



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

MATHEUS ROSENO VILIANO SANTOS

**REMOÇÃO DE DQO E TURBIDEZ ÁGUAS CINZAS PROVENIENTE DE MÁQUINA
DE LAVAR ROUPAS ATRAVÉS DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO QUÍMICA**

**PALMAS
2022**

MATHEUS ROSENO VILIANO SANTOS

**REMOÇÃO DE DQO E TURBIDEZ ÁGUAS CINZAS PROVENIENTE DE MÁQUINA
DE LAVAR ROUPAS ATRAVÉS DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO QUÍMICA**

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

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S237r Santos, Matheus Roseno Viliano Santos
Remoção de DQO e Turbidez de Águas Cinzas proveniente de
máquina de lavar roupas através do processo de coagulação
química. / Matheus Roseno Viliano Santos Santos. – Palmas, TO,
2022.

43 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2022.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Água cinza. 2. Demanda Química de Oxigênio. 3. Turbidez. I.
Pedroza, Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

MATHEUS ROSENO VILIANO SANTOS

REMOÇÃO DE DQO E TURBIDEZ ÁGUAS CINZAS PROVENIENTE DE MÁQUINA DE LAVAR ROUPAS ATRAVÉS DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO QUÍMICA

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

Aprovado em: 08 /04 / 2022

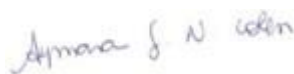
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador (IFTO)



Prof. Me. Michelle Ludmila Guedes dos Santos (IFTO)



Prof. Me. Aymara Gacielly Nogueira Colen (ITOP)

RESUMO

Uma crescente problemática que vem ganhando espaço é a questão envolvida o uso exagerado da água e a sua finitude. A quantidade de água utilizada diariamente, seja em uso de residências, de processos de irrigação e demais formas, tem tomado proporções preocupantes, visto que se não forem corretamente gerenciados, esses usos podem resultar em uma escassez da água no meio ambiente, e assim para os próprios seres humanos, sendo necessária à busca por novas tecnologias para permitir a reutilização desse recurso e evitar o seu desperdício. A água cinza é a água servida em residências, escritórios e edificações verticais. É a água residuária proveniente do uso de lavatórios, chuveiros, banheiras, pias de cozinha, máquina de lavar roupa e tanque. Este trabalho teve como objetivo estudar a remoção de Demanda Química de Oxigênio e a Turbidez de águas cinzas empregando o processo de coagulação química. Esse processo foi feito através da utilização de coagulante químico que permite caracterizar a água cinza e estimar a remoção de DQO de água cinza através da coagulação química. A caracterização das amostras permitiu observar: a temperatura, o pH, a DQO, a condutividade, os sólidos totais, os sólidos fixos, os sólidos voláteis, a alcalinidade, a turbidez e cloretos. O ensaio de coagulação/floculação/decantação foi feito com o equipamento Jarrest (Milan®, modelo JT-203/6) com seis cubas e foi empregado como agente coagulante a solução de policloreto de alumínio (PAC) 1 %. Com esse ensaio foi verificado através do Planejamento Composto Central Rotacional o efeito da dosagem de coagulante e do tempo de sedimentação na remoção de DQO e turbidez de água cinza em teste de coagulação química em Jarrest. Obtiveram-se bons resultados de remoção desses dois parâmetros, permitindo o enquadramento da AC na classe 2 de referência do Ana el at. e nas classes 3 e 4 da ABNT 13969. Como resultado final conseguiu-se alcançar a eficiência de remoção de 95,45% de Turbidez e de 72,40% de DQO.

Palavras-chave: Água cinza, Demanda Química de Oxigênio, Coagulantes Químicos, Planejamento Fatorial Fracionado, Planejamento Composto Central Rotacional

ABSTRACT

A growing issue that has been gaining ground is the issue involved in the exaggerated use of water and its finiteness. The amount of water used daily, whether in use in homes, irrigation processes and other forms, has taken on worrying proportions, since if not properly managed, these uses can result in a shortage of water in the environment, and so for human beings themselves, being necessary to search for new technologies to allow the reuse of this resource and avoid its waste. Gray water is wastewater in homes, offices and vertical buildings. It is wastewater from the use of washbasins, showers, bathtubs, kitchen sinks, washing machine and tank. This work aims to study the removal of Chemical Oxygen Demand from greywater using different chemical coagulants. This process will be done through the use of chemical coagulants that allowed to characterize the gray water and estimate the removal of COD from gray water through chemical coagulation. The characterization of the samples allows observing: temperature, pH, DQO, conductivity, total solids, fixed solids, volatile solids, alkalinity, turbidity and chlorides. The coagulation/flocculation/decantation assay was carried out with a Jartest equipment (Milan®, model JT-203/6) with six vats and 1% polyaluminium chloride (PAC) solution was used as a coagulating agent. With this test, the effect of coagulant dosage and settling time on the removal of DQO and gray water turbidity in a chemical coagulation test in Jarteste was verified through the Central Composite Rotational Planning. Good results were obtained in removing these two parameters, allowing the GW to be framed in the Ana el at reference class 2. and in classes 3 and 4 of ABNT 13969. As a final result, a removal efficiency of 95.45% of Turbidity and 72.40% of DQO was achieved.

Keywords: Greywater, chemical oxygen demand, chemical coagulants, fractional factorial planning, central composite planning

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Padrões de qualidade de água por classe de uso não potável segundo ANA et al. (2005).....	20
Tabela 2	Padrões de qualidade de água por classe de uso não potável segundo a NBR 13969:1997.....	21
Tabela 3	Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a coagulação química de água cinza.....	24
Tabela 4	Ordem dos experimentos empregados no planejamento experimental DCCR.....	24
Tabela 5	Métodos analíticos aplicados na caracterização físico-química de AC bruta e após tratamento por coagulação química.....	25
Tabela 6	Caracterização físico-química de água cinza bruta.....	28
Tabela 7	Caracterização da AC bruta e outras pesquisas em AC de máquinas de lavar.....	28
Tabela 8	Resultado da Turbidez e DQO após DCCR.....	30
Tabela 9	Ajuste de um modelo de regressão para as variáveis X1 e X2 do DCCR ² na Turbidez.....	31
Tabela 10	ANOVA para o teste de turbidez por meio do DCCR ²	33
Tabela 11	Ajuste de um modelo de regressão para as variáveis X1 e X2 do DCCR ² na DQO.....	33
Tabela 12	ANOVA para o teste de DQO por meio do DCCR ²	35
Tabela 13	Caracterização físico-química do efluente proveniente da etapa de coagulação química.....	36
Tabela 14	Estimativa de DBO5 em função da DQO medida da AC bruta.....	38
Tabela 15	Estimativa de DBO5 em função da DQO medida da AC tratada.....	38

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Características da Água cinza.....	13
Figura 2	Processo físico-químico.....	16
Figura 3	Atividades a serem realizadas durante a pesquisa.....	22
Figura 4	Equipamento <i>Jartest</i>	23
Figura 5	Representação do planejamento experimental utilizado na remoção de turbidez de água cinza através de coagulação química (Delineamento composto central rotacional–DCCR)......	24
Figura 6	Equipamento “pHmetro”.....	26
Figura 7	Equipamento “Turbidímetro”.....	26
Figura 8	Equipamento “Espectrofotômetro”.....	27
Figura 9	Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X1 e X2 – DCCR ² na Turbidez.....	31
Figura 10	Superfície de contorno para a variação da turbidez por meio do DCCR ²	32
Figura 11	Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X1 e X2 – DCCR ² na DQO.....	34
Figura 12	Superfície de contorno para a variação da DQO por meio do DCCR ² ..	35
Figura 13	Eficiência de Remoção dos Parâmetros químicos.....	37

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS, ACÔNOMOS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Águas Cinza
ANA	Agência Nacional de Águas
APHA	American Public Health Association
Art	Artigo
AWWA	American Water Works Association
COT	carbono orgânico total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
JMP	Programa Conjunto de Monitoramento
L	Litro
mg	Miligrama
min	Minuto
mL	Mililitro
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Solução de Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
RPM	Rotação por Minuto
SAO	Caixa de Separação Água – Óleo
SDT	Sólido Dissolvido Total
SINDUSCON-SP	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo
SST	Sólido Suspenso Total
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
uT	Unidade de Turbidez
WEF	Water Environment Federation

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1.	PROBLEMA DE PESQUISA.....	11
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3.	OBJETIVOS.....	11
1.3.1.	Objetivo Geral.....	11
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	11
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1.	Definição de águas cinzas.....	12
2.2.	Tipos e características.....	12
2.3.	Tratamento de Águas Cinza.....	14
2.3.1.	Físico-Químicos.....	15
2.3.2.	Químico.....	16
2.3.3.	Biológico.....	17
2.4.	Reuso de Águas Cinza.....	17
2.5.	Legislação relacionada ao reuso de Águas Cinza.....	18
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1.	Teste De Coagulação/Floculação/Decantação.....	23
3.2.	Planejamento Experimental: Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).....	23
3.3.	Testes Empregados Na Caracterização Das Amostras De Água Cinza Bruta E Tratada.....	25
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1.	Caracterização da água cinza bruta.....	28
4.2.	Planejamento Experimental: Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).....	30
4.2.1.	Resultados obtidos para a turbidez.....	30
4.2.2.	Resultados obtidos para a DQO.....	33
4.3.	Ensaio de coagulação/floculação/decantação.....	36
4.4.	Eficiência de Remoção.....	36
4.5.	Enquadramento da água cinza às legislações relacionadas ao reúso de AC.....	37
4.5.1.	Enquadramento da água cinza bruta.....	37
4.5.2.	Enquadramento da água cinza tratada.....	38
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
6.	REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

Considera-se como irrefutável a importância da água como recurso natural essencial para a manutenção da vida de espécies vegetais e animais, também como elemento de valor sociocultural (PHILIPPI JR. et al, 2004). A preocupação com a finitude dos recursos hídricos é crescente na atualidade. Durante séculos houve uma relação estável entre disponibilidade na natureza e consumo humano. Contudo, com o crescimento da humanidade e a globalização houve um crescimento exponencial do consumo da água, o que resultou na escassez desse recurso. Segundo Vieira (2006), o planeta tem a mesma quantidade de água desde a sua formação graças a sua capacidade de autopurificação e limpeza de poluentes. Porém, essa capacidade ficou prejudicada com o aumento descontrolado das cidades devido ao crescimento populacional, o acréscimo na carga de efluentes despejados em mananciais, redução de áreas verdes, e o aumento na demanda hídrica.

