,516 x 10 ³	0,214 x 10 ³
<i>E. coli</i>	ufc/100mL	ND	ND	ND	ND

* ND - não detectado

Fonte: Própria autora (2019).

O parâmetro turbidez obteve uma remoção significativa (98,8% e 99,3%) nas amostras submetidas aos processos B e C de tratamento (Figura 30). Após ser submetida ao processo A de tratamento, a amostra apresentou remoção de turbidez de somente 57,2%, o que já era esperado, pois o processo A fez somente uma filtração em filtro de areia.

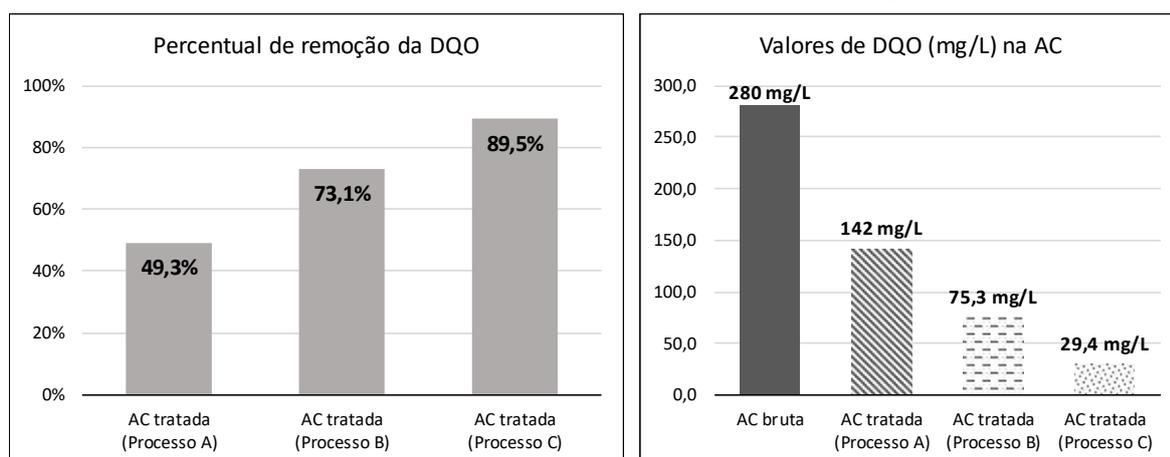
Figura 30: Percentual de remoção de turbidez e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.



Fonte: Própria autora (2019).

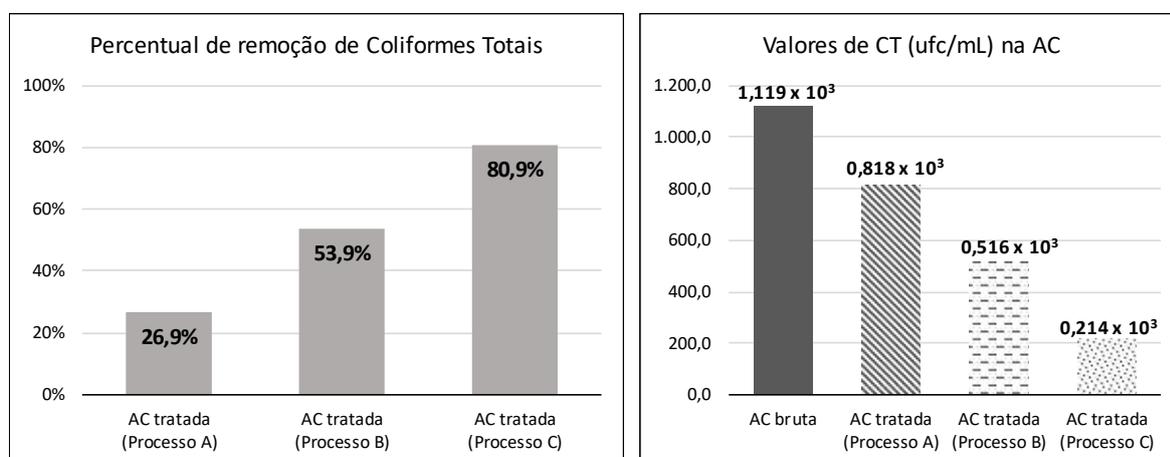
O valor alcançado de 52,2 uT para a turbidez após o processo A de tratamento (filtração) não foi suficiente para a maioria dos enquadramentos em classes de reúso. Mas os valores alcançados pelos tratamentos pelos processos B e C (1,5 uT e 0,9 uT) enquadram-se nos valores exigidos para turbidez em diversas classes de reúso definidas por ABNT (1997) e ANA *et al.* (2005).

O parâmetro DQO apresentou remoções na ordem de 49,3%, 73,1% e 89,5%, quando submetidos, respectivamente aos processos A, B e C de tratamento de água cinza (Figura 31). A pouca remoção alcançada quando submetido somente à filtração em filtro de areia (processo A) justifica o estudo de uso da coagulação, floculação e sedimentação seguido de filtração em areia (processo B), e ainda a adição da filtração em carvão ativado para o processo C, quando foi alcançada a remoção de 89,5% de DQO. Sostar-Turk *et al.* (2005) conseguiu remoção de DQO em água cinza de lavanderia de 280 mg/L para 20 mg/L quando aplicou coagulação e filtração com carvão ativado, obtendo uma remoção de 92,9%.

Figura 31: Percentual de remoção de DQO e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.

Fonte: Própria autora (2019).

Os Coliformes Totais (CT) apresentaram remoção de somente 26,9% quando a amostra foi submetida ao processo de filtração em filtro de areia (processo A), e apresentaram remoção de 53,9% quando submetidos ao processo B de tratamento, sendo que quando submetidos ao processo C de tratamento foi obtida uma remoção de 80,9% (Figura 32).

Figura 32: Percentual de remoção de CT e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.

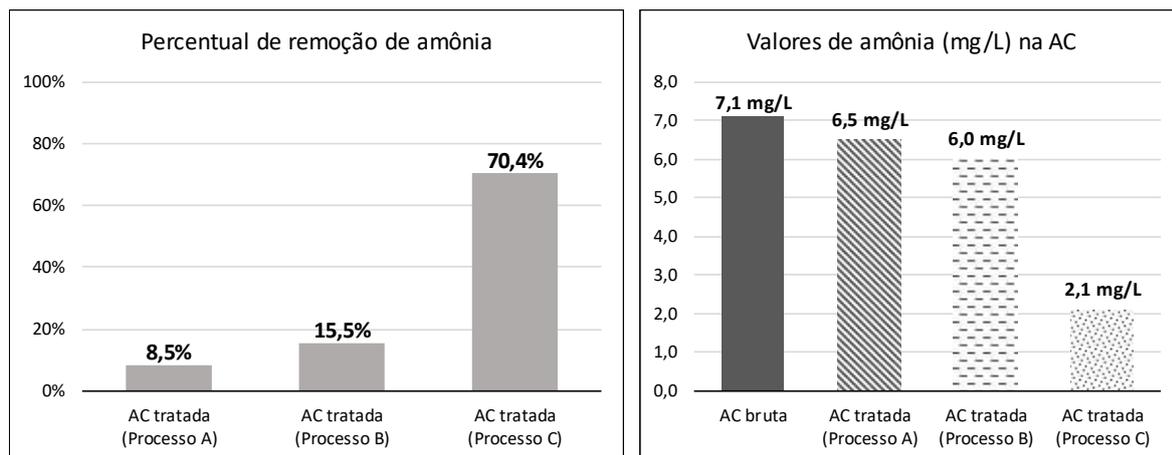
Fonte: Própria autora (2019).

