



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

EDSON NUNES LEMES JUNIOR

**REMOÇÃO DE TURBIDEZ DE ÁGUAS CINZA ATRAVÉS DE
COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/DECANTAÇÃO USANDO A METODOLOGIA DE
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.**

**Palmas
2021**



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

EDSON NUNES LEMES JUNIOR

**REMOÇÃO DE TURBIDEZ DE ÁGUAS CINZA ATRAVÉS DE
COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/DECANTAÇÃO USANDO A METODOLOGIA DE
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.**

Pré-projeto do trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel no Curso de Graduação em
Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins,
Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Co-orientadora: Eng. Civil Isabella Juwer
Nascimento

**Palmas
2021**



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

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

N972r Nunes Junior, Edson Lemes
Remoção de turbidez de águas cinza através de
coagulação/floculação/decantação usando a metodologia de
superfície de resposta. / Edson Lemes Nunes Junior. – Palmas, TO,
2021.

43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Coorientador: Esp. Isabella Juwer Nascimento

1. Águas Cinzas. 2. Turbidez. 3. Superfície de resposta. I.
Pedroza, Marcelo Mendes. II. Nascimento, Isabella Juwer. III. 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).



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

EDSON LEMES NUNES JUNIOR

REMOÇÃO DE TURBIDEZ DE ÁGUAS CINZA ATRAVÉS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/DECANTAÇÃO USANDO A METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.

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

Aprovado em: 05/02/2021

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador

Eng. Isabella Juwer Nascimento
Coorientadora

Professora Me. Michelle Ludmila Guedes dos Santos
Avaliadora 1

Eng. Ranyere do Nascimento Lôbo
Avaliador 2



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

AGRADECIMENTOS

Esta jornada não foi fácil! Desde o dia da tomada de decisão da escolha do curso, até a apresentação deste trabalho, passei por tantas batalhas que hoje, minha vitória, tem um sabor indescritível.

Agradecer primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela saúde e força de vontade de acordar todos os dias e correr atrás dos meus sonhos.

A minha irmã, Izabela, por ser minha principal companheira durante toda minha graduação.

Ao Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas, pela excelente estrutura, que alinhada ao corpo de docentes comprometidos, puderam me proporcionar um diferencial aprendizado.

Aos meus amigos, por me permitirem vivenciar momentos únicos, e inesquecíveis, durante todo este tempo.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Mendes, e minha coorientador, Eng. Isabela Juwer, por toda paciência e apoio na elaboração deste trabalho. Vocês foram mais que fundamentais!

E por fim, aos meus pais, Edson e Diva, por sempre procurarem me proporcionar o melhor, me apoiando, sendo meus fãs número 1 e me aplaudirem de pé a cada etapa vencida. Em especial meu pai, o qual cumpriu seu papel na terra em 2018. Sei que este momento seria mágico para o senhor, mas também sei que estás aplaudindo de pé do camarote celestial. O amor que sinto por vocês é inexplicável, é a fonte de toda minha força. Obrigado por tudo sempre!



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

RESUMO

NUNES JUNIOR, Edson Lemes. **Remoção de turbidez de águas cinza através de coagulação/floculação/decantação usando a metodologia de superfície de resposta**. 2021. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2021.

‘As águas cinza provenientes de máquinas de lavar roupas são as que mostram maior facilidade de tratamento por suas características físicas, químicas e microbiológicas. Este estudo caracterizou as amostras de água cinza gerada em uma lavanderia em Palmas-TO e aplicou o teste de coagulação/floculação/decantação, analisando a remoção de turbidez visando determinar o modelo estatístico que representa a eficiência do processo adotado. Foram executados ensaios de bancada simulando um processo de tratamento de águas cinza: coagulação, floculação, sedimentação e filtração em filtro de areia através do equipamento Jar-Test com uso do coagulante sulfato de alumínio e também foram feitos os planejamentos fatoriais: delineamento fatorial fracionado (DFF) e delineamento composto central rotacional (DCCR). Para a caracterização das amostras obteve-se os seguintes resultados: pH (9,2), temperatura (25°C), turbidez (112uT), DQO (200 mg/L) e alcalinidade (241 mg/L). No processo de DFF, observa-se respostas de turbidez entre 7,8 uT e 28,1 uT, e conforme o gráfico de Pareto os maiores efeitos no resultado de turbidez da amostra foram das variáveis de dosagem do coagulante (9,45) e de tempo de sedimentação (- 10,70). No processo de DCCR, obteve-se o resultado de turbidez entre 5,2 e 26,1 uT através de um modelo de regressão e de acordo com gráfico de Pareto, as duas variáveis X_1 Dosagem (mg/L) e X_2 Tempo de Sedimentação (min) apresentaram considerável significância para a resposta. Na análise de variância, o coeficiente R^2 atingido pela regressão foi de 0,9641, mostrando um bom ajuste do modelo. Os resultados determinaram o modelo estatístico que representa a remoção de turbidez de águas cinzas através do processo de coagulação/floculação/ decantação.

Palavras-chave: Águas Cinzas, Turbidez. Modelo estatístico.



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

ABSTRACT

NUNES JUNIOR, Edson Lemes. **Removal of gray water turbidity through coagulation / flocculation / decantation using the response surface methodology.** 2021. 42 p. Course Conclusion Paper - Bachelor of Civil Engineering- Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2021.

The gray waters from washing machines are the ones that show the easiest treatment due to their physical, chemical and microbiological characteristics. This study characterized the samples of gray water generated in a laundry in Palmas-TO and applied the coagulation / flocculation / decantation test, analyzing the removal of turbidity in order to determine the statistical model that represents the efficiency of the adopted process. Bench tests were carried out simulating a gray water treatment process: coagulation, flocculation, sedimentation and filtration in a sand filter using the Jar-Test equipment with the use of aluminum sulfate coagulant and the factorial plans were also made: fractional factorial design (FFD) and central rotational composite design (CRCD). For the characterization of the samples, the following results were obtained: pH (9.2), temperature (25°C), turbidity (112uT), COD (200 mg / L) and alkalinity (241 mg / L). In the DFF process, turbidity responses between 7.8 uT and 28.1 uT are observed, and according to the Pareto graph the greatest effects on the sample's turbidity result were the coagulant dosage variables (9.45) and sedimentation time (-10.70). In the CRCD process, the turbidity result between 5.2 and 26.1 uT was obtained through a regression model and according to the Pareto graph, the two variables X1 Dosage (mg / L) and X2 Sedimentation Time (min) showed considerable significance for the response. Through the analysis of variance, the R^2 coefficient reached by the regression was 0.9641, showing a good fit of the model. The results determined the statistical model that represents the removal of gray water turbidity through the coagulation / flocculation / decantation process.

Keywords: Gray Waters, Turbidity. Statistical model.