Segundo o relatório do Programa Conjunto de Monitoramento (JMP) da OMS e do UNICEF, *Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2000-2017: Special focus on inequalities* (Progressos sobre água, saneamento e higiene: 2000-2017: Foco especial nas desigualdades), de 2019, cerca de 2,2 bilhões de pessoas em todo o mundo não têm serviços de água tratada, 4,2 bilhões de pessoas não têm serviços de saneamento adequado e 3 bilhões não possuem instalações básicas para a higienização das mãos.

Em 2015 a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) alertou que a escassez de água afetará dois terços da população mundial em 2050 devido ao uso excessivo de recursos hídricos para a produção de alimentos e que cerca de 40% da população do planeta sofre com a escassez de água, uma proporção que aumentará até dois terços em 2050.

A Organização das Nações Unidas (ONU) lançou em 2015 os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma agenda de sustentabilidade adotada pelos países-membros da ONU para ser cumprida até 2030. Agenda 2030, como veio a ser conhecida, objetiva orientar as nações do planeta rumo ao desenvolvimento sustentável, além de erradicar a pobreza extrema e reforçar a paz mundial. A Organização das Nações Unidas, através desse Agenda, enfatizando o Desenvolvimento Sustentável, propõe a reutilização de águas residuárias, em todo o mundo, como um instrumento essencial para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Dessa forma, o reúso de água é um instrumento importante que contribui para a redução da pressão sobre os mananciais e para redução do consumo de água potável para fins que não requeiram água de padrão potável. Nesse contexto surge a água cinza, que são águas provenientes dos resíduos domésticos em contato com a água de abastecimento, tais como águas oriundas da lavagem de roupas, como também de efluentes do chuveiro e do lavatório de mãos do banheiro (FEITOSA *et al.*, 2011, BOYJOO *et al.* 2013).

Neste trabalho, será investigada a remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e turbidez de águas cinza proveniente de máquina de lavar roupas empregando a etapa de coagulação química.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A escassez de água potável é incontestável. Buscando diminuir o seu uso, surgiu o reúso de água, especificamente da água cinza. Assim, quais as características apresentam a água cinza de máquina de lavar roupas e quão eficiente é a aplicação do processo de coagulação química no líquido em questão?

1.2. JUSTIFICATIVA

Devido à notória necessidade do tratamento de águas residuárias e da grande redução do uso de água potável que sua reutilização pode representar é notável a necessidade de se observar as características das águas cinza, neste caso de máquina de lavar roupas, e as respostas que a aplicação do processo de coagulação química terão quanto a remoção de turbidez e de DQO.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Estudar a remoção de DQO e turbidez de águas cinza empregando a etapa de coagulação química.

1.3.2. Objetivos Específicos

- I. Caracterizar a água cinza bruta;
- II. Testar a etapa de coagulação química na remoção de DQO e turbidez de águas cinza;

- III. Caracterizar a água cinza após o processo de coagulação química;
- IV. Determinar os modelos estatísticos que representam as remoções de DQO e turbidez de água cinza através da coagulação química.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição de águas cinzas

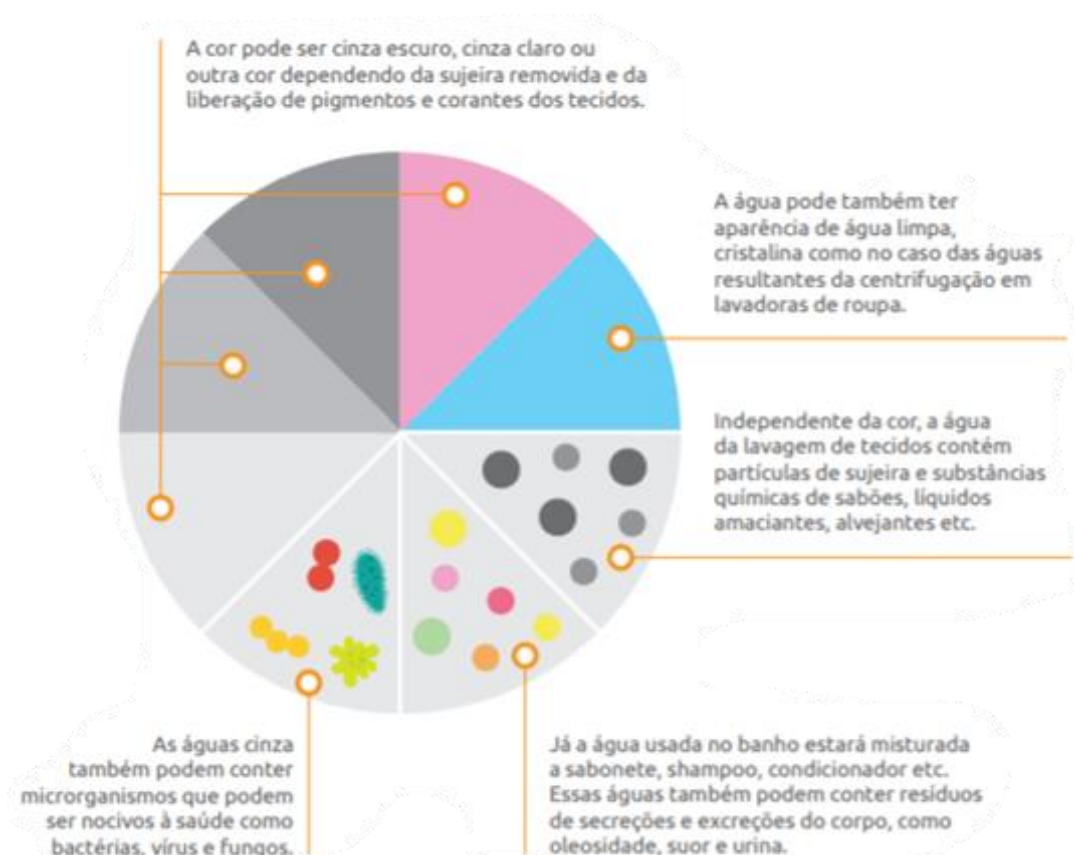
O termo água cinza é utilizado para águas servida em residências, escritórios e edificações verticais que não possuem efluentes de vasos sanitários. É a água residuária proveniente do uso de lavatórios, chuveiros, banheiras, pias de cozinha, máquina de lavar roupa e tanque (JEFFERSON et al., 1999; ERIKSSON et al., 2002; OTTOSON e STENSTRÖM, 2003). Alguns autores não consideram água cinza o efluente proveniente de efluentes de pia de cozinha, por considera-lo altamente poluído, putrescível e cheio de compostos indesejados como óleos e gorduras.

Além da possibilidade de reutilização, a água cinza é caracterizada por apresentar baixa carga orgânica, o que garante sua utilização para fins não potáveis utilizando tratamentos simplificados (MANFRIN et al., 2019). De acordo com Chanakya e Khuntia (2014), as águas cinzas representam cerca de 67% do volume total das águas residuária geradas nas atividades domésticas.

2.2. Tipos e características

Por meio de um estudo realizado por Boyjoo, Pareek e Ang (2013) foi constatado que entre 41 e 91% de toda água consumida em ambientes domésticos é transformada em água cinza. De acordo com Noutsopoulos et al. (2018), uma pessoa produz diariamente em média de 98 litros de água cinza, o que representa 70 a 75% da produção total de águas residuais domésticas que iriam ser descartadas, este, por sua vez, representa aproximadamente por dia 135 litros de água por pessoa. De acordo com o Manual para aproveitamento emergencial de águas cinza do banho e da máquina de lavar (2016), a Figura 1 apresenta as cores e partículas que a água cinza pode conter. Para Gonçalves (2009), os fatores determinantes para o uso das águas cinzas tratadas são os aspectos estéticos. Assim, é importante que as águas de reuso apresentem cor imperceptível, baixa turbidez e ausência de odor e de qualquer outro composto que apresente algum aspecto desagradável.