O valor de CT na água cinza bruta de $1119 \text{ ufc}/100 \text{ mL}$ de amostra é superior ao indicado na Austrália para que a água cinza pudesse ter algum contato com o usuário (Quadro 6, página 34). Para valores desta ordem, Austrália (2015) indica que a água cinza teria que ter acesso restrito. Após o processo de tratamento pelo processo A, a contagem de CT reduziu para $818 \text{ ufc}/100 \text{ mL}$, e então já seria admitido um nível de contato baixo com o usuário, apesar de que os índices para permissão de contatos médio e alto com o usuário pelas exigências da legislação

australiana não seriam atingidos nem mesmo com as amostras pós-tratamento B e C (onde ainda permaneceu-se um resíduo de 516 ufc/100mL e 214 ufc/100 mL, respectivamente).

Com a amostra de água cinza submetida ao processo A, conseguiu-se somente 8,5% de remoção de amônia; após o processo B, obteve-se remoção de amônia de 15,5% e de 70,4% quando submeteu-se a amostra ao processo C de tratamento (Figura 33).

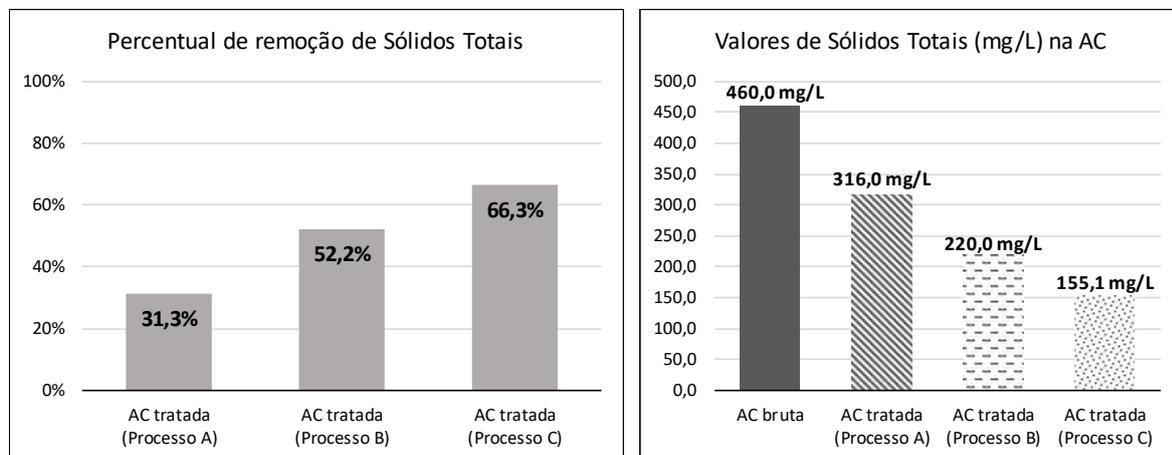
Figura 33: Percentual de remoção de amônia e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.



Fonte: Própria autora (2019).

Conforme mostram os gráficos da Figura 34, a amostra de água cinza bruta obteve remoção de Sólidos Totais (ST) de 31,3% quando submetida ao processo A de tratamento (somente filtração de areia), 52,2% de remoção quando submetida ao processo B de tratamento (coagulação, floculação, sedimentação e filtração em filtro de areia) e 66,3% de remoção quando submetida ao processo C de tratamento (coagulação, floculação, sedimentação, filtração em filtro de areia e filtração em filtro de carvão ativado).

Figura 34: Percentual de remoção de Sólidos Totais e valores finais deste parâmetro pós-tratamentos A, B e C.



Fonte: Própria autora (2019).

4.5. POTENCIAL DE REÚSO DE ÁGUAS CINZA DE LAVANDERIA TRATADAS

4.5.1. Enquadramento dos parâmetros da AC tratada a exigências para águas de reúso

A Tabela 21 mostra estimativas de valores de DBO₅ em função da DQO medida na AC tratada pelos processos A, B e C. Como a DBO₅ é um dos parâmetros exigidos por Ana *et al.* (2005) para enquadramento de água para uso não potável, e esse índice não foi medido nesta pesquisa, estimou-se o valor de DBO₅ em função do valor da DQO medida. Usou-se o indicado por Halasheh *et al.* (2008), que sugere que a relação DBO₅/DQO em águas cinza varia entre 0,31 e 0,71 e a indicação de Boyjoo *et al.* (2013), que afirma que essa relação em águas cinza é de 0,25.

Tabela 21: Estimativas de valor de DBO₅ da AC tratada em função da DQO medida.

Parâmetro	Observação	AC tratada Processo A	AC tratada Processo B	AC tratada Processo C
DQO	medido	142,0	75,3	29,4
DBO ₅	estimado conforme Boyjoo <i>et al.</i> (2013)	35,5	18,8	7,3
	estimado conforme Halalsheh <i>et al.</i> (2008)	44,0 a 100,8	23,3 a 53,5	9,1 a 20,8

Fonte: Própria autora.

Outro índice que não foi medido nesta pesquisa, mas que é um dos parâmetros de comparação estabelecidos pela ANA, é o Sólidos Dissolvidos Totais (SDT). Como eles são uma fração dos Sólidos Totais (ST) medidos, considerou-se para efeitos de enquadramento nas classes a comparação entre os parâmetros exigidos para SDT e os ST determinados nos ensaios de caracterização.

4.5.1.1. Enquadramento dos parâmetros pós-processo A às exigências da ABNT

Apresenta-se na Tabela 22 os resultados do tratamento de águas cinza de lavanderia pelo processo A e os valores exigidos para parâmetros de enquadramento de água à Classe 1 de reúso segundo a NBR 13969:1997 (ABNT, 1997), que prevê usos em lavagem de carros e outros usos com contato direto do usuário com a água. Os índices exigidos para coliformes fecais e pH

foram atendidos nesta amostra, porém os índices de turbidez, sólidos dissolvidos totais e cloro residual não se enquadraram nas exigências.

Tabela 22: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 1 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 1	Resultados pós-processo A	Observação
Turbidez (uT)	< 5	52,2	NÃO OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 200	ND	OK
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	< 200	316,0	NÃO OK * ¹
pH	6,0 a 8,0	6,9	OK
Cloro residual (mg/L)	0,5 a 1,5	0,1	OK * ²

ND - não detectado

*¹ Não foi medido o índice Sólido Dissolvido Total, porém foi medido o índice Sólidos Totais; como aquele é uma fração deste, usou-se para efeito de comparação de enquadramento com os SDT exigidos os ST determinados nos ensaios de laboratório.

*² - A própria NBR faz menção à necessidade de cloração antes do uso na Classe 1 para garantia desse índice

Fonte: Própria autora (2019).

Os valores dos índices da amostra pós-tratamento pelo processo A e os índices exigidos para enquadramento na Classe 2 segundo a ABNT, que prevê uso em lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins estão apresentados na Tabela 23. Nesse caso, somente o item Coliformes fecais foi atendido, não se enquadrando a turbidez e o cloro residual.