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

FIGURAS

Figura 1: Distribuição das águas na Terra.....	16
Figura 2: Consumo de água por setor nas regiões metropolitanas do Brasil.	17
Figura 3: Ilustração da transição entre águas negras e águas cinza - escuras e claras.	18
Figura 4: Composição média do esgoto doméstico gerado no Brasil.	20
Figura 5: Desenho esquemático das atividades a serem realizadas	23
Figura 6: Equipamento Jarrest.....	24
Figura 7: Representação do planejamento experimental dos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação.....	25
Figura 8: Equipamento turbidímetro	26
Figura 9: Representação do planejamento experimental utilizado na remoção de turbidez de água cinza através de coagulação química (Delineamento composto central rotacional 2^2).	27
Figura 10: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 – DFF 2^{4-1}	21
Figura 11: Valores observados versus valores previstos para a remoção de corante	35
Figura 12: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 e X_2 – DCCR 2^2).....	35
Figura 13: Superfície de contorno para a variação da turbidez por meio do DCCR 2^2	36



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

TABELAS

Tabela 1: Ordem dos experimentos empregados no DFF	2 ⁴¹
.....	25
Tabela 2: Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a coagulação química de água cinza	
.....	27
Tabela 3: Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR	2 ²
.....	27
Tabela 4: Métodos analíticos aplicados na caracterização físico-química de água cinza bruta e após tratamento por coagulação química.....	28
Tabela 5: Caracterização da AC bruta e coagulada comparada com outras pesquisas em AC de máquinas de lavar	
.....	29
Tabela 6: Respostas de turbidez (AC após DFF	2 ⁴⁻¹
1).....	31
Tabela 7: Efeitos das variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 no DFF	2 ⁴⁻¹
1.....	33
Tabela 8: Respostas de turbidez (AC após DCCR 2 ²).	
.....	34
Tabela 9: Ajuste de um modelo de regressão para as variáveis X_1 e X_2 do DCCR	22.
.....	34
Tabela 10: ANOVA para o teste de turbidez por meio do DCCR	22
.....	37
Tabela 11: Enquadramento da AC e suas possíveis aplicações	
.....	37



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

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Água Cinza
ADASA	Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal.
ANA	Agência Nacional de Água
cm	Centímetros
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
°C	Graus Celsius
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DFF	Delineamento Fatorial Fracionado
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
HCL	Ácido clorídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NaOH	Hidróxido de sódio
pH	Potencial Hidrogeniônico



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

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.1	REVISÃO DE LITERATURA	15
1.2	Água.....	15
1.2.1	No mundo	15
1.2.2	No Brasil	16
1.3	Águas Cinza	17
1.3.1	Composição das Águas Cinza.....	18
1.3.2	Breve histórico do uso das Águas Cinza	20
1.3.3	Vantagens do tratamento de Águas Cinza	21
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
2.1	Teste de Coagulação/floculação/Decantação.....	24
2.2	Planejamento Experimental: Delineamento Fatorial Fracionado (2^{4-1})	24
2.3	Planejamento Experimental: Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).....	26
2.4	Testes empregados na caracterização das amostras de água cinza bruta e tratada	28
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
3.1	CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA CINZA DE LAVANDERIA	24
3.1.1	Resultados da análise da água cinza bruta	29
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	24
3.2.1	Delineamento Fatorial Fracionário 2^{4-1}	31
3.2.2	Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR 2^2)	18
3.2.3	Enquadramento da AC e suas possíveis aplicações	18
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	REFERÊNCIAS.....	41



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

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional desordenado, aliado ao avanço do padrão de vida, tem como consequência diversos problemas ambientais que não tem sido ajustado, muitas vezes, de maneira mais adequada. No meio desses, destaca-se a geração de Águas Cinza e as dificuldades para o seu reuso, devido as substâncias físicas e químicas presentes (ADASA, 2018).

A água é a condição essencial de vida de todo ser vegetal, animal ou humano e sem ela não se poderia conceber a vegetação, clima, a agricultura e etc. De acordo com o Art. 30 da Declaração Universal dos Direitos Humanos em 2005, o direito a água é um dos direitos fundamentais do ser humano: o direito à vida. Em síntese, é o recurso natural mais substancial para a evolução da humanidade, muitíssima preciosa e limitada.

No decorrer de muitos anos houve uma relação estável entre disponibilidade na natureza e consumo humano, entretanto com o crescimento da população e a globalização, este recurso passou a ser cada vez mais escasso. Com o aumento desenfreado das cidades devido ao crescimento populacional, fatores como o aumento na carga de efluentes despejados em mananciais, redução de áreas verdes, e o aumento na demanda hídrica (ONU, 2008).

De acordo com a Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal - ADASA (2017), no Brasil, a comercialização de sistemas de aproveitamento de águas pluviais e de reuso de águas cinzas iniciou-se no começo dos anos 2000 e, mesmo com uma viabilidade ainda não-comprovada, observamos, a cada ano, edificações implementando estes sistemas prediais de água não-potável em prol da sustentabilidade.

Se de um lado, a prática do aproveitamento e do reuso de água é estimulada por quesitos relativos à baixa disponibilidade hídrica e pelo constante aumento na demanda por água, em contrapartida, seus custos de investimento podem gerar um empecilho para sua implementação (ADASA, 2017).

O desenvolvimento de tecnologias e soluções alternativas são de extrema importância, sendo que o aumento populacional faz com que a demanda pelos



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

recursos hídricos aumente cada vez mais e o incentivo ao uso racional da água é uma maneira de prevenção a escassez.

Métodos alternativos para atenuar o problema da obtenção de água estão sendo empregados em diversas cidades pelo mundo. Técnicas como a captação e utilização de água de chuva, utilização de águas marítimas dessalinizadas e a utilização de águas de reuso (cinzas e negras) são alternativas para aperfeiçoar utilização dos recursos hídricos.

Apesar da carência em incentivos fiscais e econômicos para subsidiar as tecnologias de reuso das águas, o poder legislativo e os órgãos públicos (federais, estaduais e municipais) vêm apresentando uma série de leis e resoluções que estimulam, direta ou indiretamente, o aproveitamento de águas pluviais e o reuso de água em edificações. A Resolução nº 54/2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH oferece um respaldo legal para a prática do reuso de águas cinzas no ambiente construído. No Distrito Federal, com Leis Distritais que tornam obrigatório a captação, armazenamento e utilização das águas pluviais em novas construções urbanas para a concessão de habite-se (ADASA, 2017).

Segundo Gewehr (2009), as condições ambientais sanitárias ideais no Brasil estão num patamar muito abaixo do concebido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, o esgoto gerado é pouco coletado, sendo muitas vezes despejado diretamente nos corpos receptores, desse pouco, apenas uma pequena parte é tratada corretamente.

Este trabalho consiste em realizar o tratamento das águas cinza oriunda de uma lavanderia industrial para remoção da turbidez por meio de teste de coagulação/floculação/decantação, analisando suas características e indicando o modelo estatístico que representa a eficiência do processo adotado.

Durante o tratamento de água cinza visando reuso, são propostos diferentes sistemas, desde processos simples como filtro de areia, até processos mais complexos como reatores biológicos. É importante aqui mencionar que a maioria dos tratamentos é precedida de uma etapa de separação sólido-líquido (remoção de



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

turbidez). Qual o comportamento dos coagulantes (tradicionalmente usados no tratamento de água de abastecimento) na remoção de turbidez de águas cinza?

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com estudos feitos pela ADASA (2017), conclui-se que com a atual necessidade por reuso das águas, vem surgindo um novo modelo de abastecimento descentralizado no país, que faz uso de fontes alternativas de água em usos não-potáveis. Sistemas de aproveitamento no reúso de águas cinzas são preparados para promover reduções significativas no consumo predial e de garantir um abastecimento contínuo nas principais atividades consumidoras de água em caso de cortes no abastecimento.