Figura 1 - Características da Água cinza



Fonte: Manual Para Aproveitamento Emergencial De Águas Cinza Do Banho E Da Máquina De Lavar, 2016

As águas residuárias podem ser classificadas quanto a sua origem. Henze & Ledin (2001) dividem as águas cinzas em duas categorias: águas cinzas claras e águas cinzas escuras. As águas cinzas claras são águas residuárias provenientes do chuveiro, do lavatório e da máquina de lavar roupas. Já as águas cinzas escuras apresentam em sua mistura as águas provenientes da pia da cozinha e da máquina de lavar pratos. Já para Otterpohl (2001), as águas residuárias residenciais são classificadas da seguinte maneira:

- Águas negras (blackwater): efluentes provenientes dos vasos sanitários, como urina, fezes e papel higiênico;
- Águas cinzas (greywater): águas servidas, excluindo o efluente proveniente dos vasos sanitários;
- Águas amarelas: efluente representado somente pela urina;
- Águas marrons: efluente representado somente pelas fezes.

A água cinza apresenta elevados teores de sais, principalmente sulfatos como também matéria orgânica e turbidez. Em relação a matéria orgânica, pode-se destacar

que, mesmo sem contribuição do vaso sanitário, a concentração de matéria orgânica e inorgânica é bastante significativa, em virtude de resíduos alimentares, corporais seja oriundo de higiene pessoal ou da lavagem de roupas (FEITOSA et al., 2011).

A composição das águas cinzas varia de acordo com os pontos de coleta escolhidos, o estilo da residência, instalações e a quantidade de produtos químicos utilizado, sendo possível segregar os efluentes de um conjunto de aparelhos sanitários, de acordo com as características físico-químicas e biológicas de seus efluentes em função dos usos pretendidos (MARINOSKI E ANDRADE, 2010).

As águas cinzas podem apresentar características, as quais estão relacionadas ao costume ou rotina das pessoas em suas respectivas residências, podendo provocar a elevação das concentrações da Demanda Bioquímica de Oxigênio-DBO e da Demanda Química de Oxigênio-DQO (HALALSHEH et al., 2008). Assim, elas variam em qualidade de acordo com a localidade e nível de ocupação da residência, faixa etária, estilo de vida, classe social e costumes dos moradores e com o tipo de fonte de água cinza que está sendo utilizado (lavatório, chuveiro, máquina de lavar, etc.) (NSWHEALTH, 2000).

2.3. Tratamento de águas cinza

Os efluentes que terão como destino o reúso, devem passar por um tratamento, para que possam atender às expectativas dos usuários e principalmente para que não comprometam a saúde desses. Dessa forma, alternativas de tratamentos devem ser estudadas.

O tratamento de água cinza é primordial para a sua reutilização, de acordo com a finalidade

de uso pode-se escolher o melhor tipo de tratamento e junto a esse fator temos a origem da água cinza que também é primordial para a escolha do tipo de tratamento.

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).

Os métodos de reúso de águas cinza podem variar de opções de baixo custo, como o reaproveitamento da água usada 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.

Dentre os tratamentos mais utilizados estão os Físico-químicos, os químicos e os biológicos.

2.3.1. Físico-Químicos

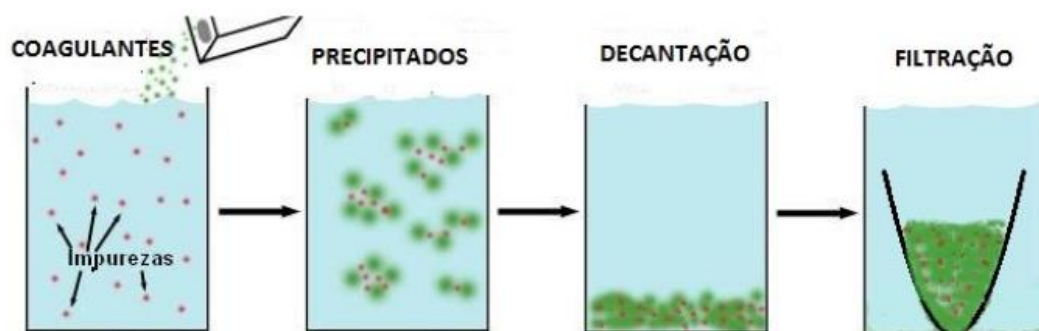
O tratamento físico-químico é formado por várias etapas. Ele é a associação dos tratamentos físico e químico, juntando suas características e processos, retirando poluentes minerais, óleos, matéria orgânica, cor e turbidez, além de elementos como o fósforo e nitrogênio, DBO, DQO e bactérias e vírus.

O tratamento físico-químico tem um custo mais elevado devido a aquisição, transporte, armazenamento dos produtos químicos utilizados nos processos.

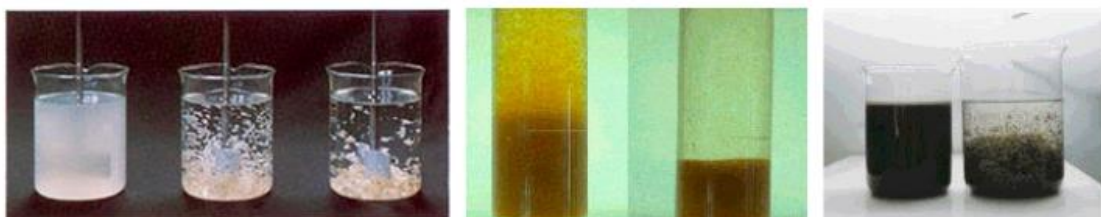
Esse tratamento é composto por algumas etapas, representado na Figura 2:

- 1)** Tratamento Preliminar: que deve remover 100% de resíduos como areia, silte, óleos e graxas;
- 2)** Caixa de Separação Água – Óleo (SAO): permite a remoção completa do óleo e graxas;
- 3)** Tratamento Físico-Químico: com a adição de flocculantes para remoção de argilas mais finas, matéria orgânica dissolvida, poluentes minerais, óleos, matéria orgânica solúvel, cor e turbidez além de elementos como o fósforo e nitrogênio, DBO, DQO, bactérias e vírus.
- 4)** Filtração/Decantação: Com os contaminantes já coagulados é necessário filtrá-los ou decantá-los retendo este lodo.
- 5)** Desinfecção: A desinfecção previne doenças pelo contato desta água de reuso e humanos. O tratamento deve ser com cloro e pode ser feito com as práticas pastilhas, cloro líquido e máquinas dosadoras de cloro.

Figura 2 - Processo físico-químico



Tratamento Físico-Químico



Coagulação-Decantação

Fonte: <https://www.naturaltec.com.br/eta-agua-cinza-reuso/>, acessada em 2021.

2.3.2. Químico

Os principais tratamentos químicos em águas cinza são trocas iônicas, coagulação e floculação (LI; WICHMANN; OTTERPOHL, 2009). A coagulação é como a desestabilização das partículas coloidais e suspensas através de ações físicas e químicas entre estas partículas, a água e o coagulante, este geralmente o Sulfato de Alumínio e o Cloreto Férrico, citados por Paula (2014) como os coagulantes mais utilizados em tratamento de água. Essa ação, água junto a coagulante, através de uma leve agitação tende a formar flocos, fenômeno chamado de floculação. Estes flocos formados ficam mais densos que a água e tendem a sedimentar, permitindo uma visível separação no qual as partículas, antes suspensão, agora sedimentam e a água apresenta uma clarificação.

O processo de coagulação ocorre com a adição de um coagulante químico que retira as cargas eletrostáticas negativas dos coloides, diminuindo o seu potencial repulsivo e aglutinando-os (SILVA *et al.*, 2019).

Para o processo de coagulação são necessárias duas etapas: a mistura rápida e a mistura lenta. O processo de mistura rápida tem por objetivo dissipar o coagulante visando o maior aproveitamento possível, desde que já tenha ocorrido a verificação de parâmetros como o pH, fator que interfere diretamente na formação dos coágulos. Neste processo ocorre a formação de

coágulos, promovendo um estado de equilíbrio eletrostaticamente instável entre as partículas contidas na solução de água e sedimentos (CARARD, 2018).

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.

O processo de coagulação é afetado por propriedades da água, tais como temperatura, alcalinidade, COT (carbono orgânico total) e pH, por parâmetros operacionais que afetam as condições hidrodinâmicas do meio e pela presença e natureza do agente coagulante e sua dosagem (GUEDES *et al.*, 2004; CHEN *et al.*, 2018).

Em relação ao coagulante utilizado, sua escolha está diretamente relacionada com as características da água bruta. A característica básica para o coagulante ser escolhido constitui-se na capacidade de produzir espécies hidrolisadas e precipitados dissociados em água, capazes de desestabilizarem ou aprisionar partículas coloidais e suspensas presentes na água (CINTRA, 2019).

2.3.3. Biológico

Já os biológicos são os métodos que utilizam microrganismos aeróbios ou anaeróbios para estabilizar os despejos (BRAILE; CAVALCANTI, 1993).

Os processos biológicos, no tratamento de água cinza, apresentam como vantagens a elevada remoção de compostos orgânicos, o reduzido consumo de energia, o reduzido custo com manutenção e operação e o impacto visual positivo do sistema devido ao uso de plantas (CINTRA, 2019).

O tratamento biológico apresenta um custo menor por utilizar micro-organismos como bactérias e o processo anaeróbico comparado ao aeróbico são mais viáveis, pois não necessita de energia para a produção de oxigênio consumido pelos micro-organismos.

2.4. Reuso de águas cinza

O crescimento populacional, o uso irracional da água, o desperdício, a poluição de rios e mananciais e a má gestão da captação, conservação e uso da água são

fatores que contribuem para a escassez hídrica (FONSECA, NASCENTES E CAIXETA, 2018). No Brasil, este é um dos principais fatores que contribuem para o aumento do reúso de água encontra-se a escassez de recursos hídricos, o avanço do conhecimento técnico-científico, a legislação ambiental mais rigorosa e atuante e o maior controle da poluição ambiental, dentre outros (BARROS et al., 2015).