Tabela 23: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 2 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 2	Resultados pós-processo A	Observação
Turbidez (uT)	< 5	52,2	NÃO OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 500	ND	OK
Cloro residual (mg/L)	0,5 a 1,5	0,1	NÃO OK

ND - não detectado

Fonte: Própria autora (2019).

A Tabela 24 contém os resultados dos índices turbidez e coliformes fecais da amostra de água cinza após ter sido tratada pelo Processo A, e os valores destes índices para enquadramento na Classe 3 de reúso de água segundo a ABNT, que prevê nesta classe o uso em descargas de vasos sanitários. Neste caso, apesar de os índices de Coliformes fecais terem atendido o exigido, a turbidez ficou fora do padrão de enquadramento.

Tabela 24: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 3 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 3	Resultados pós-processo A	Observação
Turbidez (uT)	< 10	52,2	NÃO OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 500	ND	OK

ND - não detectado

Fonte: Própria autora (2019).

4.5.1.2. Enquadramento dos parâmetros pós-processo B às exigências da ABNT

Apresenta-se na Tabela 25 os resultados de caracterização da amostra de água cinza tratada pelo processo B confrontados com os índices exigidos para enquadramento na Classe 1 de reúso segundo a ABNT. Os índices turbidez, Coliformes fecais e pH enquadraram-se nas exigências, mas os sólidos dissolvidos totais não enquadraram-se. O cloro residual também não se enquadrou às exigências, porém no caso desse índice, há uma previsão na própria norma da necessidade de cloração antes de usos nesta classe.

Tabela 25: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 1 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 1	Resultados pós-processo B	Observação
Turbidez (uT)	< 5	1,5	OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 200	ND	OK
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	< 200	220,0	NÃO OK * ¹
pH	6,0 a 8,0	6,3	OK
Cloro residual (mg/L)	0,5 a 1,5	ND	OK * ²

ND - não detectado

*¹ Não foi medido o índice Sólido Dissolvido Total, porém foi medido o índice Sólidos Totais; como aquele é uma fração deste, usou-se para efeito de comparação de enquadramento com os SDT exigidos os ST determinados nos ensaios de laboratório.

*² - A própria NBR faz menção à necessidade de cloração antes do uso na Classe 1 para garantia desse índice.

Fonte: Própria autora (2019).

Na Tabela 26 estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da amostra de água cinza de lavanderia submetida ao processo B de tratamento e os índices para enquadramento desta água de reúso na Classe 2, segundo a NBR 13969:1997 da ABNT. O único item que não estaria enquadrado seria o cloro residual, pois não foi detectado na amostra, e é exigido para enquadramento nesta classe um residual entre 0,5 a 1,5 mg/L. Porém, considera-se o enquadramento possível, pois a própria norma prevê que a cloração seja efetuada antes dos usos previstos na Classe 2.

Tabela 26: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 2 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 2	Resultados pós-processo B	Observação
Turbidez (uT)	< 5	1,5	OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 500	ND	OK
Cloro residual (mg/L)	0,5 a 1,5	ND	OK * ¹

ND - não detectado.

*¹ - A própria NBR faz menção à necessidade de cloração antes do uso na Classe 2 para garantia desse índice.

Fonte: Própria autora (2019).

Considerando-se os resultados de índices avaliados na amostra de água cinza de água de lavanderia pós-tratamento com o processo B confrontados com os valores exigidos para

enquadramento na Classe 3 segundo a ABNT (Tabela 27), verifica-se que os mesmos estão enquadrados nas exigências. Considera-se, portanto, que a água cinza tratada com coagulação, floculação, sedimentação e filtração em filtro de areia estaria adequada ao uso em descargas de vasos sanitários, que é o uso previsto para essa classe.

Tabela 27: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 3 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 3	Resultados pós-processo B	Observação
Turbidez (uT)	< 10	1,5	OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 500	ND	OK

ND - não detectado

Fonte: Própria autora (2019).

4.5.1.3. Enquadramento dos parâmetros pós-processo C às exigências da ABNT

Na Tabela 28 apresentam-se valores dos índices exigidos para enquadramento de água de reúso da Classe 1 segundo a ABNT e os valores obtidos na caracterização de amostra de água cinza de lavanderia submetida a tratamento conforme processo C. Com exceção do cloro residual, que não foi detectado, mas deveria ter apresentado valores entre 0,5 e 1,5 mg/L, os demais índices atenderam as exigências: turbidez, Coliformes fecais, Sólidos Dissolvidos Totais e pH. Mas vale ressaltar que é previsto pela própria norma a cloração antes do uso na Classe 1 de reúso pela ABNT.

Tabela 28: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 1 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 1	Resultados pós-processo C	Observação
Turbidez (uT)	< 5	0,9	OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 200	ND	OK
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	< 200	155,1	OK* ¹
pH	6,0 a 8,0	6,5	OK
Cloro residual (mg/L)	0,5 a 1,5	ND	OK* ²

ND - não detectado

*¹ Não foi medido o índice Sólido Dissolvido Total, porém foi medido o índice Sólidos Totais; como aquele é uma fração deste, usou-se para efeito de comparação de enquadramento com os SDT exigidos os ST determinados nos ensaios de laboratório.

*² - A própria NBR faz menção à necessidade de cloração antes do uso na Classe 1 para garantia desse índice

Fonte: Própria autora (2019).

Os índices de turbidez e Coliformes fecais da amostra de água cinza de lavanderia pós-tratamento pelo Processo C enquadraram-se perfeitamente na Classe 2 de reúso segundo a ABNT. O índice Cloro residual apesar de não detectado, não impede esse enquadramento, pois a própria NBR menciona a necessidade de cloração antes do uso na Classe 2 (Tabela 29).

Tabela 29: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 2 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 2	Resultados pós-processo C	Observação
Turbidez (uT)	< 5	0,9	OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 500	ND	OK
Cloro residual (mg/L)	0,5 a 1,5	ND	OK ^{*1}

ND - não detectado

^{*1} - A própria NBR faz menção à necessidade de cloração antes do uso na Classe 2 para garantia desse índice

Fonte: Própria autora (2019).

Considerando-se os índices de turbidez e de Coliformes fecais exigidos para enquadramento na Classe 3 de reúso de água segundo a ABNT, a amostra de água cinza de lavanderia que foi submetida a tratamento pelo processo C enquadrou-se nos parâmetros exigidos, como mostra a Tabela 30.

Tabela 30: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 3 segundo a ABNT.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 3	Resultados pós-processo B	Observação
Turbidez (uT)	< 10	0,9	OK
Coliformes fecais (ufc/100 mL)	< 500	ND	OK

ND - não detectado

Fonte: Própria autora (2019).

4.5.1.4. Enquadramento dos parâmetros pós-processo A às exigências da ANA

A Tabela 31 contém os resultados da caracterização da amostra de água cinza pós-processo A e os parâmetros estipulados pela Ana *et al.* (2005) para enquadramento na Classe 1 de reúso, que é o uso para descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais (chafarizes, espelhos de água) e lavagem de veículos.

Os parâmetros turbidez e DBO₅ não se enquadraram nessa classe; já os valores obtidos para os parâmetros Coliformes fecais, pH, odor e aparência, amônia e SDT enquadram-se às exigências. Reforça-se com esse resultado a necessidade de mais uma etapa além da filtração em filtro de areia para que a água cinza de lavanderia possa ser enquadrada na classe 1 de reúso de água segundo indicações de Ana *et al.* (2005).