Medidas como as supracitadas, tomada em larga escala, são capazes de reduzir os impactos gerados pela exploração de recursos hídricos, como por exemplo 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 (ADASA, 2017).

No caso de lavanderias de grande escala, em sua maior parte utiliza nas suas atividades águas de poços tubulares profundos, que prescinde passar processo de tratamento, sendo assim, emitem toda a água residuária na rede de esgoto (MENDONÇA, 2019).

Nesse sentido, é substancial que se analise as características do efluente das lavanderias, afim de verificar as características obtidas após serem submetidas aos testes de coagulação/floculação/decantação para definição do enquadramento em possíveis usos de acordo com as normas e procedimentos definidos pelo CNRH e Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos.

Portanto, é indispensável as pesquisas para que a regulamentação da prática de reúso da água cinza seja realizada a partir de normas técnicas bem definidas e adequadas. Diante disso, é interessante avaliar a possibilidade de reúso das águas cinza geradas em lavanderias comerciais e industriais da cidade de Palmas-TO, para que os resultados possam subsidiar o modelo estatístico que representa a eficiência



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

do processo adotado no trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar a remoção de turbidez de águas cinza através de teste de coagulação/floculação/decantação.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar as amostras de águas cinza de lavanderia industrial através de análises físico-químicas;
- b) Aplicar o processo de coagulação/floculação/decantação para a remoção de turbidez de águas cinza de lavanderia industrial em formato de ensaios de bancada;
- c) Determinar o modelo estatístico que representa a remoção de turbidez de águas cinzas através do processo de coagulação/floculação/decantação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Água

2.1.1. No mundo

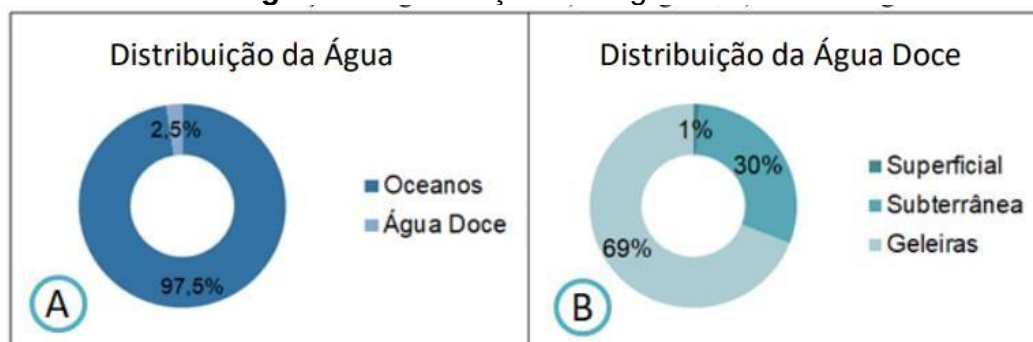
A água é parte integral do planeta Terra. É elemento fundamental de dinâmica da natureza, impulsiona todos os ciclos, sustenta a vida, além de ser o solvente universal. Sem água, não seria viável a vida na Terra. A água tem serventia para o ser humano para suas funções vitais bem como para um vasto conjuntos de



atividades, por exemplo, produção de alimentos e energia, navegação, desenvolvimento industrial, econômico e agrícola (TUNDISI, 2003).

De acordo com a Agência Nacional de Água - ANA (2018), a superfície terrestre, ao receber a precipitação, reage com o solo através da infiltração, do escoamento superficial e da percolação. Contribuindo desta forma para as recargas hídricas, tanto em forma de alimentação dos fluxos de água subterrânea como em descargas nos reservatórios superficiais, bem como da umidade dos solos e da atmosfera. Conforme Figura 1, considera-se, que a quantidade total de água na Terra seja de 1.386 milhões de km³, em que 97,5% do volume total formam os oceanos e mares, e somente 2,5% constituem-se de água doce.

Figura 1: Distribuição das águas na Terra



Fonte: ANA (2018)

2.1.2 No Brasil

De acordo com os dados da Organização das Nações Unidas - ONU (2007), em maio de 2007, a população mundial urbana ultrapassou a população rural. Quanto a população urbana brasileira já havia ultrapassado a rural em 1960. Ainda que esta segmentação entre o urbano e o rural não seja bem definida, dados do governo brasileiro indicaram que em 1996 cerca de 80% da população brasileira residia nas áreas urbanas e apenas 21,7% vivia no meio rural (IBGE, 1998).

Destaca-se que essa concentração da população urbana tem influenciado à diminuição dos índices de disponibilidade específica de água, o que é motivo de preocupação de governos e sociedade.



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

De acordo com a Figura 2, o setor que mais consome água nas regiões metropolitanas é o de irrigação, com aproximadamente 66%. As atividades que menos consomem são as das termelétricas e mineração (ANA, 2018.).

Figura 2: Consumo de água por setor nas regiões metropolitanas do Brasil.



Fonte: ANA (2018)

2.2 Águas Cinza

De acordo com o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) em 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 - reuso de água: utilização de água residuária;
- III - água de reuso: água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas;
- IV - reuso direto de água: uso planejado de água de reuso, conduzida ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos *hídricos superficiais* ou subterrâneos.

A qualidade das águas cinza pode mudar conforme o local, estilo de vida, classe social, cultura e costume dos residentes e devido a quantidade de ocupação na moradia. Elas podem ainda apresentar características diferentes, o que depende do ponto de amostragem (JOVENTINO, 2010).



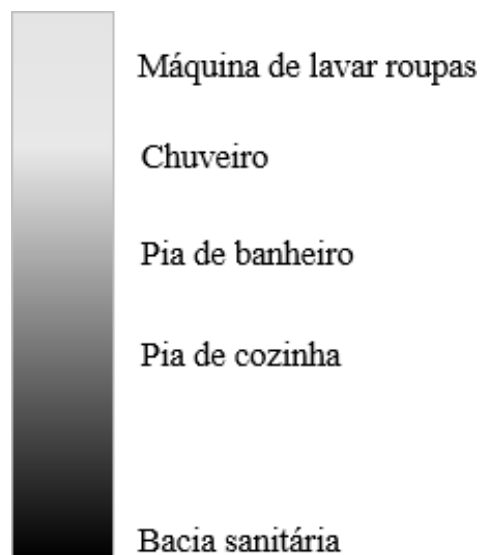
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS CAMPUS PALMAS CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Dentre as águas residuárias, evidenciam-se as águas cinza (AC), assim chamadas por apresentar um aspecto de coloração entre a água potável (límpida) e o esgoto bruto (marrom escuro), conforme Figura 3.

Além dos conceitos de águas negras (blackwater) e águas cinzas (greywater) conforme Otterpohl (2001), acrescenta os termos de águas amarelas para efluentes representados somente pela urina e águas marrons para efluentes representados somente pelas fezes.

De acordo com Eriksson *et al.* (2002) as águas cinza são divididas em águas cinza claras e escuras, sendo as 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 3: 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).

2.2.1 Composição das Águas Cinza

Peprah *et al.* (2018) discutem que o estilo de vida e tipo e quantidade de produtos químicos usados em limpeza, banhos e lavagem de roupa são reflexos da constituição das águas cinza que a composição das águas cinza. A qualidade da água potável e a forma de distribuição também atingem as características das águas cinza.