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.

Por lei, a água fornecida pelo serviço de abastecimento deve seguir o padrão de potabilidade, ou seja, deve atender a certos requisitos para que não ofereça risco no seu uso mais nobre: beber a água.

As águas do banho e da lavagem de tecidos podem ter diversos usos não potáveis e por isso devemos reaproveitá-la. Esses usos podem variar em função da qualidade das águas cinza geradas.

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.

O reúso de água é parte de uma atividade mais abrangente que é o uso racional ou eficiente da água, o qual compreende também o controle de perdas e desperdícios, e a minimização da produção de resíduos e do consumo de água (BARROS et al., 2015).

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

2.5. Legislação relacionada ao reuso de águas cinza

Independente da origem, de abastecimento público, de poços artesianos, ou de provenientes de reúso, as águas usadas para consumo humano devem obedecer a critérios mínimos de potabilidade.

Segundo Medeiros Leitão (1999), a prática de reuso das águas, no Brasil, vem sendo difundida, acontecendo principalmente na irrigação de hortaliças e de culturas forrageiras. Porém, essa prática é um procedimento não institucionalizado e tem se desenvolvido sem planejamento e controle. Em sua grande maioria é totalmente inconsciente por parte dos usuários, que utilizam águas altamente poluídas de córregos e rios para a irrigação de alimentos e vegetais, ignorando que esteja exercendo uma prática danosa à saúde pública dos consumidores e provocando impactos ambientais negativo.

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, através de parâmetros característicos: Coliformes fecais, pH, turbidez, odor e aparência, óleos e graxas, DBO, compostos orgânicos voláteis, nitrato, nitrogênio amoniacal, nitrito, fósforo total, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais, conforme Tabela 1 (ANA *et al.*, 2005).

Tabela 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).

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.

Nesse sentido pode-se citar o projeto lei de N.º 4.109-C, de 2012, que institui o Programa Nacional de Conservação, Uso Racional e Reaproveitamento das Águas, que objetiva a promoção de medidas necessárias à conservação, à redução do desperdício e à utilização de fontes alternativas para a captação e o aproveitamento da água nas edificações, bem como à conscientização dos usuários sobre a sua importância para a vida. No seu capítulo 3, fala do reaproveitamento das águas, no qual ele aponta dois modos de captação da água, primeiro pela captação, armazenamento e aproveitamento de água proveniente das chuvas e segundo captação, armazenamento e utilização de águas servidas. Em seu artigo 11, indica que as águas servidas serão captadas, direcionadas por meio de encanamento próprio e conduzidas a reservatórios destinados a abastecer as descargas de vasos sanitários ou mictórios.

A NBR 13969:1997, trata do projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementar e disposição de efluentes líquidos, ela não é específica para reúso de água, porém 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 Tabela 2 (ABNT, 1997).

Tabela 2: Padrões de qualidade de água por classe de uso não potável segundo a NBR 13969:1997.

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	Reuso nas descargas dos vasos sanitários	< 10	< 500	NE	NE	NE	NE
Classe 4	Reuso em pomares, cereais, forragens, pastagens para gado	NE	< 5000	NE	> 2,0	NE	NE

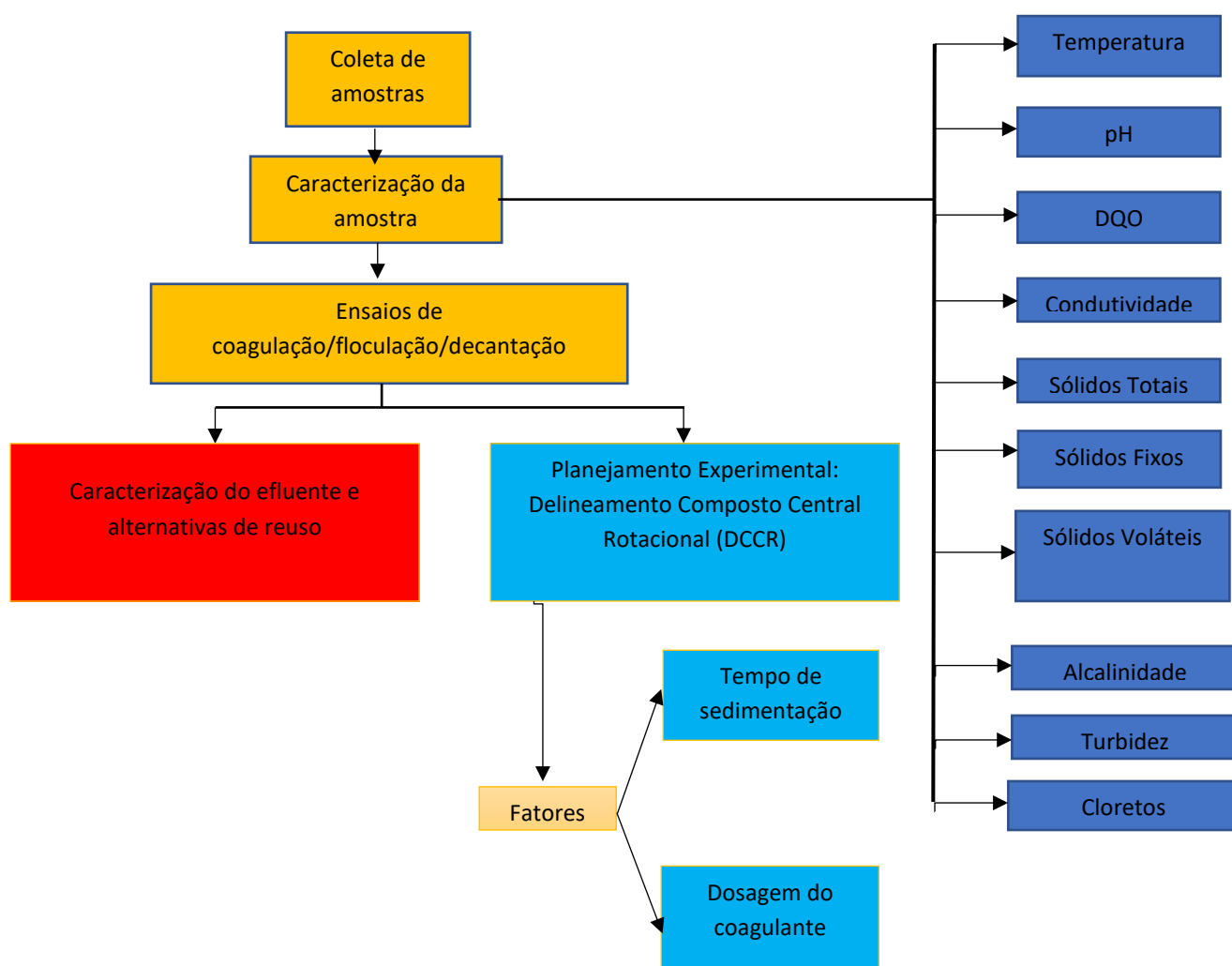
NE - não especificado

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

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades que foram desenvolvidas durante esta pesquisa estão apresentadas na Figura 3. A água cinza utilizada foi coletada de uma lavanderia doméstica, durante a primeira lavagem em máquina de lavar roupas. A água proveniente da máquina de lavar foi coletada em um recipiente plástico com capacidade de 100 litros. Os ensaios experimentais de caracterização da amostra foram realizados no Laboratório de Águas e Efluentes do Instituto Federal do Tocantins, campus Palmas.

Figura 3: Atividades realizadas durante a pesquisa



Fonte: Próprio autor

Foi realizado o ajuste do pH da água cinza bruta, com a adição de solução de ácido clorídrico 1:9 para um valor próximo da neutralidade (6,5 a 7,5). Foram efetuadas medidas de pH ao longo da adição da solução ácida.

3.1. Teste De Coagulação/Floculação/Decantação

Para o teste de coagulação foi utilizado o equipamento Jarrest (Milan®, modelo JT-203/6) com seis cubas, e cada amostra contendo 2 L de água cinza com o pH ajustado (Figura 4). Durante a mistura rápida foi adotada uma velocidade de 160 rpm por 5 minutos. Na mistura lenta foi adotada uma velocidade de 60 rpm por um período de 10 minutos. Foi empregado o agente coagulante policloreto de alumínio (PAC) 1 %.

Figura 4: Equipamento *Jarrest*

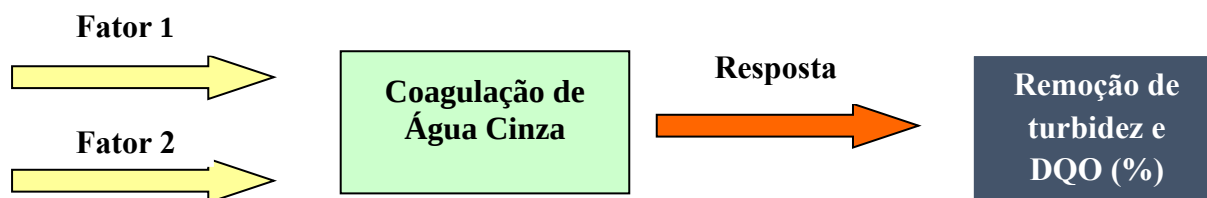


Fonte: Próprio autor

3.2. Planejamento Experimental: Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Foi verificado através de planejamento multivariável o efeito de dois fatores na remoção de DQO e turbidez de água cinza em teste de coagulação química em Jarrest (Figura 5), sendo aplicado um planejamento experimental do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), sem repetições, com 11 tipos de combinações entre os fatores. Os fatores estudados foram: dosagem do coagulante e tempo de sedimentação. Os domínios das faixas dos parâmetros estudados estão de acordo com Rodrigues (2019). Os valores mínimos e máximos são apresentados na Tabela 3.