Tabela 31: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 1 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 1	Resultados pós-processo A	Observação
Coliformes fecais	não detectáveis	não detectado	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,9	OK
Turbidez (uT)	≤ 10	52,2	NÃO OK
Odor e aparência	não desagradáveis	não desagradáveis	OK
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1	-	NM
DBO ₅ (mg/L)	≤ 10	-	NÃO OK * ¹
Compostos orgânicos voláteis	Ausentes	-	NM
Nitrato (mg/L)	< 10	-	NM
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	≤ 20	6,5	OK
Nitrito (mg/L)	≤ 1	-	NM
Fósforo total (mg/L)	≤ 0,1	-	NM
Sólido suspenso total (SST) (mg/L)	≤ 5	-	NM
Sólido dissolvido total (SDT) (mg/L)	≤ 500	316,0	OK * ²

NM - não medido nesta pesquisa.

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 142 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 35,5 e 101 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), não se enquadrando na Classe 1 conforme Ana *et al.* (2005).

*² Não foi medido o índice Sólido Dissolvido Total, porém foi medido o índice Sólidos Totais; como aquele é uma fração deste, usou-se para efeito de comparação de enquadramento com os SDT exigidos os ST determinados nos ensaios de laboratório.

Fonte: Própria autora (2019).

Os resultados da caracterização da água cinza tratada pelo processo A e as exigências da ANA para enquadramento na Classe 2 de reúso, que são os usos para lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira estão dispostos na Tabela 32. Os parâmetros Coliformes fecais, pH, odor e aparência enquadraram-se a essa classe; os parâmetros Óleos e Graxas e Compostos orgânicos voláteis não foram medidos na amostra e, portanto, não puderam ser comparados diretamente. Obteve-se valores entre 35,5 e 101 mg/L como valores prováveis de DBO₅, superiores aos 30 mg/L exigidos, e portanto, considerou-se que a amostra tratada pelo processo A não se enquadra na Classe 2 de reúso segundo exigências da ANA.

Tabela 32: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 2 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 2	Resultados pós-processo A	Observação
Coliformes fecais	≤ 1000 ufc/mL	ND	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,9	OK
Odor e aparência	não desagradáveis	não desagradáveis	OK
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1	-	NM
DBO ₅ (mg/L)	≤ 30	-	NÃO OK * ¹
Compostos orgânicos voláteis	Ausentes	-	NM
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	≤ 30	-	NM

NM - não medido nesta pesquisa

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 142 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 35,5 e 101 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), não se enquadrando na Classe 2 conforme Ana *et al.* (2005).

Fonte: Própria autora (2019).

Na Tabela 33 apresenta-se os valores das características da amostra de água cinza tratada pelo processo A e as exigências da ANA para usos na Classe 3 de reúso, que é o uso em irrigação de áreas verdes e rega de jardins. Apesar de os índices para Coliformes fecais e pH atenderem

os limites propostos, a turbidez e a DBO₅ não se enquadraram, estando portanto, a amostra pós-processo A de tratamento fora do enquadramento na Classe 3 segundo a ANA.

Tabela 33: Resultados Processo A e enquadramento na Classe 3 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 3	Resultados pós-processo A	Observação
Coliformes fecais	≤ 200 ufc/100 mL	não detectáveis	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,9	OK
Turbidez (uT)	< 5	52,2	NÃO OK
DBO ₅ (mg/L)	< 20	-	NÃO OK * ¹
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	< 20	-	NM

NM - não medido nesta pesquisa

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 142 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 35,5 e 101 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), não se enquadrando na Classe 3 prevista em Ana *et al.* (2005).

Fonte: Própria autora (2019).

4.5.1.5. Enquadramento dos parâmetros pós-processo B às exigências da ANA

Na Tabela 34 apresentam-se os valores dos parâmetros da água cinza tratada pós tratamento pelo Processo B, e os parâmetros exigidos para enquadramento na Classe 1 de águas de reúso, que é o uso para descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais (chafarizes, espelhos de água) e lavagem de veículos. Dentre os parâmetros medidos, destaca-se que o que não se enquadrou foi a DBO₅. Considera-se, portanto, que a amostra pós-processo B não se enquadra na Classe 1 de reúso segundo a ANA.

Tabela 34: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 1 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 1	Resultados pós-processo B	Observação
Coliformes fecais	não detectáveis	não detectado	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,3	OK
Turbidez (uT)	≤ 10	1,5	OK
Odor e aparência	não desagradáveis	não desagradáveis	OK
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1	-	NM
DBO ₅ (mg/L)	≤ 10	-	NÃO OK * ¹
Compostos orgânicos voláteis	Ausentes	-	NM
Nitrato (mg/L)	< 10	-	NM
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	≤ 20	6,0	OK
Nitrito (mg/L)	≤ 1	-	NM
Fósforo total (mg/L)	≤ 0,1	-	NM
Sólido suspenso total (SST) (mg/L)	≤ 5	-	NM
Sólido dissolvido total (SDT) (mg/L)	≤ 500	220,0	OK * ²

NM - não medido nesta pesquisa

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 75,3 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 18,8 e 53,4 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), não se enquadrando na Classe 1 conforme Ana *et al.* (2005).

*² Não foi medido o índice Sólido Dissolvido Total, porém foi medido o índice Sólidos Totais; como aquele é uma fração deste, usou-se para efeito de comparação de enquadramento com os SDT exigidos os ST determinados nos ensaios de laboratório.

Fonte: Própria autora (2019).

Os resultados dos ensaios pós-processo B na amostra de água cinza e as exigências para o enquadramento na Classe 2 para reúso de água segundo a ANA estão apresentados na Tabela

35. Os índices obtidos para Coliformes fecais, pH, odor e aparência e DBO₅ foram enquadrados nas exigências. Apesar de os índices óleos e graxas e compostos orgânicos voláteis não terem sido medidos nesta pesquisa, considera-se a água cinza de lavanderia tratada com o processo B, enquadrada na classe que permite usos para lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira, pela condição de que todos os itens que foram medidos diretamente terem sido enquadrados.

Tabela 35: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 2 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 2	Resultados pós-processo B	Observação
Coliformes fecais	≤ 1000 ufc/mL	ND	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,3	OK
Odor e aparência	não desagradáveis	não desagradáveis	OK
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1	-	NM
DBO ₅ (mg/L)	≤ 30	-	NÃO OK * ¹
Compostos orgânicos voláteis	Ausentes	-	NM
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	≤ 30	-	NM

NM - não medido nesta pesquisa

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 75,3 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 18,8 e 53,4 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), enquadrando-se na Classe 2 conforme Ana *et al.* (2005).

Fonte: Própria autora (2019).

Na Tabela 36 estão indicados os parâmetros de enquadramento na Classe 3 segundo a ANA e os resultados de caracterização da AC pós-processo B, mostrando que apesar de atingidos os índices Coliformes fecais, pH e turbidez, a DBO₅ não se enquadrou nas exigências, não estando, portanto, essa água cinza tratada apta ao uso em irrigação de áreas verdes e rega de jardins.

Tabela 36: Resultados Processo B e enquadramento na Classe 3 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 3	Resultados pós-processo B	Observação
Coliformes fecais	≤ 200 ufc/100 mL	não detectáveis	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,3	OK
Turbidez (uT)	< 5	1,5	OK
DBO ₅ (mg/L)	< 20	-	NÃO OK * ¹
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	< 20	-	NM

NM - não medido nesta pesquisa

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 75,3 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 18,8 e 53,4 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), enquadrando-se na Classe 2 conforme Ana *et al.* (2005).