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

Existirão variações na composição das águas cinza vinculados a variação entre água consumida e água cinza gerada em cada atividade.

Quanto aos parâmetros físicos, segundo May (2008), a turbidez e sólidos suspensos são os encarregados por indicar o conteúdo de partículas e a sua existência podem causar o entupimento do sistema de coleta, tratamento e distribuição de águas cinzas. Ao se utilizar grades finas ou peneiras, obtém-se a remoção dos sólidos grosseiros; atenuando o risco de entupimento.

De acordo com May (2008), os parâmetros químicos analisados nas águas cinzas, estes se distribuem em quatro grupos: composto nitrogenados; composto fosforados; composto orgânico; e outros parâmetros (pH, oxigênio dissolvido, condutividade, alcalinidade, dureza, cloreto e óleos e graxas). A matéria orgânica identificada nas águas cinzas é proveniente de resíduos corporais, cabelo, sabão, óleos e graxas, etc.; já a matéria inorgânica é resultante basicamente de produtos químicos e detergentes utilizados na limpeza.

No tocante aos parâmetros biológicos, os micro-organismos patogênicos (protozoários, bactéria, vírus e helmintos) podem oferecer perigo de contaminação em usuários que sejam expostos as águas residuárias quando não tratadas. Não deveria se encontrar urina em águas cinzas, porém sua presença é comum em águas provenientes do chuveiro, a urina geralmente é estéril e inofensiva, porém infecções podem ser motivadas por patógenos existentes na urina (MAY, 2008).

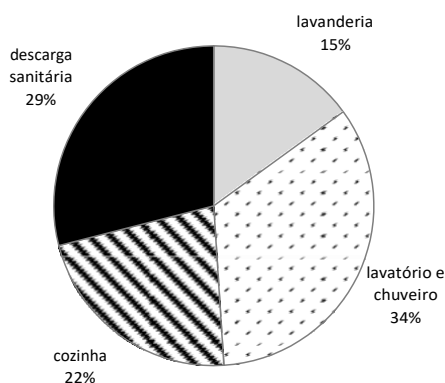
Normalmente, as águas cinza contêm grandes concentrações de matéria orgânica facilmente degradável, dentre elas os nitratos e seus derivados, fósforo e seus derivados, e algumas podem incluir microrganismos como coliformes fecais, salmonela. Peprah *et al.* (2018) reiteram que a composição de uma água cinza é de difícil previsão, principalmente quando existe a hipótese de que ela possa por ventura conter produtos farmacêuticos, aerossóis, tintas e metais pesados como chumbo, níquel, cádmio, cobre, mercúrio e cromo em quantidades razoáveis.

De acordo com a Figura 4 é mostrada a composição média de esgoto doméstico gerado no Brasil, segundo 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.

Brasil (Bazzarella, 2005)



Fonte: Mendonça (2019).

Conforme Gonçalves (2006), de toda a água potável consumida, em torno de 40% é utilizada em fins não potáveis, sendo que Shouler *et al.* (1998 *apud* Lazarova *et al.*, 2003) destacam que em residências, cerca de 30% da água potável é utilizada em descargas sanitárias e 60% quando trata-se de edifícios comerciais.

No que diz respeito às águas cinza geradas em lavanderias, têm-se 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 (MOHAMED, 2011).

2.2.2 Breve histórico do uso das Águas Cinza

O primeiro indício histórico de reuso de água para irrigação refere-se à Idade do Bronze em Creta, aproximadamente há 5000 anos. Na história mais atuais, refere-se 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 utilizavam o esgoto como fonte de nutrientes para a agricultura (ANGELAKIS *ET AL.*, 2015).



2.2.3 Vantagens do tratamento de Águas Cinza

O jeito mais simples para fazer o reuso de águas cinzas, é acumulando as águas da máquina de lavar roupas em um barril (bombona), utilizando um balde para sua extração em lavagem de pisos. A prática do 'tonel & balde' é muito habitual em casas de média a baixa renda e é popularmente realizado em dias de faxina – aproveitando a água cinza da máquina no mesmo dia, para evitar a degradação do efluente não tratado (ADASA, 2017).

O reuso das águas cinza além de reduzir o consumo de água potável, também reduz o volume de água descartada na rede de esgoto. Langergraber e Muellergerger (2005) julgam um dos grandes problemas dos tratamentos de esgoto, a mistura de pequenas quantidades de substâncias potencialmente prejudiciais com grandes quantidades de água.

Hespanhol (2008) assegura que as águas cinza apresentam potencial de reuso para fins não potáveis quando são adequadamente tratadas. E apresenta como relevantes 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, necessitando, dessa maneira, níveis de tratamento inferiores ao de esgotos sanitários.

O reuso de Águas Cinza nos sistemas isolados nas edificações, fazem a distribuição direta a pontos de uso externo por gravidade ou bombeamento. Normalmente, encontram dois tipos de sistemas: o sistema de desvio de água cinza bruta; e o sistema pressurizado de água cinza tratada (ADASA 2017). Sistemas de desvio de água cinza bruta é responsável pela irrigação subsuperficial, enquanto sistemas pressurizados de água cinza tratada são utilizadas na irrigação por aspersão e na lavagem de pisos (ADASA, 2017).

Normalmente, os sistemas integrados fazem o recalque da água tratada para um reservatório de distribuição situado na cobertura da edificação. Por gravidade, pontos de uso interno e externo são abastecidos para uso não potável em descarga sanitária, torneiras de uso geral, torneiras de jardim, entre outros. A distribuição da