Figura 5 – Representação do planejamento experimental utilizado na remoção de turbidez de água cinza através de coagulação química (Delineamento composto central rotacional – DCCR)



Fonte: Próprio autor

Onde:

Fator 1 – dosagem do coagulante (mg/L) e **Fator 2** – tempo de sedimentação (min)

Tabela 3 – Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a coagulação química de água cinza

Fatores	Níveis				
	(-1,4)	(-1)	(0)	(+1)	(+1,4)
Dosagem do coagulante (mg/L)	358,58	400	500	600	641,42
Tempo de sedimentação (min)	23,79	30	45	60	66,21

Fonte: Próprio autor

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

Tabela 4 – Ordem dos experimentos empregados no planejamento experimental DCCR

Ordem dos experimentos	Fatores	
	Dosagem do coagulante (mg/L)	Tempo de sedimentação (min)
1	400(-1)	30(-1)
2	600(1)	30(-1)
3	400(-1)	60(1)
4	600(1)	60(1)
5	358,58(-1,41)	45(0)
6	641,42(1,41)	45(0)
7	500(0)	23,79(-1,41)
8	500(0)	66,21(1,41)
9	500(0)	45(0)

10	500(0)	45(0)
11	500(0)	45(0)

Fonte: Próprio autor

3.3. Testes empregados na caracterização das amostras de água cinza bruta e tratada

Após o processo de coagulação química, foram coletadas amostras para análises. Todas as amostras foram coletadas em garrafas plásticas. As determinações seguiram as recomendações de APHA/AWWA/WEF (1998), conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Métodos analíticos aplicados na caracterização físico-química de água cinza bruta e após tratamento por coagulação química

PARÂMETRO ANALÍTICO	METODOLOGIA
Temperatura	Termômetro de mercúrio
pH	Eletrométrico
DQO	Espectrofotométrico
Condutividade	Eletrométrico
Sólidos Totais	Gravimétrico
Sólidos Fixos	Gravimétrico
Sólidos Voláteis	Gravimétrico
Alcalinidade	Volumétrico
Turbidez	Nefelométrico
Cloretos	Mohr

Fonte: Próprio autor

A Figura 6 apresenta um medidor de pH que funciona como um voltímetro que mede a diferença de potencial elétrico entre um eletrodo de referência e um eletrodo de pH exibindo o resultado em termos de pH de uma solução a qual o eletrodo está imerso.

Figura 6 - Equipamento “pHmetro”



Fonte: Próprio autor

Já a Figura 7 apresenta aparelho que mede a turbidez, ele mede as partículas suspensas em um líquido ou gás coloidal.

Figura 7 - Equipamento “Turbidímetro”



Fonte: Próprio autor

A Figura 8 exibe um espectrofotômetro que é o dispositivo que fará a leitura de absorbância, capacidade de absorver a luz, em amostras após a digestão, para assim correlacionar com a concentração de DQO.

Figura 8 - Equipamento “Espectrofotômetro”



Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da água cinza bruta

Primeiramente, a amostra bruta foi caracterizada conforme recomendações de APHA/AWWA/WEF (1998), obtendo o resultado de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização físico-química de água cinza bruta

PARÂMETRO ANALÍTICO	METODOLOGIA
Temperatura (°C)	25,2
pH (-)	9,5
DQO (mg/L)	250
Condutividade (uS/cm)	817
Sólidos Totais (mg/L)	902
Sólidos Fixos (mg/L)	611
Sólidos Voláteis (mg/L)	291
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	270
Turbidez (uT)	110
Cloretos (mg/L)	89

Fonte: Próprio autor

A Tabela 7 contém os valores dos parâmetros medidos na Água Cinza bruta e os valores desses parâmetros obtidos em pesquisas que também tratam de AC provenientes de máquinas de lavar domésticas.

Tabela 7: Caracterização da AC bruta e outras pesquisas em AC de máquinas de lavar.

Parâmetro analítico	Autor (2022)	Rampelotto (2014)	Edwin et al . (2014)	Bazzarella (2005)	Sostar-Turk et al . (2005)	Siegrist et al . (1976) apud Eriksson et al . (2002)	Christova-Boal et al. (1996)
---------------------	--------------	-------------------	----------------------	-------------------	----------------------------	--	------------------------------

Temperatura (°C)	25,2	25 ± 3,5	-	-	62	32	-
pH (-)	9,5	7,4 ± 1,2	9,1	9,1	9,6	-	9,3-10
DQO (mg/L)	250	300 ± 142	-	521	180	-	190-1400
Condutividade (uS/cm)	817	364 ± 196	641,6	524	-	-	-
Sólidos Totais (mg/L)	902	391 ± 215	586	1004	-	1340	-
Sólidos Fixos (mg/L)	611	-	-	-	-	-	-
Sólidos Voláteis (mg/L)	291	-	-	-	-	-	-
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	270	-	721	74,2	-	-	83-200
Turbidez (uT)	110	49 ± 36	108,6	58	-	-	50-210
Cloretos (mg/L)	89	-	37,3	23,6	-	-	9,0-88

Fonte: Próprio autor

O pH da amostra de água cinza (9,5) está fora do intervalo de Rampelotto, próximo do valor de Edwin et al., de Bazzarella e Sostar-Turk et al. e dentro do intervalo de Christova-Boal et al. Bazzarella afirma que o pH da água cinza depende basicamente do pH da água de abastecimento. Junto a esse fator é importante apontar que alguns produtos químicos contribuem para o aumento do pH, como é o caso do sabão em pó e do amaciante.

Já a DQO foi encontrada no valor de 250 mg/L, assim ficando dentro do intervalo de Rampelotto e de Christova-Boal et al.. A DQO está 47,98% inferior em comparação com Bazzarella, que encontrou o valor de 521 mg/L.

O parâmetro obtido para turbidez de 110 uT se encontra dentro do apresentado por Edwin et al. (108,6) e Christova-Boal et al. (50-210). Porém está acima do encontrado por Rampelotto (49±36) e por Christova-Boal et al. (58).

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

4.2 Planejamento Experimental: Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Buscando-se observar os efeitos da dosagem do coagulante e tempo de sedimentação na remoção de DQO e turbidez de água cinza em teste de coagulação química, através do DCCR obtivemos o resultado da Tabela 8.

Tabela 8: Resultado da Turbidez e DQO após DCCR.

Ordem dos experimentos	Fatores		Resposta	
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂
	Dosagem do coagulante (mg/L)	Tempo de sedimentação (min)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)
1	400 (-1)	30 (-1)	50	140
2	600 (1)	30 (-1)	5,88	69
3	400 (-1)	60 (1)	49	135
4	600 (1)	60 (1)	5	69
5	358,58 (-1,41)	45 (0)	60	137
6	641,42 (1,41)	45 (0)	7,5	85
7	500 (0)	23,79 (-1,41)	8,8	77
8	500 (0)	66,21 (1,41)	7,5	74
9	500 (0)	45 (0)	8,42	77
10	500 (0)	45 (0)	8,12	78
11	500 (0)	45(0)	8	76

Fonte: Próprio autor

Obtiveram-se resultado de Turbidez de valores entre 5 até 60 uT, já para DQO tivemos resultados de 69 a 140 mg/L, sendo que o modelo de regressão obtido (Tabela 9) fornece também a turbidez esperada para o modelo definido por essa regressão.

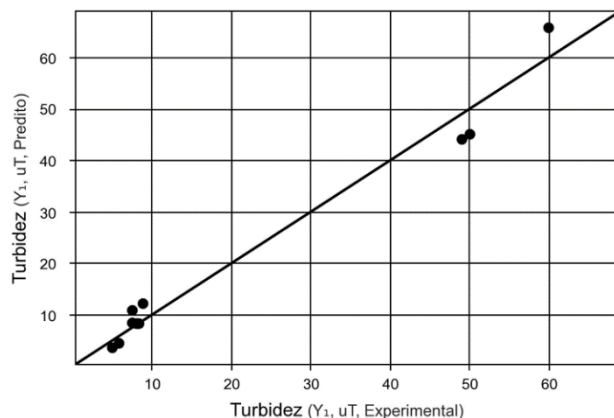
4.2.1 Resultados obtidos para a turbidez

Na Tabela 9 estão apresentados os coeficientes de regressão para as variáveis X₁ (Dosagem de coagulante) e X₂ (Tempo de sedimentação), obtidos durante o

planejamento experimental do tratamento de Água Cinza visando a remoção de turbidez.

Tabela 9: Ajuste de um modelo de regressão para as variáveis X_1 e X_2 do DCCR² na Turbidez.