Fonte: Própria autora (2019).

4.5.1.6. Enquadramento dos parâmetros pós-processo C às exigências da ANA

Os resultados da amostra de água cinza tratada no processo C, que consistiu na coagulação, floculação e sedimentação seguida de filtragem em filtro de areia e posterior

filtragem em filtro de carvão, estão apresentados na Tabela 37, como também os parâmetros exigidos para enquadramento na Classe 1 de águas de reúso segundo a ANA. Alguns dos parâmetros exigidos pela ANA não foram medidos nesta pesquisa, como óleos e graxas, compostos orgânicos voláteis, nitrato, nitrito e fósforo total. Os parâmetros coliformes fecais, pH, turbidez, odor e aparência e amônia estão enquadrados nesta classe, porém o DBO₅ não ficou ajustado ao valor limite prescrito. Considera-se, portanto, que a AC tratada pelo processo C não se enquadrou às exigências da Classe 1 prevista pela ANA.

Tabela 37: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 1 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 1	Resultados pós-processo C	Observação
Coliformes fecais	não detectáveis	não detectado	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,5	OK
Turbidez (uT)	≤ 10	0,9	OK
Odor e aparência	não desagradáveis	não desagradáveis	OK
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1	-	NM
DBO ₅ (mg/L)	≤ 10	-	NÃO OK * ¹
Compostos orgânicos voláteis	Ausentes	-	NM
Nitrato (mg/L)	< 10	-	NM
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	≤ 20	2,1	OK
Nitrito (mg/L)	≤ 1	-	NM
Fósforo total (mg/L)	≤ 0,1	-	NM
Sólidos Suspensos totais (SST) (mg/L)	≤ 5	-	NM
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L)	≤ 500	155,1	OK * ²

NM - não medido nesta pesquisa

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 29,4 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 7,4 e 20,9 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), não se enquadrando na Classe 1 conforme Ana *et al.* (2005).

*² Não foi medido o índice Sólido Dissolvido Total, porém foi medido o índice Sólidos Totais; como aquele é uma fração deste, usou-se para efeito de comparação de enquadramento com os SDT exigidos os ST determinados nos ensaios de laboratório.

Fonte: Própria autora (2019).

De acordo com a Tabela 38, os índices de comparação direta da amostra de água cinza tratada pelo processo C ficaram perfeitamente ajustados ao exigido pela ANA para enquadramento na Classe 2. O índice de comparação indireta (DBO₅) também enquadrou-se ao valor exigido. Apesar de terem tido índices que não foram diretamente medidos nesta pesquisa, possibilitando comparações diretas, considerou-se alguns enquadramentos: o índice óleos e graxas não interfere nesse enquadramento por ser esse índice específico para medições de poluição por roupas provenientes de graxarias, oficinas ou laticínios; o índice SST foi considerado como diretamente ligado à turbidez e a turbidez alcançada pela amostra tratada pelo processo C foi de 0,9 uT. Por isso enquadrou-se esta amostra às exigências da Classe 2 da ANA.

Tabela 38: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 2 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 2	Resultados pós-processo C	Observação
Coliformes fecais	≤ 1000 ufc/mL	ND	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,5	OK
Odor e aparência	não desagradáveis	não desagradáveis	OK
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1	-	NM
DBO ₅ (mg/L)	≤ 30	-	OK * ¹
Compostos orgânicos voláteis	Ausentes	-	NM
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	≤ 30	-	NM

NM - não medido nesta pesquisa

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 29,4 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 7,4 e 20,9 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), enquadrando-se na Classe 2 conforme Ana *et al.* (2005).

Fonte: Própria autora (2019).

A Tabela 39 contém as exigências de enquadramento de água de reúso na Classe 3 segundo a ANA e os resultados obtidos na caracterização de amostra de água cinza de lavanderia submetida a tratamento conforme Processo C descrito nesta pesquisa. A amostra pós-processo C não estaria perfeitamente enquadrada na Classe 3 por uma pequena diferença no valor máximo previsto para DBO₅ em relação ao valor máximo permitido. Mas considerou-se que o valor máximo previsto (20,9 mg/L) está muito próximo do valor máximo exigido para a DBO₅. Os parâmetros Coliformes fecais, pH e turbidez estão enquadrados. Salienta-se que os Sólidos Suspensos Totais não foram medidos nesta pesquisa, mas considera-se esse índice ligado ao de turbidez, e esta amostra alcançou uma remoção de turbidez de 99,3%. Admitiu-se então que os SST também apresentariam uma remoção satisfatória quando submetidos a esse processo, e por isso considerou-se a amostra tratada pelo processo C enquadrada na Classe 3 da ANA.

Tabela 39: Resultados Processo C e enquadramento na Classe 3 segundo a ANA.

Parâmetros	Enquadramento na Classe 3	Resultados pós-processo C	Observação
Coliformes fecais	≤ 200 ufc/100 mL	não detectáveis	OK
pH	entre 6,0 e 9,0	6,5	OK
Turbidez (uT)	< 5	0,9	OK
DBO ₅ (mg/L)	< 20	-	OK * ¹
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	< 20	-	NM

NM - não medido nesta pesquisa

*¹ Não foi medido DBO₅, mas foi medido DQO = 29,4 mg/L; prevê-se portanto DBO₅ entre 7,4 e 20,9 mg/L, conforme Halalshah *et al.* (2008) e Boyjoo *et al.* (2013), enquadrando-se na Classe 2 conforme Ana *et al.* (2005), por ter sido o limite superior provável muito próximo ao máximo permitido

Fonte: Própria autora (2019).

4.5.2. Resumo dos enquadramentos possíveis da AC tratada – legislação nacional

A Tabela 40 apresenta um resumo dos enquadramentos possíveis da AC tratada proveniente de lavanderia segundo os processos A, B e C às classes de reúso definidas pela ABNT e pela ANA.

Tabela 40: Resumo dos enquadramentos da AC tratada às classes de reúso previstas pela ANA e pela ABNT.

Classes de reúso	Processos de tratamento			Descrição do uso para cada uma das classes	
	A	B	C		
NBR 13.969:1997	Classe 1	não turbidez e SDT	não SDT	OK	Lavagem de carros e outros usos com contato direto do usuário com a água
	Classe 2	não turbidez e CR	OK	OK	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins
	Classe 3	não turbidez	OK	OK	Reúso nas descargas dos vasos sanitários
ANA <i>et al.</i> (2005)	Classe 1	não turbidez e DBO ₅	não DBO ₅	não DBO ₅	Descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais; lavagem de veículos
	Classe 2	não DBO ₅	não DBO ₅	OK	Lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira
	Classe 3	não turbidez e DBO ₅	não DBO ₅	OK	Irrigação de áreas verdes e rega de jardins

não - não enquadrado na classe de reúso

OK - enquadrado na classe de reúso

Fonte: Própria autora (2019).

Para a classe 1 de reúso da NBR 13969:1997, que prevê usos em lavagem de carros e outros usos em contato direto do usuário com a água, somente a amostra tratada pelo processo C foi enquadrada. Já para a Classe 2 dessa norma, que prevê o uso em lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins e para a Classe 3, que prevê o uso nas descargas dos vasos sanitários, enquadraram-se as amostras de água cinza tratadas pelos processos B e C.