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

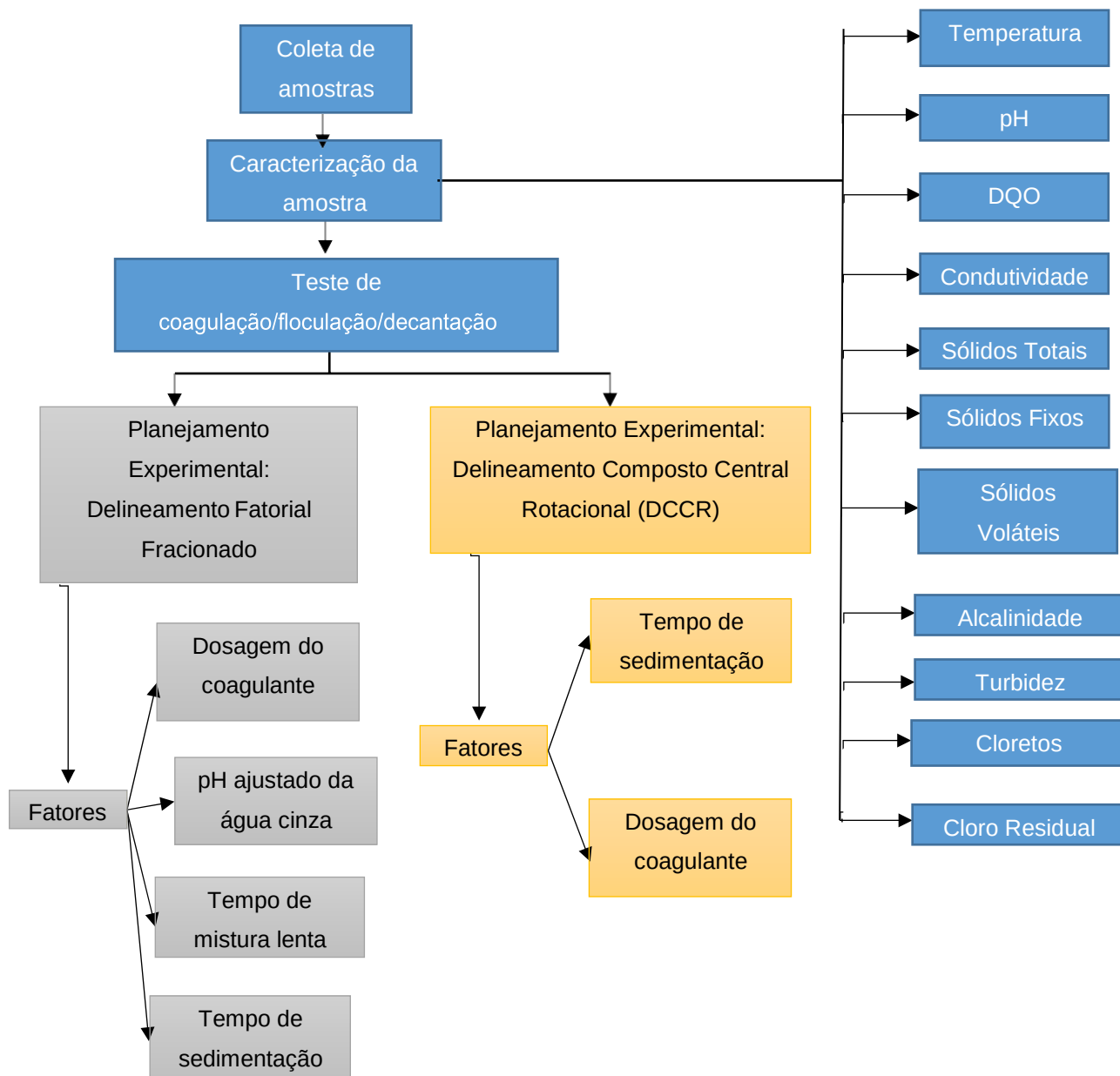
água não potável pode ser mista. Para tanto, uma bomba pressurizadora é usada para o abastecimento direto em pontos de usos externos, e para o abastecimento indireto por meio de recalque ao reservatório de distribuição (ADASA, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 5 apresenta o desenho esquemático com todas as atividades que foram desenvolvidas durante esta pesquisa. A água cinza utilizada foi coletada de uma lavanderia industrial, localizada na cidade de Palmas, Tocantins. 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 5: Desenho esquemático das atividades a serem realizadas



Fonte: Próprio autor

No reservatório da amostra foi feito o ajuste do pH 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.



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

1.1 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 6). Durante a mistura rápida foi adotada uma velocidade de 160 rpm por 10 minutos. Foi empregado como agente coagulante solução de sulfato de alumínio 1%. Para o ajuste do pH da água cinza foram empregadas soluções de ácido clorídrico - HCl 1 mol/L e hidróxido de sódio - NaOH 1 mol/L.

Figura 6: Equipamento *Jarrest*



Fonte: Próprio autor

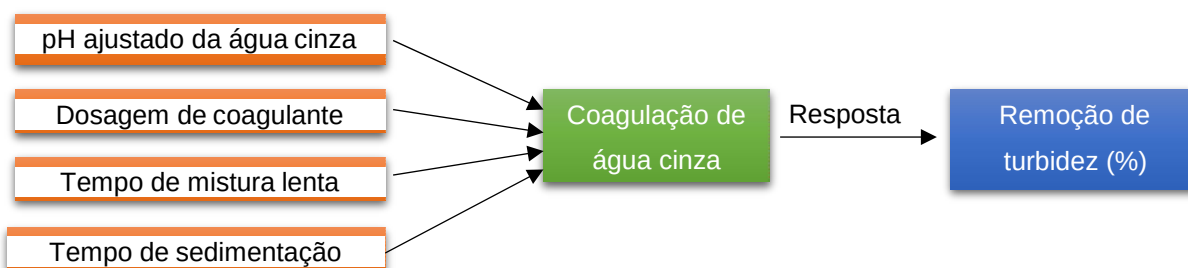
3.2 Planejamento Experimental: Delineamento Fatorial Fracionado (2^{4-1}) - DFF 2^{4-1} .

Foi verificado 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. Foi adotado o Delineamento Fatorial Fracionado (2^{4-1}), com 8 experimentos, com a utilização da geratriz I = abcd, nessa etapa da pesquisa, conforme Figura 7. Os fatores estudados foram: (a) pH ajustado



da água cinza, (b) dosagem do coagulante, (c) tempo de mistura lenta e (d) tempo de sedimentação.

Figura 7 - Representação do planejamento experimental dos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação.



Fonte: Próprio autor

A Tabela 1 apresenta a ordem dos experimentos que foi adotada nessa etapa da metodologia experimental.

Tabela 1 - Ordem dos experimentos empregados no DFF 2⁴⁻¹.

Ordem dos experimentos	Fatores			
	pH (-)	Dosagem do coagulante (mg/L)	Tempo de mistura lenta (min)	Tempo de sedimentação (min)
1	7	100	10	10
2	8	100	10	40
3	7	300	10	40
4	8	300	10	10
5	7	100	20	40
6	8	100	20	10
7	7	300	20	10
8	8	300	20	40

Fonte: Próprio autor

Os domínios das faixas dos parâmetros (valores mínimos e máximos para os fatores) estão de acordo com Rodrigues (2019). Após a realização dos ensaios, foram coletadas amostras das jarras para análise de turbidez. Foi empregado o turbidímetro modelo 2100q, da marca Hach (Figura 8).



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

Figura 8 - Equipamento turbidímetro



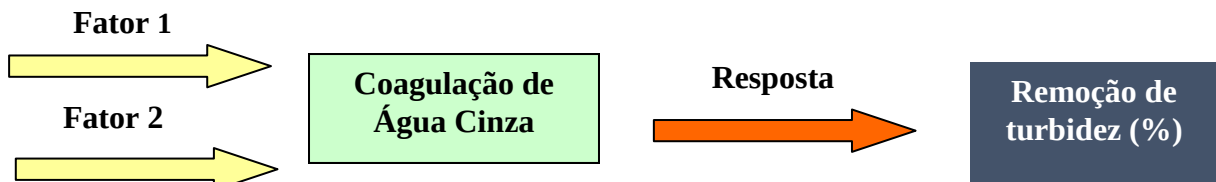
Fonte: Próprio autor

3.3 Planejamento Experimental: Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Após aplicação do Planejamento Fatorial Fracionado, foi verificado através de planejamento multivariável o efeito de dois fatores na remoção de turbidez de água cinza em teste de coagulação química em Jar Teste (Figura 9). Foi aplicado um planejamento experimental fracionário 2^2 – 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 2. O pH da água cinza foi ajustado para 5,5 e o tempo de mistura rápida será de 15 minutos.