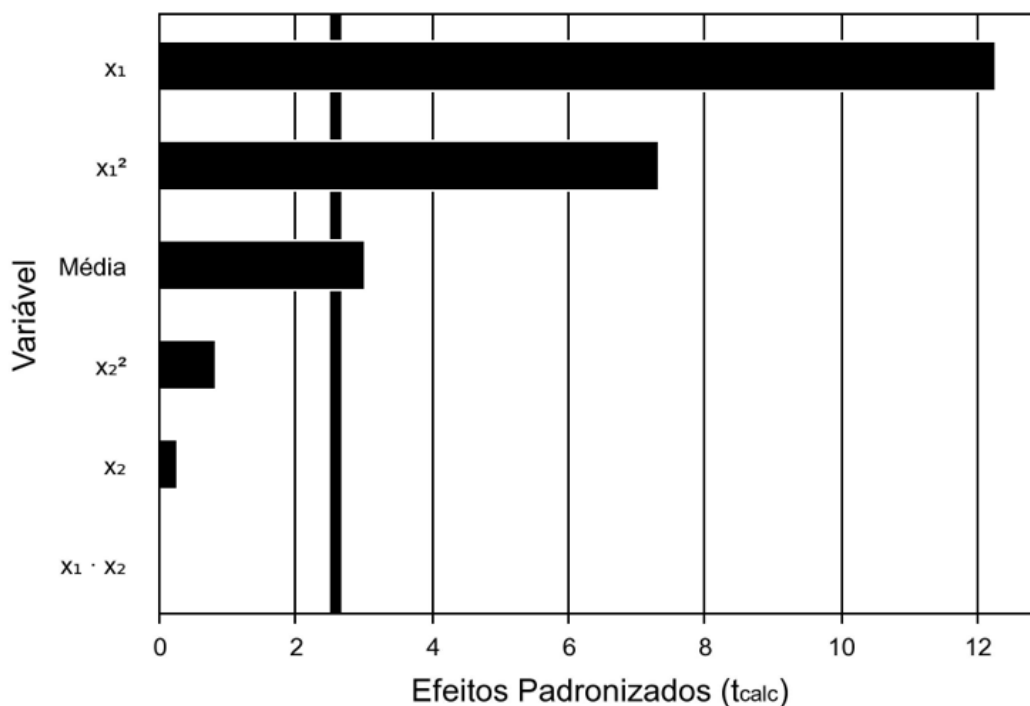
nome	coeficiente	erro padrão	t calculado	p-valor
média	12,27	1,61	7,64	0,0006
X_1	4,43	0,98	4,51	0,0064
X_1^2	3,50	1,17	2,99	0,0303
X_2	-6,52	0,98	-6,63	0,0012
X_2^2	1,45	1,17	1,24	0,2692
$X_1.X_2$	0,20	1,39	0,14	0,8913



Fonte: Software Protimiza

As duas variáveis X_1 e X_2 apresentaram considerável significância para a resposta, como apresentado no Gráfico de Pareto da Figura 9.

Figura 9: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 e X_2 – DCCR² na Turbidez.

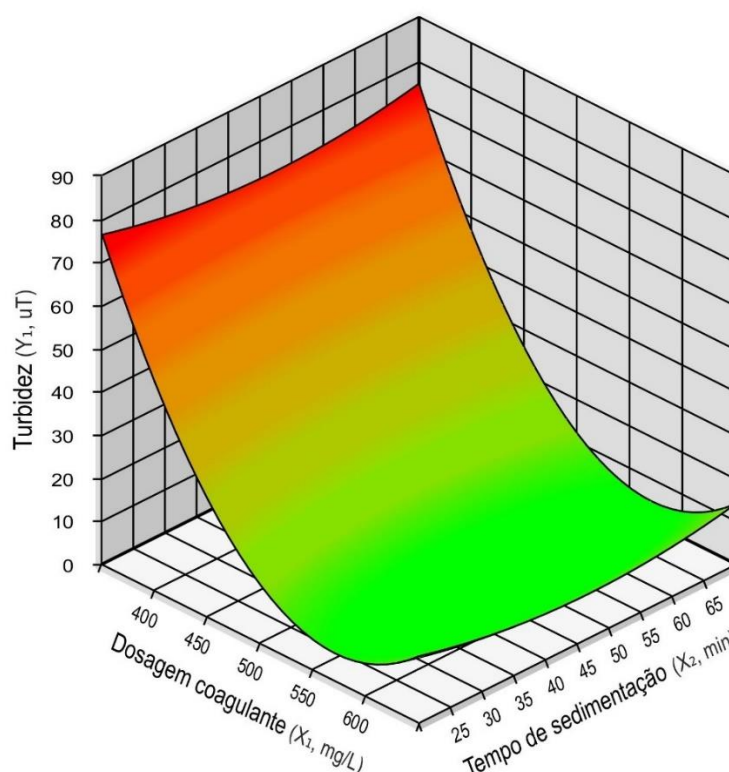


Fonte: Software Protimiza

Na Figura 10 apresenta-se a superfície de resposta ao DCCR², onde percebe-se a influência das variáveis tempo de sedimentação quando varia entre os níveis (-1,41) e (+1,41) (23,79 e 66,21 minutos) e da dosagem do coagulante quando varia entre os níveis (-1,41) a (+1,41) (358,58 a 641,42 mg/L), respectivamente. Com os resultados foi possível verificar que o ponto de menor Turbidez foi o experimento 4, com dosagem de 600mg/L de coagulante e tempo de sedimentação de 60 min, contudo é importante pontuar que o experimento 6, com uma dosagem maior de coagulante, de 641,42 mg/L, não trouxe maiores reduções de Turbidez, permitindo identificar que maiores valores de coagulante não trarão diminuições na Turbidez, pelo contrário, resultaram no seu aumento.

Durante o planejamento experimental buscou-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 ao ponto médio, 600 mg/L, testados para esse consumo.

Figura 10: Superfície de contorno para a variação da turbidez por meio do DCCR².



Na Tabela 10 apresenta-se a Análise de Variância (ANOVA) para o teste de turbidez da amostra de AC por meio do planejamento experimental DCCR². O coeficiente R² conseguido foi de 0,9764, mostrando um bom ajuste do modelo linear ao conjunto de observações.

Tabela 10: ANOVA para o teste de turbidez por meio do DCCR².

Fonte de Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	4513,1	5	902,6	41,3	0,00045
Resíduos	109,2	5	21,8		
Falta de Ajuste	109,1	3	36,4	776,9	0,00129
Erro Puro	0,1	2	0		
Total	4622,3	10			

R² = 97,64%

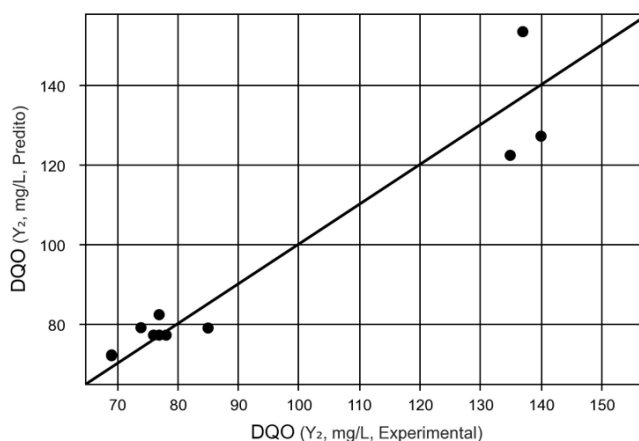
Fonte: Software Protimiza

4.2.2 Resultados obtidos para a DQO

Na Tabela 11 estão apresentados os coeficientes de regressão para as variáveis X1 (Dosagem de coagulante) e X2 (Tempo de sedimentação), obtidos durante o planejamento experimental do tratamento de Água Cinza visando a remoção de DQO.

Tabela 11: Ajuste de um modelo de regressão para as variáveis X1 e X2 do DCCR² na DQO

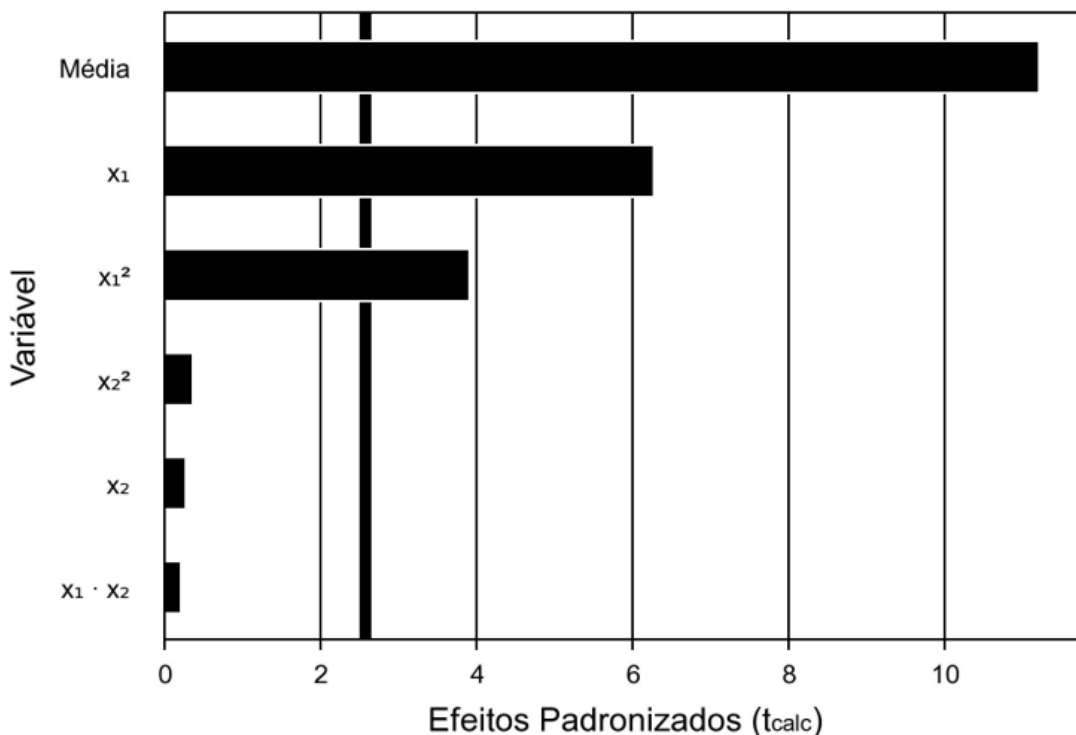
nome	coeficiente	erro padrão	t calculado	p-valor
média	77,00	6,86	11,23	0,0001
X1	-26,32	4,20	-6,27	0,0015
X1 ²	19,50	5,00	3,90	0,0114
X2	-1,16	4,20	-0,28	0,7942
X2 ²	1,75	5,00	0,35	0,7405
X1.X2	1,25	5,94	0,21	0,8416