Nenhuma das amostras de água cinza tratada enquadraram-se nas exigências da Classe 1 da ANA, que prevê o uso em descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais e lavagem de veículos. Já para a Classe 2, que prevê lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira e para a Classe 3, que prevê o uso em irrigação de áreas verdes e rega de jardins, somente a amostra tratada pelo processo C enquadrou-se nas exigências da ANA.

4.5.3. Considerações sobre possíveis enquadramentos em legislações internacionais

Conforme discutido no item 2.3.2. Regulamentações internacionais da prática de reúso, muitos países possuem legislação de regulação de prática de reúso. Normalmente definem alguns possíveis usos e as exigências de índices para determinados parâmetros.

Apresenta-se na Tabela 41 a comparação entre os índices obtidos nas águas cinza tratadas pelos processos A, B e C e as exigências da legislação canadense para uso em descargas sanitárias, a qual estabelece valores médios e também valores máximos para cada um dos índices.

A DBO₅, para a qual a legislação canadense estabelece limite máximo de 20 mg/L não foi diretamente medida nesta pesquisa, mas como obteve-se o parâmetro DQO, fez-se uma relação DBO₅/DQO conforme indicações apresentadas na Tabela 21, página 80.

Tabela 41: Comparações entre AC tratada e exigências de enquadramento do Canadá.

Parâmetro	Unidade	Média	Máxima	AC tratada Processo A	AC tratada Processo B	AC tratada Processo C
DBO ₅	(mg/L)	≤ 10	≤ 20	NM	NM	NM
Sólidos Suspensos	(mg/L)	≤ 10	≤ 20	NM	NM	NM
Turbidez	(uT)	≤ 2	≤ 5	52,2	1,5	0,9
Coliformes termotolerantes	(ufc/100 mL)	ND	≤ 200	818	516	214
<i>E. coli</i>	(ufc/100 mL)	ND	≤ 200	ND	ND	ND
Cloro residual	(mg/L)	≥ 0,5	≥ 0,5	0,1	ND	ND

ND - Não detectado

NM - Não medido

Fonte: Própria autora (2019).

Verifica-se que a DBO₅ estimada na AC tratada pelos processos A, B e C não atende os índices exigidos, sendo que somente a AC tratada pelo processo C obteve índices de DBO₅ estimados (7,3 a 20,8) bem próximos ao exigido como índice máximo (≤ 20).

Os Sólidos Suspensos também não foram diretamente medidos nesta pesquisa, mas como considera-se que este índice está relacionado à turbidez da AC, admite-se que os tratamentos propostos pelos processos B e C seriam suficientes para atender este índice.

A turbidez média exigida (≤ 2) foi alcançada pela AC tratada pelos processos B e C, mas a AC tratada pelo processo A não atingiu o índice necessário para enquadramento neste possível reúso.

Os coliformes termotolerantes também não atingiram o índice exigido, apesar de que o índice para *E. coli* foi atingido pela AC tratada por todos os processos.

E o cloro residual, apesar de não atingido, considera-se esse um item de fácil correção, pois a cloração é indicada em praticamente todas as finalizações de tratamento de águas cinza para reúso.

Considera-se, portanto, que pela legislação canadense, a AC de lavanderia de Palmas, tratada pelo Processo C estaria bastante próxima a atender todas as exigências, bastando para isso um ajuste na DBO₅ e na remoção de coliformes termotolerantes.

Apresenta-se na Tabela 42 as exigências do estado do Arizona (EUA) para os parâmetros da água cinza reciclada indicada ao uso doméstico e urbano. Verifica-se que são somente dois índices de interesse, e os mesmos seriam alcançados pela AC tratada pelos processos B e C, sendo que a AC tratada somente com a filtração em filtro de areia não estaria adequada ao uso doméstico e urbano considerando a legislação do Estado do Arizona.

Tabela 42: Comparações entre AC tratada e exigências de enquadramento no estado do Arizona - EUA.

Parâmetro	Unidade	Valor	AC tratada Processo A	AC tratada Processo B	AC tratada Processo C
Turbidez	(uT)	< 2	52,2	1,5	0,9
<i>E. coli</i>	(ufc/100 mL)	ND	ND	ND	ND

Fonte: Própria autora (2019).

Também no Estado da Califórnia as exigências para liberação do uso doméstico e urbano de AC reciclada limitam-se aos índices turbidez e *E. coli*, e os mesmos estariam atendidos também pela AC tratada pelos processos B e C, uma vez que os índices naquele estado são ainda menos exigentes que o do Arizona.

Considerando as exigências da legislação do estado da Carolina do Norte nos EUA (Tabela 43), verifica-se que a DBO₅ seria um índice que não permitiria o enquadramento da AC tratada, exceto se confirmasse a relação DBO₅/DQO para essa AC como sendo o parâmetro proposto por Boyjoo *et al.* (2013), conforme Tabela 21, página 80. Nesse caso, a AC tratada pelo processo C poderia ter a DBO₅ enquadrada nesta exigência.

Tabela 43: Índices da AC tratada e exigências no estado da Carolina do Norte – EUA para reúso de água cinza.

Parâmetro	Unidade	Média	AC tratada Processo A	AC tratada Processo B	AC tratada Processo C
DBO ₅	(mg/L)	≤ 10	NM	NM	NM
Sólidos Suspensos	(mg/L)	≤ 5	NM	NM	NM
Turbidez	(uT)	< 10	52,2	1,5	0,9
<i>E. coli</i>	(ufc/100 mL)	< 14	ND	ND	ND

Fonte: Própria autora (2019).

A turbidez estaria atendida pela AC tratada pelos processos B e C, o que indicaria um atendimento também do índice sólidos suspensos, apesar de este não ter sido medido diretamente nesta pesquisa. Já a AC tratada pelo processo A não atenderia esse parâmetro. E o índice de *E. coli* também estaria alcançado pela água cinza tratada por quaisquer dos processos. Percebe-se, portanto, que para atender a legislação da Carolina do Norte, a preocupação seria com um processo que removesse um pouco mais de DBO₅, uma vez que o processo de coagulação/floculação e sedimentação, e posterior filtragem em série de filtro de areia e filtro de carvão ativado seriam suficientes para atingimento dos índices exigidos.

No geral, o órgão ambiental dos Estados Unidos (USEPA) sugere que a água cinza que tiver sido tratada por coagulação química, filtração e desinfecção pode ser utilizada em irrigações, descargas sanitárias e lavagem de veículos.

Esses enquadramentos da AC tratada às exigências internacionais são interessantes de ser feitas pois servem de parâmetro de comparação em caso de elaboração de legislação local de regulamentação do uso de águas cinza recicladas.

5. CONCLUSÕES

- O volume mensal de águas cinza gerado pelas principais lavanderias de Palmas, incluindo neste volume lavanderias comerciais e lavanderias de hotéis, é de aproximadamente 4.150m³;
- A água cinza proveniente de lavanderia é passível de reúso, porém precisa ser submetida a tratamento antes da reutilização, pois suas características quando ainda em estado bruto não se enquadram em exigências de legislações ambientais para usos não potáveis;
- A água cinza tratada somente em filtração em filtro de areia não se enquadraram em classes de reúso previstas pela ANA e pela ABNT;
- A água cinza de lavanderia quando submetida ao tratamento químico de coagulação / floculação / sedimentação e posterior filtração em filtro de areia apresentou índices que a enquadram nas classes 2 e 3 de reúso da ABNT;
- A água cinza tratada com coagulação / floculação / sedimentação, e filtração em filtro de areia não se enquadraram em classes de reúso previstas pela ANA;
- A água cinza de lavanderia quando submetida a filtração em série de filtro de areia e filtro de carvão ativado apresentou índices que a enquadram nas classes 1, 2 e 3 da ABNT e nas Classes 2 e 3 da ANA.