Figura 9 – Representação do planejamento experimental utilizado na remoção de turbidez de água cinza através de coagulação química (Delineamento composto central rotacional 2^2)



Fonte: Próprio autor

Onde:

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

Tabela 2 – 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)	129	150	200	250	271
Tempo de sedimentação (min)	5,9	10	20	30	34

Fonte: Próprio autor

Os experimentos foram realizados de forma aleatória, com três repetições no ponto central conforme Tabela 3.



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

Tabela 3 – Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2²

Ordem dos experimentos	Fatores	
	Dosagem do coagulante (mg/L)	Tempo de sedimentação (min)
1	150	10
2	250	10
3	150	30
4	250	30
5	200	20
6	200	20
7	200	20
8	129	20
9	200	34
10	271	20
11	200	5,9

Fonte: Próprio autor

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

Amostra de água cinza bruta e após o processo de coagulação química foram coletadas, armazenadas e analisadas. Todas as amostras foram coletadas em garrafas plásticas. As determinações seguiram as recomendações de APHA/AWWA/WEF (1998), conforme Tabela 4.



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

Tabela 4 - 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
Cloro residual	spectrofotométrico

Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA CINZA DE LAVANDERIA

4.1.1. Resultados da análise da água cinza bruta

A Tabela 5 apresenta os resultados dos parâmetros medidos na AC bruta e Coagulada obtidos nessa pesquisa bem como uma comparação com outros valores encontrados na literatura.



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

Tabela 5: Caracterização da AC bruta e coagulada comparada com outras pesquisas em AC de máquinas de lavar.

PARÂMETRO ANALÍTICO	RESULTADOS							
	Amostra bruta – Autor (2021)	Amostra coagulada – Autor (2021)	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	25	25 ± 3,5	-		62	32,0	-
pH (-)	9,2	6,1	7,4 ± 1,2	9,1	9,1	9,6	-	9,3-10
DQO (mg/L)	200	141	300±142	-	521	180	-	-
-Condutividade (uS/cm)	300	281	364±196	641,6	524	-	-	190-1400
Sólidos Totais (mg/L)	2700	1050	391±215	586,0	1004,0	-	1340,0	-
Sólidos Fixos (mg/L)	850	800		-		-	-	-
Sólidos Voláteis (mg/L)	1850	250		-		-	-	-
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	241	101		721,0	74,2	-	-	83-200
Turbidez (uT)	112	5,3	49±36	108,6	58,0	-	-	50-210
Cloretos (mg/L)	92	89		37,3	23,6	-	-	9-88
Cloro residual (mg/L)	0,3	0,2		-		<0,1	-	-

Fonte: Próprio autor.

O pH obtido na amostra de água cinza (9,2) muito próximo aos obtidos por Edwin et al. (2014), Bazzarella (2005), Sostar-Turk et al. (2005) mas é inferior Christova-Boal et al. (1996) e superior ao de Rampelotto (2014). 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 241 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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS CAMPUS PALMAS CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL amostra de lavanderia.

Os parâmetros obtidos para turbidez (112 uT) e condutividade elétrica (300 $\mu\text{S/cm}$) estão todos dentro dos intervalos encontrados para esses parâmetros por Christova-Boal *et al.* (1996). Já os Cloretos (92 mg/L) estão um pouco acima do intervalo estabelecido 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 $\mu\text{S/cm}$. Rampelotto (2014) definiu o intervalo de 168 a 560 $\mu\text{S/cm}$, sendo que o intervalo proposto por Christova-Boal *et al.* (1996) é de 190 a 1400 $\mu\text{S/cm}$.

O Cloro residual obtido nesta pesquisa (0,3 mg/L) foi maior que o limite superior encontrado por Sostar-Turk *et al.* (2005).

Esta pesquisa encontrou o valor de 200 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 11,1% 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.

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. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

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 Rotacional (DCCR).

4.2.1. Delineamento Fatorial Fracionário 2^{4-1}



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

Os valores obtidos para o parâmetro turbidez quando realizado o Delineamento Fatorial Fracionário (DFF) 2^{4-1} com verificação do comportamento dos fatores 1 (pH da água cinza), 2 (dosagem do coagulante em mg/L), 3 (tempo de mistura lenta em minutos) e 4 (tempo de sedimentação em minutos) no processo de coagulação, floculação e sedimentação da AC estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Respostas de turbidez (AC após DFF 2^{4-1}).

Turbidez	Fatores			
	1 (pH)	2 (Dosagem)	3 (Tempo de mistura)	4 (Tempo de sedimentação)
27,9	7	300	20	10
15,1	8	100	20	10
7,9	7	100	20	40
16,5	7	100	10	10
17,0	7	300	10	40
7,8	8	100	10	40
28,1	8	300	10	10
12,1	8	300	20	40

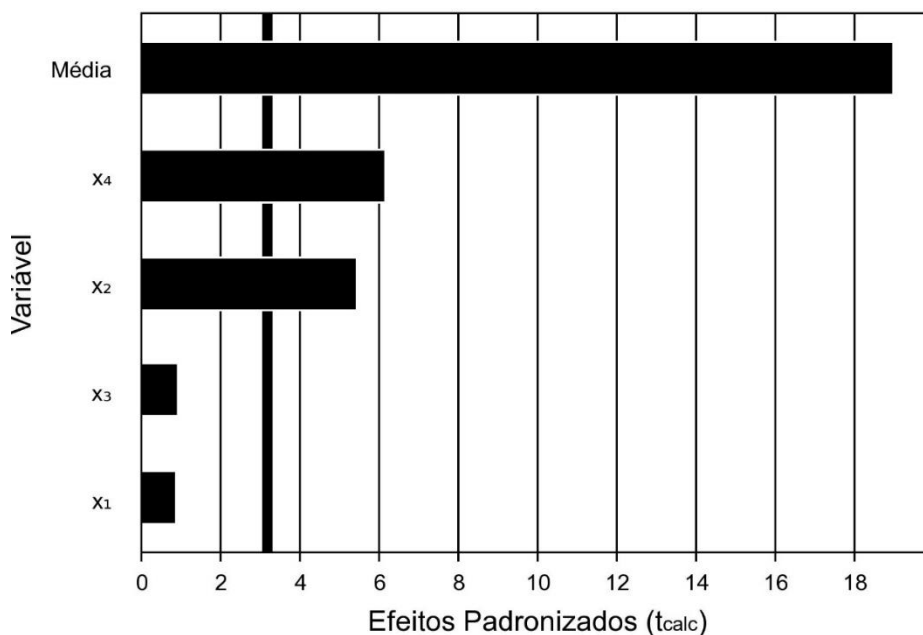
Fonte: Próprio autor.

Observa-se respostas de turbidez entre 7,8 uT e 28,1 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 10, considerando-se um nível de significância de 5%.



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

Figura 10: 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 (9,45) e da variável X_4 - tempo de sedimentação (-10,70), conforme mostrado na Tabela 7. 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 7: 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	16,55	0,87	19,00	0,0003
X_1	-1,55	1,74	-0,89	0,4392
X_2	9,45	1,74	5,42	0,0123
X_3	-1,60	1,74	-0,92	0,4261
X_4	-10,70	1,74	-6,14	0,0087

Fonte: Próprio autor.

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS CAMPUS PALMAS CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
tempo de mistura lenta e o pH não apresentaram efeito significativo nos índices de turbidez.