Fonte: Software Protimiza

As duas variáveis X1 e X2 apresentaram considerável significância para a resposta, como apresentado no Gráfico de Pareto da Figura 11.

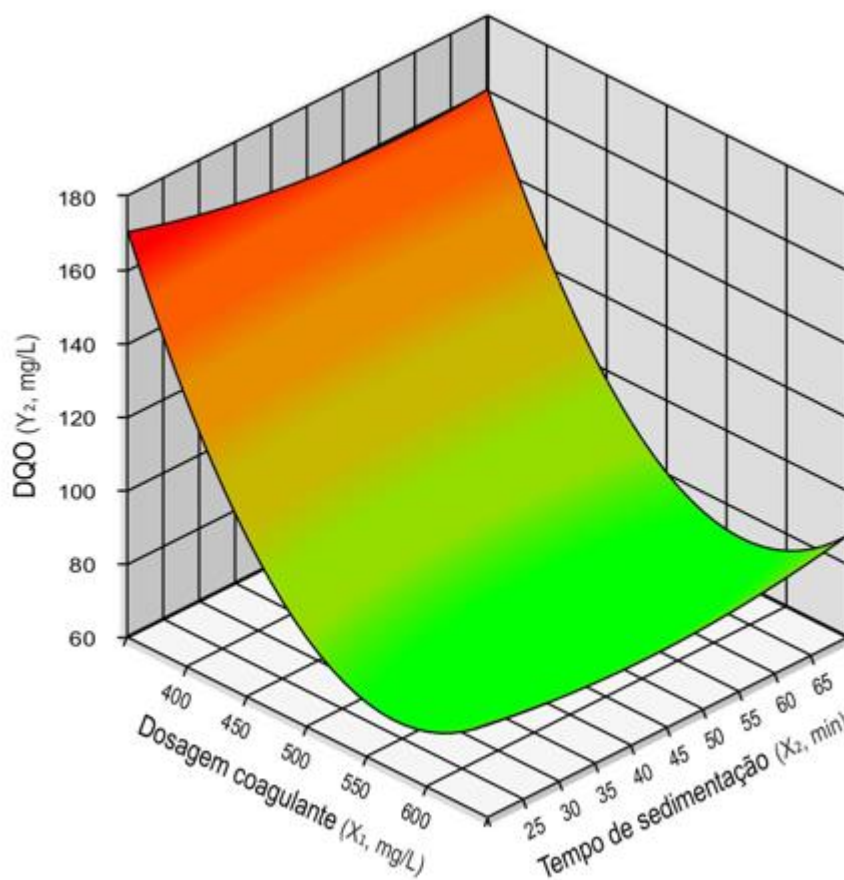
Figura 11: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 e X_2 – $DCCR^2$ na DQO.



Fonte: Software Protimiza

Na Figura 12 apresenta-se a superfície de resposta ao $DCCR^2$, onde percebe-se a influência das variáveis tempo de sedimentação quando varia entre os níveis (-1,41) e (+1,41) (23,79 e 66,21 minutos) e da dosagem do coagulante quando varia entre os níveis (-1,41) a (+1,41) (358,58 a 641,42 mg/L). Durante o planejamento experimental observando o experimento 1 e 3, podemos verificar que o Tempo de Sedimentação tem efeito na diminuição do DQO, mas em comparação com os experimentos 2 e 4, fica claro que a Dosagem de coagulante se mostra com maior eficiente na redução de DQO. Assim, conclui-se que o ponto 2 é o de melhor eficiência para a diminuição de DQO, por apresentar o mesmo desempenho do experimento 4, porém com menos Tempo de sedimentação.

Figura 12: Superfície de contorno para a variação da DQO por meio do DCCR².



Fonte: Software Protimiza

Na Tabela 12 apresenta-se a Análise de Variância (ANOVA) para o teste de DQO da amostra de AC por meio do planejamento experimental DCCR². O coeficiente R^2 conseguido foi de 0,9171, mostrando um bom ajuste do modelo linear ao conjunto de observações.

Tabela 12: ANOVA para o teste de DQO por meio do DCCR².

Fonte de Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	7803,2	5	1560,6	11,1	0,00981
Resíduos	705,5	5	141,1		
Falta de Ajuste	703,5	3	234,5	234,5	0,00425
Erro Puro	2,0	2	1,0		
Total	8508,7	10			
$R^2 = 91,71\%$					

Fonte: Software Protimiza

Através dos resultados obtidos podemos observar que as duas variáveis têm grande importância para a redução de turbidez e DQO. Contudo, é possível ver que a dosagem de coagulante é o principal fator de redução de turbidez. É importante pontuar que o ponto de melhor resultado é um ponto médio e que aumentando a dosagem além desse ponto o valor de turbidez volta a apresentar resultados maiores.

4.3 Ensaios de coagulação/floculação/decantação

A Tabela 13 apresenta os resultados da caracterização da amostra após ela passar pelo tratamento e pelo planejamento experimental. Os pontos de melhor resultado para Turbidez e DQO obtidos no Planejamento experimental DCCR foram utilizados como referência.

Tabela 13 - Caracterização físico-química do efluente proveniente da etapa de coagulação química

PARÂMETRO ANALÍTICO	METODOLOGIA
Temperatura (°C)	25,2
pH (-)	6,5
DQO (mg/L)	69
Condutividade (uS/cm)	602
Sólidos Totais (mg/L)	411
Sólidos Fixos (mg/L)	355
Sólidos Voláteis (mg/L)	56
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	152
Turbidez (uT)	5
Cloretos (mg/L)	72

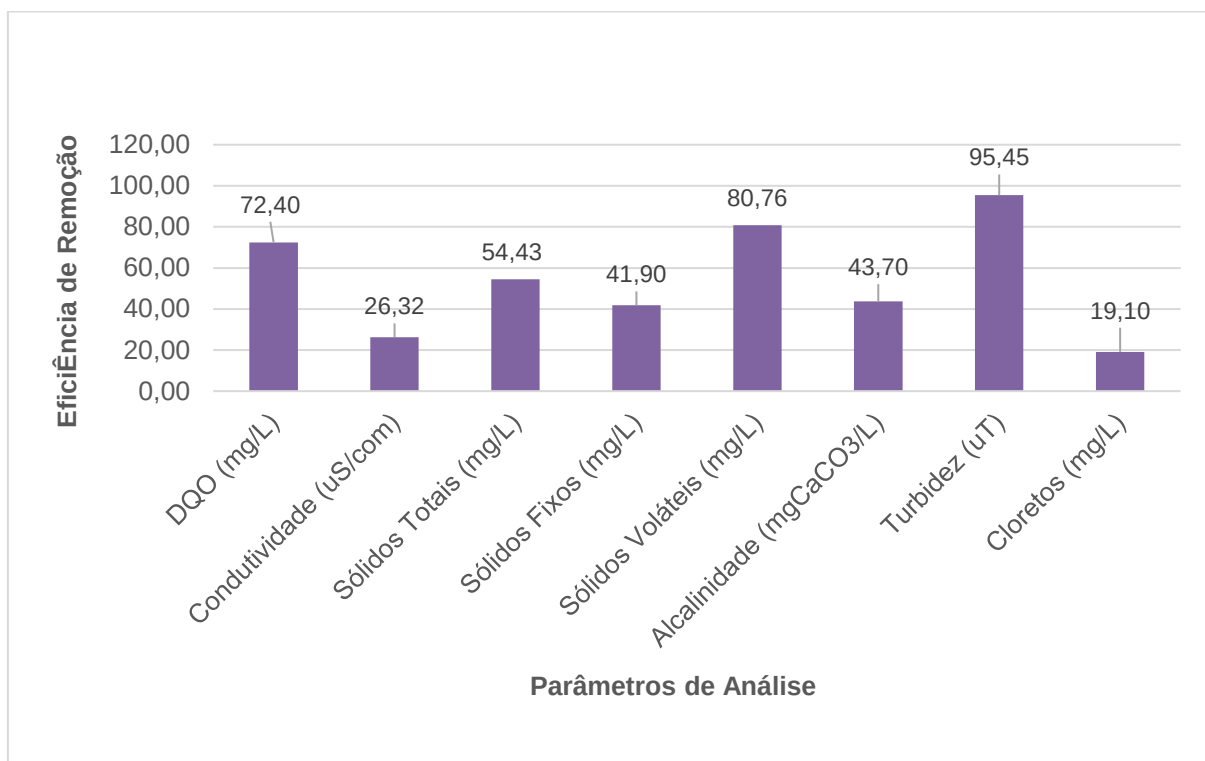
Fonte: Próprio autor

4.4 Eficiência de Remoção

Ao observar os valores de água cinza bruta e do efluente após o tratamento com coagulante químico, é possível obter a eficiência de remoção de cada parâmetro. A Figura 13 ilustra a eficiência do ensaio de coagulação em porcentagem.