6. REFERÊNCIAS

ABEDIN, S. B.; RAKIB, Z. B. *Generation and Quality Analysis fo Greywater at Dhaka City. Environmental Research, Engineering and Management*, v. 64, n. 2, p. 29-41, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público, Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13969**: Tanques Sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final de efluentes líquidos - Projeto, Construção e Operação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 5626**: Instalação Predial de Água Fria. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 11799**: Material filtrante - Areia, antracito e pedregulho – Especificação. Rio de Janeiro, 2016.

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.

ALMEIDA, J. S. M.; ROCHA, N. R. A. F.; FRANCO Jr., M. R. **Tratamento de água cinza para redução da contaminação de corpos d'água**. II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), São Paulo-SP, 2013.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21 ed., Washington, DC, 2005.

ANA; FIESP; SINDUSCON-SP. **Conservação e reúso de água em edificações**. São Paulo: Prol Editora Gráfica, 2005.

ANGELAKIS, A. N.; SNYDER, S. A. *Wastewater treatment and reuse: past, present, and future. Water*, v. 7, 2015. DOI:10.3390/w7094887.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE REUTILIZACIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA (ASERSA). *Spanish Regulations for Water Reuse – Royal Decree 1620/2007*. Universitat Politècnica de Catalunya, UPC. Madrid, Spain, 2011.

AUSTRALIA. *Code of Practice for the Reuse of Greywater in Western Australia 2010*. State of Western Australia. Perth: Department of Health, 2015.

BARACUHY, V. S.; PEREIRA, J. P. G.; FERREIRA, A. C.; SILVA, V. F.; NICOLA, S. **Eficiência na remoção de coliformes em águas cinza através da fotorremediação. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, 2015.

BAZZARELLA, B. B. **Caracterização e aproveitamento de águas cinza para uso não potável em edificações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2005.

BIRKS, R.; HILLS, S. *Characterisation of indicator organisms and pathogens in domestic greywater for recycling*. ***Environmental Monitoring and Assessment***, 129, p. 61-69. 2007.

BOYJOO, Y.; Pareek V. K.; ANG M.. *A review of greywater characteristics and treatment processes*. ***Water Science & Technology*** 67, p. 1403-1424, 2013.

BRASIL - Ministério da Saúde (MS). **Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990**. Estabelece normas e padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília – DF, 1980.

BRASIL - Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília-DF, 1981.

BRASIL - Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília-DF, 1997.

BRASIL - Ministério do Meio Ambiente (MMA) - Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). **Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005**. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água. Brasília – DF, 2005.

BRASIL – Ministério da Saúde (MS) – Fundação Nacional de Saúde (FNS). **Manual Prático de Análise de Água**. 4 ed., Brasília-DF, 2013.

BRASIL - Ministério da Saúde (MS). **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Anexo XX - Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília – DF, 2017.

CAMPOS, J. R.; DI BERNARDO, L. **Ensaio de floculação**. São Carlos-SP, SHS - EESC. In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Salvador-BA, 1975.

CASAS, A. L. **Tratamento de efluentes Industriais utilizando a radiação ionizante de acelerador industrial de elétrons e por adsorção com carvão ativado: estudo comparativo**. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear), IPEN, Universidade de São Paulo – USP, 2004.

CHRISTOVA-BOAL, D.; EDEN, R. E.; MCFARLANE, S. *An investigation into greywater reuse for urban residential properties*. ***Desalination***. v. 106, n. 1-3, p. 391-397, 1996.

CIOFU, F. **Activated carbon (charcoal) obtaining. Application. Fiability & Durability Supplement nº 1/2015**. Editura “Academicca Brâncusi”, Târgu Jiu, 2015.

CURITIBA, Prefeitura Municipal. **Lei nº 10785**. Cria no Município de Curitiba-PR, o Programa de Conservação e Uso Racional da Água de Edificações. Curitiba-PR, 2003.

DIAS, A. B. Procedimentos Operacionais Padrão da Lavanderia Cristal. Palmas-TO, 2016

DI BERNARDO, L. (coordenador). **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), EESC/USP, UFC, UnB, Unicamp, UFSC. São Carlos-SP, 2003.

DRISCOLL JR., C. T.; LETTERMAN, R. D.; FITCH, D. E. **Residual Aluminum in filtered water**. *AWWA – American Water Works Association*. Denver, 1987.

EDWIN, G. A.; GOPALSAMY, P.; MUTHU, N. *Characterization of domestic gray water from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review*. **Appl Water Science**, 2014. DOI: 10.1007/s13201-013-0128-8.

ENVIRONMENT PROTECTION AUTHORITY VICTORIA (EPA VICTORIA). **Code of practice – onsite wastewater management**. Carlton Victoria, Australian, 2016. Disponível em: <http://epa.vic.gov.au>. Acesso em: 05 outubro 2019.

ERIKSSON, E; AUFFARTH, K.; MOGENS, H.; LEDIN, A. *Characteristics of grey wastewater*. **Urban Water**. v. 4, n. 1, p. 85-104, 2002.

ESPÍRITO SANTO. **Lei nº 9439**: Dispõe sobre a obrigatoriedade dos postos de combustíveis, lava-jatos, transportadoras, empresas de ônibus e locadoras de veículos instalarem equipamentos de tratamento e reutilização da água usada na lavagem de veículos. Vitória-ES, 2010. Disponível em: <https://al.es.gov.br/legislação>.

FERREIRA, A. C. Unidade de produção agrícola irrigada com águas cinza de lavanderia pública no semiárido paraibano. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2013.

FIORI, S.; FERNANDES, V. M. C; PIZZO, H. Avaliação qualitativa e quantitativa do reúso de águas cinza em edificações. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 1, p. 19-30. Porto Alegre-RS, 2006.

GONÇALVES, R. F. **Uso Racional da Água em Edificações – Tecnologias de segregação e tratamento de esgotos domésticos na origem, visando a redução do consumo de água e da infraestrutura de coleta, especialmente nas periferias urbanas**. PROSAB, Vitória – ES, 2006.

HALALSHEH, M; DALAHMEH, S; SAYED, M.; SULEIMAN, W.; SHAREEF, M.; MANSOUR, M.; SAFI, M. *Greywater characteristics and treatment options for rural areas in Jordan*. **Bioresource Technology**, v. 99, issue 14, p. 6635-6641, 2008.

HEALTH CANADA. *Canadian guidelines for domestic reclaimed water for use in toilet and urinal flushing*. Ottawa, Ontario, Canadá, 2010.

HESPANHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. *Revista Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 131-158, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 24512. *Activities relating to drinking water and wastewater services: guidelines for the management of drinking water utilities and for the assessment of drinking water services*. ISO TC 224, 2007. 54p.

LAMBE, J. S.; CHOUGULE, R. S. *Greywater – Treatment and Reuse*. In: *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*. p. 20-26, Nagpur, Maharashtra, 2009.