4.2.2. Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR 2²)

Buscando-se a otimização dos melhores níveis dos fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação, foram feitos novos experimentos, fez-se novos experimentos, considerando-se agora o Delineamento Composto Central Rotacional, e os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Respostas de turbidez (AC após DCCR 2²).

Ensaio	Fatores		Turbidez
	X ₁	X ₂	
	Dosagem (mg/L)	Tempo de Sedimentação (min)	
1	150	10	16,8
2	250	10	24,4
3	150	30	5,2
4	250	30	14,7
5	200	20	11,9
6	200	20	11,8
7	200	20	12,0
8	200	5,9	26,1
9	200	34	5,3
10	129	20	14,2
11	271	20	23,5

Fonte: Próprio autor.

Obteve-se como resultados turbidez entre 5,2 e 26,1 uT, sendo que o modelo de regressão obtido (Tabela 9) fornece também a turbidez esperada para o modelo definido por essa regressão. A Figura 11 apresenta a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado.



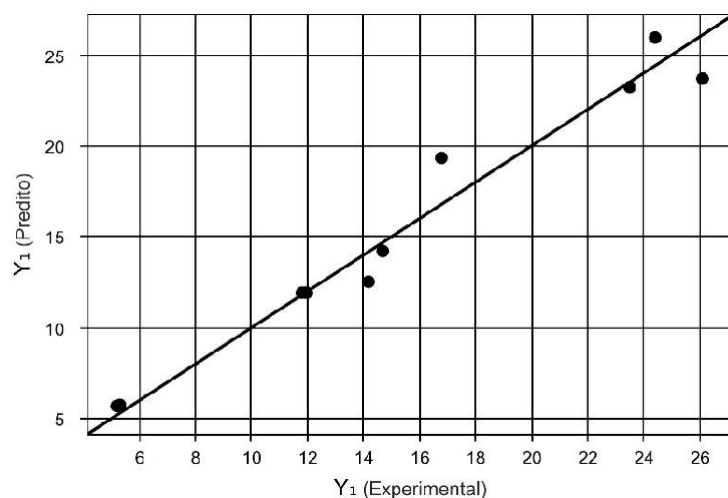
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS CAMPUS PALMAS CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Tabela 9: Ajuste de um modelo de regressão para as variáveis Dosagem - X_1 e Tempo de Sedimentação - X_2 do DCCR 2².

Nome	Coeficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	11,90	1,10	10,80	0,0001
X_1	3,78	0,67	5,61	0,0025
X_1^2	2,97	0,80	3,71	0,0139
X_2	-6,34	0,67	-9,40	0,0002
X_2^2	1,40	0,80	1,74	0,1417
$X_1 \cdot X_2$	0,48	0,95	0,50	0,6397

Fonte: Próprio autor

Figura 11 - Valores observados versus valores previstos para a remoção de corante.



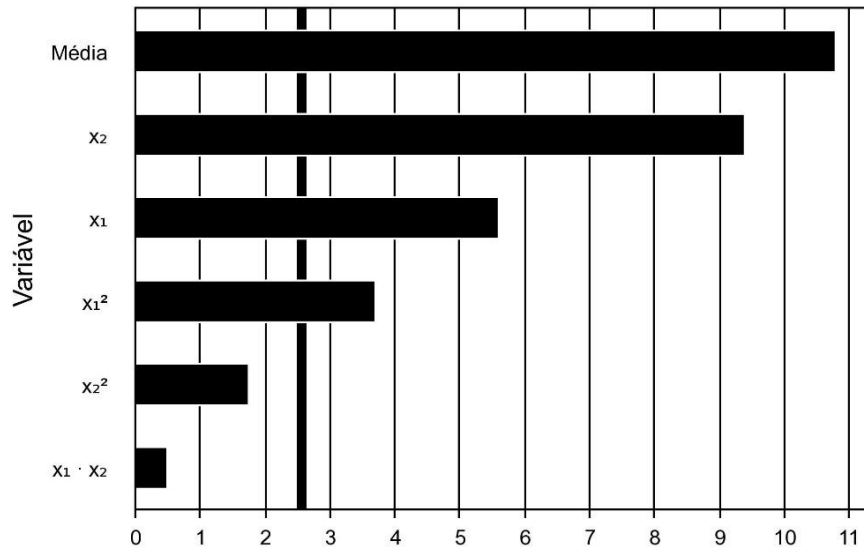
Fonte: Próprio autor

As duas variáveis X_1 e X_2 apresentaram considerável significância para a resposta, como apresentado no Gráfico de Pareto da Figura 12.



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

Figura 12: Gráfico de Pareto para análise dos efeitos das variáveis X_1 e X_2 – DCCR 2^2 .



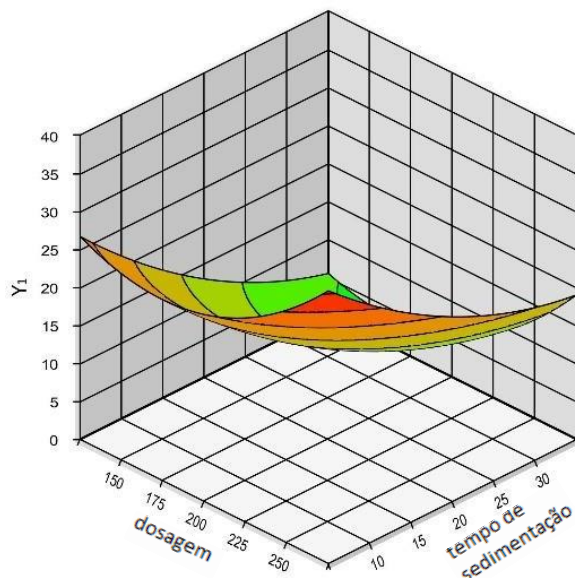
Fonte: Software Protimiza.

Na Figura 13 apresenta-se a superfície de resposta ao DCCR 2^2 , onde percebe-se a influência das variáveis tempo de sedimentação quando varia entre os níveis 59 minutos (-1,41) a 34 minutos (+1,4) e da dosagem do coagulante quando varia entre os níveis 129 mg/L (-1,41) a 271 mg/L (+1,41). 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.



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

Figura 13: Superfície de contorno para a variação da turbidez por meio do DCCR 2².



Fonte: Software Protimiza.

Na Tabela 10 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 0,9641, mostrando um bom ajuste do modelo.

Tabela 10: ANOVA para o teste de turbidez por meio do DCCR 2².

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc.	p-valor
Regressão	488,5	5	97,7	26,8	0,00128
Resíduos	18,2	5	3,6		
Falta de ajuste	18,2	3	6,1	606,0	0,00165
Erro puro	0,0	2	0,0		
Total	506,7	10			
R2 = 96,41%					

Fonte: Software Protimiza.



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

4.2.3 Enquadramento da AC tratada a possíveis usos como água de reuso

A Tabela 11 traz referência de legislações para aplicação de águas cinzas já praticados em outros países, o qual pode servir de base para a prática no Brasil.