Os parâmetros que obtiveram maior percentual de remoção foram: turbidez, sólidos voláteis, DQO e sólidos totais com 95.45, 80.76, 72.40 e 54.43% respectivamente, seguidos de alcalinidade com 43.70%. Os parâmetros que registraram menores percentuais de remoção foram: os sólidos fixos com 41.90% de remoção, condutividade com 26.32% e cloretos com 19.10%.

Figura 13: Eficiência de Remoção dos Parâmetros químicos.



Fonte: Próprio autor

Considerando que a turbidez é um parâmetro operacional significativo, pois reflete a eficiência dos processos de separação sólido-líquido e que o menor valor de turbidez, indica maior efetividade das barreiras do tratamento (FERNANDES, 2010). O tratamento de água cinza utilizando o agente coagulante policloreto de alumínio (PAC) 1 % junto ao Delineamento Composto Central Rotacional obteve percentual de remoção de turbidez acima de 95 %.

Em relação a DQO, o tratamento junto ao planejamento experimento obtiveram uma eficiência de 72,4%.

4.5 Enquadramento da água cinza às legislações relacionadas ao reúso de AC

4.5.1 Enquadramento da água cinza bruta

A Tabela 14 apresenta estimativa de valores em DBO₅ em função da DQO medida na AC bruta. Assim, como essa pesquisa não calculou DBO₅ e esse parâmetro é uma exigência para Ana et al. para o enquadramento da água de uso não potável, é necessário se fazer uma estimativa utilizando as indicações de Boyjoo *et al.* (2013), que afirma que essa relação é de 0,25 e a indicação de Halasheh *et al.* (2008), que sugere que a relação DBO₅/DQO em águas cinza varia entre 0,31 e 0,71.

Tabela 14: Estimativa de DBO₅ em função da DQO medida da AC bruta.

Parâmetro	Observação	AC bruta
DQO	medido	250
DBO ₅	conforme Boyjoo et al. (2013)	62,5
	conforme Halasheh et al. (2008)	77,5 - 177,5

Fonte: Próprio autor

A amostra de AC bruta não se enquadra nas classes 1, 2 e 3 da Tabela 01 (página 19), prevista por Ana *et al.* (2005), pois apresenta pH (9,5) e DBO₅ (250mg/L) acima dos 3 padrões. Já em relação as classes 1, 2, 3 e 4 da ABNT 13969:1997, Tabela 02 (página 20) a amostra também não se enquadra por apresentar os valores de turbidez (110 uT) e de sólidos dissolvidos totais (902 mg/L) bem acima dos padrões necessários.

4.5.2 Enquadramento da água cinza tratada

A Tabela 15 apresenta estimativa de valores em DBO₅ em função da DQO medida na AC tratada. Assim, é possível verificar esse parâmetro de acordo com Ana et al. (2005) para o enquadramento de água para uso não potável.

Tabela 15: Estimativa de DBO₅ em função da DQO medida da AC tratada.

Parâmetro	Observação	AC tratada
DQO	medido	69

DBO ₅	conforme Boyjoo et al. (2013)	17,25
	conforme Halasheh et al. (2008)	21,39 - 48,99

Fonte: Próprio autor

Com esses valores a amostra de AC tratada, com referência a Ana et al., não se enquadra na Classe 1 e na Classe 3, por apresentar valor de DBO₅ superior ao limite, tanto conforme Boyjoo et al. (2013) e Halasheh et al. (2008). Já em relação a Classe 2, ela se enquadra no parâmetro de DBO₅ conforme Boyjoo et al. (2013), porém não se enquadra totalmente conforme Halasheh et al. (2008) e o valor de Turbidez (5 uT) está acima do mínimo, ou seja, não está conforme o exigido.

Já em relação a ABNT 13969, a amostra não se enquadrar nas classes 1 e 2 por exigirem valor de turbidez menores de 5 uT e a amostra apresentou o valor de 5 uT. Com relação as classes 3 e 4, a amostra se enquadrar pela exigência de Turbidez.

Assim, apenas com o tratamento de coagulante a amostra já se enquadra, pelos parâmetros da ABNT 13969, para reuso nas descargas dos vasos sanitários (Classe 3) e reuso em pomares, cereais, forragens, pastagens para gado (Classe 4).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A Água Cinza bruta apresentou altos índices nos parâmetros observados, como pH de 9,5, Condutividade de 817 uS/cm, Turbidez de 110 uT e Cloretos de 89 mg/L, em comparação com pesquisas de outros autores.
- A etapa de coagulação química realizada junto com o planejamento experimental DCCR permitiu identificar que a dosagem de coagulante tem grande influência na diminuição da turbidez e da DQO e que junto a esse fator o tempo de sedimentação também proporciona diminuição desses dois parâmetros.
- A AC tratada pelo processo de coagulação química apresentou índices que a enquadraram na classe 2 do ANA e nas classes 3 e 4 da ABNT 13969.
- O Planejamento Experimental teve como resultado estatístico o valor de R^2 de 91,71% para DQO e de 97,64% para Turbidez apresentando um bom ajuste dos dois modelos.
- A Eficiência de Remoção apresentou índices de 95,45% para a Turbidez e de 72,40% para a DQO.

6. REFERÊNCIAS

Sella, Marcelino Blacene. **Reúso de água cinzas: Avaliação de viabilidade da implantação do sistema em residências**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, IFTO, Porto Alegre-RS, 2011.

Dell'Uomo, Francisco. **Análise técnica e econômica dos processos de tratamento de águas cinza visando ao reúso**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

Cavalcante, Geórgia F. F. **Implantação de sistemas de uso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em um residencial multifamiliar de pequeno porte**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, UFPB, João pessoa, 2017.

Chrispim, Mariana Cardoso. **Avaliação de um sistema de tratamento de águas cinzas em edificação de campus universitário**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública). São Paulo, 2014.

Martins, Murilo Bocardi. **Reutilização de águas em residência unifamiliar na cidade de Lambari – MG**. Artigo Científico. Lambari-MG, 2019.

Paula, H.M. & Fernandes, C.E. **Otimização do tratamento de água cinza a partir do uso combinado de coagulantes químicos**. Artigo Científico. Creative Commons. Eng Sanit Ambient. 2017

BRASIL – Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 4.109 - C, de 26 de junho de 2012**. Institui o Programa Nacional de Conservação, Uso Racional e Reaproveitamento das Águas; tendo parecer: da Comissão de Desenvolvimento Urbano, da Comissão de Minas e Energia e da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Brasília-DF, 2012.

Rampelotto, Geraldo. **Caracterização e tratamento de águas cinzas visando reúso doméstico**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande) Campina Grande, 2021.

Costa, Rubenia De Oliveira. **Tratamento de água cinza visando o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar**. Dissertação de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria). Santa Maria, 2014.

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

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.

Bazzarella, Bianca B. **Caracterização e aproveitamento de água cinza para uso não-potável em edificações**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES, 2005.

Mendonça, Kenia Parente Lopes. **Tratamento De Águas Cinza Provenientes De Lavanderias Visando Reúso**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins. Palmas-TO, 2019.

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.

VERONEZ, Fernanda Aparecida. **Desempenho de um reator UASB tratando esgoto sanitário e realizando concomitantemente o adensamento e a digestão do lodo de descarte de biofiltros aerados submersos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.

WEBER, C.C.; CYBIS, L.F.; BEAL, L.L. (2010b) **Reúso de água como ferramenta de revitalização de uma estação de tratamento de efluentes**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 15, n. 2, p. 119-128.

Eos Organização e Sistemas – Saiba mais sobre água cinza e suas formas de reutilização. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/agua-cinza-reutilizacao>>. Acessado em: 09 de novembro 2021.

VIVAGREEN - Reúso de água cinza. Disponível em: <<https://vivagreen.com.br/agua/reuso-de-aguas-cinzas/>>. Acesso em: 12 de novembro de 2021.

Agência Brasil – FAO: falta de água afetará dois terços da população mundial em 2050. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2015-04/fao-falta-de-agua-afetara-dois-tercos-da-populacao-mundial-em-2050>>. Acessado em: 09 de novembro 2021.

SANTOS, V. S. dos. "Água de reúso"; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/biologia/Agua-reuso.htm>>. Acesso em 31 de outubro de 2021.

Instituto Aurora – ODS: O que esta sigla significa e como ela impacta o mundo hoje. Agenda 2030. Disponível em: <https://institutoaurora.org/ods-o-que-esta-sigla-significa/?gclid=Cj0KCQjww4OMBhCUARIsAILndv6TjhftsPF5cfMjMDyS-1GBv9g3lz_LCWfngm_84D0yETMDfzw8oskaAosaEALw_wcB>. Acessado em: 10 de novembro 2021.