LANGERGRABER, G.; MUELLEGGER, E. *Ecological Sanitation - a way to solve global sanitation problems?* *Environment International*. v. 31, n. 3, 2005. p. 433- 444.

LAZAROVA, V.; HILLS, S; BIRKS, R. *Using recycled water for non-potable, urban uses: a review with particular reference to toilet flushing*. *Water Science and Technology: Water Supply*. v. 3, n. 4, pp. 69-77, 2003.

LI, F.; WICHMANN, K; OTTERPOHL, R. *Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses*. *Science of the Total Environment*, v. 407, Issue 11, p. 3439-3449, 2009.

LI, Z.; BOYLE, F; REYNOLDS, A. *Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland*. *Desalination*, 260, p. 1-8, 2010.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3ª ed., Campinas-SP: Editora Átomo, 2010.

LÔBO, R. N. **Degradação térmica de podas de árvores visando a obtenção de carvão para utilização como leito filtrante no tratamento de águas cinza**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, IFTO, Palmas-TO, 2019.

MARINGÁ, Prefeitura Municipal. **Lei nº 6345 – Institui o Programa de Reaproveitamento de Água de Maringá**, 2003. Disponível em:

<<https://leismunicipais.com.br/a/pr/m/maringa/lei-ordinaria/2003/634/6345>>. Acesso em 08 outubro 2019.

MAY, S. **Caracterização, tratamento e reúso de águas cinza e aproveitamento de águas pluviais em edificações**. Tese (Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2009.

MOHAMED, W. A. *Grey Water Recycling & Reuse. Egyptian-German Private Sector Development Programme (PSDP)*, Cairo-Egypt, 2011.

NITEROI, Prefeitura Municipal. **Lei nº 2856**: Estende as obrigações da Lei nº 2630, de 2009, instituindo mecanismos de estímulo à instalação de sistema de coleta e reutilização de águas servidas em edificações públicas e privadas. Niterói-RJ, 2011.

OTTERPOHL, R. *Black, brown, yellow, grey – the new colours of sanitation. Water* 21, p. 37-41, 2001.

PAULA, H. M. **Uso de suspensões preparadas com sementes de moringa oleífera associada a coagulantes químicos no tratamento da água residuária de usinas de concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2014.

PAULA, H. M.; FERNANDES, C. E. Otimização do tratamento de água cinza a partir do uso combinado de coagulantes químicos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 5, Rio de Janeiro-RJ, 2018.

PEDROZA, M. M.; GOMES, M. C. F. de A.; PAZ, E. C. da S.; PEDROSA, A. L.; VIEIRA, G. E. G.; SOARES, J. E. M. Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos em Processo de Pirólise, **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, Rio de Janeiro-RJ, 2017.

PEPRAH, M. O.; ACHEAMPONG, M. A.; VRIES, N. K. *Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception - a Review. US National Library of Medicine – National Institute of Health*, 2018. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6133124/>>. Acesso em: 08 outubro 2019.

RAMPELOTTO, G. **Caracterização e Tratamento de Águas cinza visando reúso doméstico**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFSM – Universidade Federal de Santa Maria). Santa Maria – RS, 2014.

RAPOPORT, B. **Águas cinza: caracterização, avaliação financeira e tratamento para reúso domiciliar e condominial**. Dissertação de Mestrado. Fundação Oswaldo Cruz – Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro – RJ, 2004.

REIS, F. A. G. V; KUHN, C, E. S.; FIGUEIRA, R. M. **A geologia na construção e desenvolvimento sustentável do Brasil**. 1 ed. São Paulo-SP: FEBRAGEO, 2019.

REVITT, M. ERIKSSON, E. DONNER, E. *The implications of household greywater treatment and reuse for municipal wastewater flows and micropollutant loads. Water Research*, v. 45, issue 4, 2011, p. 1549-1560.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada**. São Paulo-SP: Editora Blucher, 2003.

RIDDERSTOLPE, P. *Introduction to greywater management*. EcoSanRes Publication Series. Stockholm Environment Institute, Stockholm, 2004.

RODRIGUES, C. R. **Degradação térmica da casca de arroz e utilização do carvão obtido no processo para polimento de águas cinza**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental), UFT, Palmas-TO, 2019.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos**. Campinas-SP: Cárita Editora, 2005.

RODRIGUES, M. I.; COSTA, P. *Protimiza Experimental Design*. Software. Campinas-SP, 2014. <<http://experimental-design.protimiza.com.br>>

SANTANA, E. A. **Desenvolvimento de um sistema de filtragem para tratamento de água cinza visando o seu reúso**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola). Viçosa-MG, 2013.

SANT'ANA, D. R. (coordenador). **Aproveitamento de águas pluviais e reúso de águas cinza em edificações: padrões de qualidade, critérios de instalação e manutenção**. Relatório Final 1/2017. Universidade de Brasília – Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico. Brasília – DF, 2017.

SIDIBE, M. *Comparative study of bark, bio-char, activated charcoal filters for upgrading grey-water: from a hygiene aspect*. Soil and Water Management – Master's Program. Sweden, Europe: SLU/Dept. of Energy and Technology, 2014.

SISTEMA INTEGRADO DE NORMAS JURÍDICAS DO DF (SINJ-DF). **Lei n. 5890 de 12/06/2017: Estabelece diretrizes para as políticas públicas de reúso da água no Distrito Federal**. Brasília – DF, 2017. Disponível em: <https://sinj.df.gov.br>

SOLDERA, B. C. **Água compensável (AC): definição de um novo indicador ambiental**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente – Instituto de Geociências e Ciências Exatas) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro-SP. 2017.

SOSTAR-TURK, S.; PETRINIC, I.; SIMONIC, M. *Laundry Wastewater Treatment Using Coagulation and Membrane Filtration*. **Resources Conservation and Recycling**. p. 185-196, 2005.

TEODORO, A.; BONCZ, M. A.; PAULO, P. L.; MACHULEK Jr. A. Desinfecção de água cinza por fotocatalise heterogênea. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, Rio de Janeiro-RJ, 2017.

TOCANTINS – Instituto Natureza do Tocantins. **Instrução Normativa 003/2019**, 2019. Disponível em: <http://naturatins.to.gov.br/protocolo-e-servicos/legislacao/estadual/portarias-e-instrucoes>. Acesso em: 12/10/2019.

TONETTI, A. L.; CORAUCCI FILHO, B.; STEFANUTTI, R.; FIGUEIREDO, R. F.; SÃO PEDRO, C. C. O. Remoção de matéria orgânica, coliformes totais e nitrificação no tratamento de esgotos domésticos por filtros de areia. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 10, n. 3, p. 209-218, 2005.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). UNDP Support to the implementation of sustainable development Goal 6 – Sustainable management of water and sanitation, New York, 2017. Disponível em: <http://undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals/>. Acesso em: 05 outubro 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Guidelines for Water Reuse. EPA/600/R-12/618, Washington-DC, 2012.
Disponível em: <http://www.waterreuseguidelines.org>. Acesso em: 03 outubro 2019.

VARGAS, G. D. L. P. **Tratamento terciário de esgoto sanitário através de processos oxidativos avançados para a obtenção de águas de reúso.** Tese de Doutorado em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), Florianópolis-SC, 2008.

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. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** v. 1, 3 ed. Belo Horizonte-MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- DESA. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, 452 p., 2005.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). The United Nations World Water Development Report 2015: Water and Sustainable World. Paris, UNESCO, 2015.