Tabela 11: Enquadramento da AC e suas possíveis aplicações

Legislação	País	Turbidez (uT)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	Aplicação
Code of Practice for the Reuse of Greywater (2008)	Austrália	-	20	-	-	Irrigação por aspersão de superfície, irrigação por gotejamento de substratos, Irrigação por gotejamento em valas de subsolo ou subsolo.
The Guidelines for water Reuse - USEPA (2012).	Estados Unidos da América - EUA	≤ 2	≤ 10	-	6 – 9	Reúso urbano - não restrito.
Greywater for Domestic Users: An Information Guide (2011)	Reino Unido	≤ 10	-	-	5 - 9	Aplicação sem spray: Rega de jardim. Aplicação sem spray: Uso em máquina de lavar.
Guidelines for Household Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing. (2010)	Canadá	≤ 5	20	-	-	Descarga em vaso sanitário.
Conselho Central de Controle da Poluição – CCCP (2008)	Índia	20,6 – 38,7	56 – 100	244-284	7,3 – 8,1	Aplicação na agricultura e resfriamento industrial.

Fonte: Próprio autor

De acordo com a Tabela 11, ao se comparar as características do efluente tratado dessa pesquisa com os níveis de aceitação dos outros países, é possível destiná-lo para irrigação do subsolo, superficial, subterrânea, por aspersão e por gotejamento, segundo a normativa da Austrália. De acordo com a Agência de



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

Proteção Ambiental (USEPA) dos Estados Unidos, é possível seu reuso urbano não restrito. Conforme o pH e turbidez exigido pela regulamentação do Reino Unido, a AC se enquadra para reuso predial, reuso na máquina de lavar roupa e rega de jardim. Já em relação ao estabelecido pelo Conselho Central de Controle da Poluição da Índia, seria possível a aplicação na agricultura.

Deve-se levar em consideração alguns pontos que interferem a prática do reuso, por exemplo a aceitação da sociedade e situação econômica. Apesar de sistemas de reuso de água possam promover economia financeira quanto ao consumo de água potável e geração de esgoto, os custos aplicados para implantação, funcionamento e manutenção desses sistemas devem ser detalhados e apreciados de forma minuciosa a fim de verificar se a proposta é economicamente viável ou não.



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

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A água cinza pode ser uma fonte alternativa importante para o suprimento de água em períodos de escassez. A análise da qualidade da AC indicou melhora significativa na qualidade da água residuária, contudo, há necessidade de tratamento para possibilitar o seu reuso não potável. Ao analisar algumas regulamentações internacionais, pode-se citar determinadas atividades para reuso da AC, como: irrigação do subsolo, superficial, subterrânea, por aspersão e por gotejamento, reuso urbano não restrito, reuso predial, reuso na máquina de lavar roupa e rega de jardim e aplicação na agricultura.

Dentre as propriedades analisadas da AC após o processo de coagulação se destaca as reduções que aconteceram principalmente na DQO (200mg/L para 141 mg/L), turbidez (112uT para 5,3uT), alcalinidade (241 mgCaCO₃/L para 101 mgCaCO₃/L) e pH (9,2 para 6,1).

A aplicação do Delineamento Fatorial Fracionado (2^{4-1}) e seguido pelo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR2²), foram importantes para a otimização do tratamento, permitindo que com um menor número de dados fosse possível avaliar um maior espaço experimental para as concentrações de coagulantes empregados no tratamento. De modo geral, observou-se que a associação dos coagulantes químicos pode resultar numa melhora da qualidade da água cinza, pois foi obtido resultado de turbidez entre 5,2 e 26,1uT, e as variáveis de dosagem e tempo de sedimentação apresentaram considerável significância para a resposta.

Quanto a geração de um modelo estatístico que representa a remoção de turbidez de águas cinzas através do processo de coagulação/floculação/ decantação, constatou-se que através da análise de variância, o coeficiente R² atingido pela regressão foi de 0,9641, mostrando um bom ajuste do modelo.



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

REFERÊNCIAS

ADASA. **Aproveitamento de Águas Pluviais e Reúso de Águas Cinzas em Edificações**. Brasília: Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. 2017. Disponível em: http://www.adasa.df.gov.br/images/storage/area_de_atuacao/abastecimento_agua_e_sgotamento_sanitario/regulacao/reuso_aguas_cinza_aproveitamento_aguas_pluviais/reusodf_2_padroes_qualidade.pdf . Acesso em: 13 out. 2020.

ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). **Água no mundo: Situação da Água no Mundo**. 2018. Disponível em: . Acesso em: 05 dez. 2020.

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

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.

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 reuso direto não potável de água. Brasília – DF, 2005.

Central Pollution Control Board - CPCB (2008). **Requirement and Procedure for Monitoring Ambient Noise Level due to Aircrafts**. Ministry of Environmental & Forests, Government of India. *Documento técnico CPCB*. Disponível em <www.cpcb.nic.in> acesso em 29 dez. 2020

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.

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.

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

Environment Agency, 2011. **Greywater for Domestic Users: an Information Guide**. Available at: <<http://www.environment-agency.gov.uk>> acesso em 29 dez. 2020.

GEWEHR, A. G. **Ecoeficiência de Estações de Tratamento de Esgoto: Índice de**



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

Lodo. 2009. 74 f. Trabalho de Diplomação de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

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.

HEALTH CANADA – HA. **Canadian guidelines for domestic reclaimed water for use in toilet and urinal flushing.** 2010.

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

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Anuário estatístico do Brasil de 1997.** Rio de Janeiro: v. 57, 1998.

JOVENTINO, E. S. et. al.,. **Comportamento da diarreia infantil antes e após consumo de água pluvial em município do semi-árido Brasileiro.** Texto contexto - enferm., Florianópolis, v. 19, n. 4, dez. 2010. _Disponível em _<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104_07072010000400012&lng=pt&nrm=iso>. acesso em 29 set. 2020

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

MAY, S. **Caracterização, tratamento e reuso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MENDONÇA, K. P. L. **Tratamento de águas cinza provenientes de lavanderias visando reuso.** 2019. 101f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Palmas, 2019.

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

OLIVEIRA, L. H. de. **Metodologia para a implantação de Programa de Uso Racional da Água em Edifícios.** 1999. Tese (Doutorado em Engenharia da Construção Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ONU – Organização Mundial das Nações Unidas. **Pela primeira vez, população urbana supera a rural no mundo.** 2007. Disponível em:



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

<http://www.unmultimedia.org/radio/portuguese/detail/155399.html>. Acesso em: nov. de 2020.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Declaração Universal dos Direitos Humanos da ONU**. Disponível em : . Acesso em :1 jan .2021.

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

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: 13 out. 2020.

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.

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.

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

TUNDISI, J. G. **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado**. Cienc. Cult., Sao Paulo, v.55, n.4, Dec. 2003. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400018&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 29 set. 2020.

USEPA (2012) **Guidelines for water reuse**. (EPA/600/R-12/618) United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.

Victoria Environmental Protection Agency. **Code of Practice Onsite Wastewater Management**. In EPA, Victoria, Australia, 2008.

VIEIRA, A. R.(texto). **Cadernos de Educação Ambiental Água para Vida, Água para Todos: Livro das Águas**. Brasília: WWF-Brasil, 2006.

ZABROCKI, L.; SANTOS, D. C. Dos. **Caracterização da água cinza em edifícios residenciais**. in: congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, 23.,



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E
TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS CAMPUS PALMAS CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
2005, Campo Grande. Saneamento ambiental Brasileiro: Utopia ou realidade? Abes
- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. p. 1 - 14.
Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/II-099.pdf>>. Acesso em:
29 dez. 2020.