

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MILTON MANZONI JUNIOR

**COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE
ELETROCOAGULAÇÃO E COAGULAÇÃO CONVENCIONAL EM
TRATAMENTO DE ÁGUA**

CAMPO MOURÃO

2021

MILTON MANZONI JUNIOR

**COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE
ELETROCOAGULAÇÃO E COAGULAÇÃO CONVENCIONAL EM
TRATAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Paula Cristina de Souza

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Eliane Sloboda Rigobello

CAMPO MOURÃO

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE ELETROCOAGULAÇÃO E COAGULAÇÃO CONVENCIONAL EM TRATAMENTO DE ÁGUA

por

Milton Manzoni Junior

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 08h00min do dia 05 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a. Dr^a. Eliane Sloboda Rigobello
(UTFPR)
Co-orientadora

Prof^a. Dr^a. Morgana Suszek Gonçalves
(UTFPR)

Prof. Me. Paulo Henrique Rodrigues
(Integrado)

Prof^a. Dr^a. Paula Cristina de Souza
(UTFPR)
Orientadora

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr(a). Paula Cristina de Souza

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

As companhias de saneamento recebem títulos de concessão para a exploração e tratamento de águas superficiais e subterrâneas e tem a necessidade de saber qual o melhor tipo de tratamento que deverão fazer ao explorá-las, a fim de viabilizar todo o processo, tornando-o o mais eficiente. O presente trabalho teve como objetivo realizar um comparativo de tratamento de água bruta de rio do Campo (Campo Mourão – PR) através do processo de eletrocoagulação e coagulação convencional. Para o processo de eletrocoagulação foram analisados os tempos de eletrólises no tempo de eletrocoagulação foram de 15, 30 e 45 minutos, corrente elétrica fixada em 5 âmpères e com pH inicial igual a 5, 6 e 7. No processo da coagulação convencional foi utilizando o sulfato de alumínio com faixa de 20 mg/L a 100 mg/L de concentração e com pH de 5 a 8, com a finalidade de se avaliar a eficiência de remoção de cor aparente e turbidez. O cálculo de eficiência percentual de remoção dos parâmetros em análise são apresentados com os seus respectivos desvios padrões. No tratamento por eletrocoagulação os valores de remoção de cor aparente e turbidez foram satisfatórios, sendo caracterizado valores próximos a 100% de remoção como no ensaio de 30 minutos com pH 5. Com a coagulação convencional com sulfato de alumínio foram selecionados os melhores ensaios para a realização da duplicata, apresentando valores de remoção de cor aparente e turbidez próximos dos 90%. Comparando os resultados obtidos nas condições estudadas, a remoção de cor aparente e turbidez foi mais satisfatória para a eletrocoagulação, pois apresentou valor de remoção quase que totais.

Palavras-chave: Água superficial. Eficiência de tratamento. Remoção de poluentes. Sulfato de alumínio.

ABSTRACT

Sanitation companies receive concession titles for the exploration and treatment of surface and groundwater and need to know what the best type of treatment should be done when exploring them, in order to make the whole process feasible, making it the more efficient. The present work had as objective to make a comparison of treatment of raw water of the river of Campo (Campo Mourão - PR) through the process of electrocoagulation and conventional coagulation. For the electrocoagulation process, the electrolysis times in the electrocoagulation time were 15, 30 and 45 minutes, electrical current set at 5 amperes and with an initial pH equal to 5, 6 and 7. In the conventional coagulation process, the aluminum sulfate with a range of 20 mg/L to 100 mg/L of concentration and with a pH of 5 to 8, in order to evaluate the efficiency of removing apparent color and turbidity. The calculation of the percentage efficiency of removal of the parameters under analysis are presented with their respective standard deviations. In the treatment by electrocoagulation the values of removal of apparent color and turbidity were satisfactory, being characterized values close to 100% of removal as in the test of 30 minutes with pH 5. With the conventional coagulation with aluminum sulfate, the best tests were selected for the duplicate, showing values of apparent color removal and turbidity close to 90%. Comparing the results obtained in the studied conditions, the removal of apparent color and turbidity was more satisfactory for the electrocoagulation, as it presented an almost total removal value.

Keywords: Surface water. Treatment efficiency. Pollutant removal. Aluminum sulfate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fase de coagulação, floculação e sedimentação do tratamento convencional.....	17
Figura 2 – Interações em decorrência da eletrocoagulação.....	20
Figura 3 – Arranjo dos eletrodos.....	23
Figura 4 – Bombona para armazenar água bruta do rio do Campo (Campo Mourão/PR).....	27
Figura 5 –Esquema de operacionalização da eletrocoagulação sem escala.....	28
Figura 6 – Esquema do jar test	30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentual de remoção médio com relação ao tempo com o pH inicial 5.....	36
Gráfico 2 – Percentual de remoção médio com relação ao tempo com o pH inicial 6.....	37
Gráfico 3 – Percentual de remoção médio com relação ao tempo com o pH inicial 7.....	39
Gráfico 4 – Percentual de remoção com relação ao ensaio 1 do jar test para o tempo de sedimentação 1.....	41
Gráfico 5 – Percentual de remoção com relação ao ensaio 1 do jar test para o tempo de sedimentação 2.....	42
Gráfico 6 – Percentual de remoção com relação ao ensaio 2 do jar test para o tempo de sedimentação 1.....	44
Gráfico 7 – Percentual de remoção com relação ao ensaio 2 do jar test para o tempo de sedimentação 2.....	45
Gráfico 8 – Percentual de remoção com relação ao ensaio 3 do jar test para o tempo de sedimentação 1.....	46
Gráfico 9 – Percentual de remoção com relação ao ensaio 3 do jar test para o tempo de sedimentação 2.....	46
Gráfico 10 – Percentual de remoção com relação ao ensaio 4 do jar test para o tempo de sedimentação 1.....	48
Gráfico 11 – Percentual de remoção com relação ao ensaio 4 do jar test para o tempo de sedimentação 2.....	49
Gráfico 12 – Percentual de remoção médio para o tempo de sedimentação 1.....	50
Gráfico 13 – Percentual de remoção médio para o tempo de sedimentação 2.....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classe e tratamento indicado de água doce.....	17
Quadro 2 – Esquema de anotação de dados para a eletrocoagulação.....	29
Quadro 3 – Esquema de anotação de dados para o jar test da água coagulada e decantada.....	31
Quadro 4 – Modelo de tabela para os ensaios e para o percentual de remoção médios para a eletrocoagulação.....	33
Quadro 5 – Modelo de tabela para os ensaios e para o percentual de remoção médios para o jar test.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização da água bruta.....	34
Tabela 2 – Valores de ensaios com pH inicial 5,00.....	35
Tabela 3 – Valores médios e desvios padrões na água bruta e na água tratada com pH 5,00.....	35
Tabela 4 – Valores de ensaios com pH inicial 6,00.....	36
Tabela 5 – Valores médios e desvios padrões na água bruta e na água tratada com pH 6,00.....	37
Tabela 6 – Valores de ensaios com pH inicial 7,00.....	38
Tabela 7 – Valores médios e desvios padrões na água bruta e na água tratada com pH 7,00.....	38
Tabela 8 – Ensaio sem adição de NaOH.....	40
Tabela 9 – Eficiência de remoção primeiro ensaio com a água bruta.....	41
Tabela 10 – Ensaios com uso de NaOH.....	43
Tabela 11 – Eficiência de remoção no segundo e terceiro ensaio com a água bruta.....	44
Tabela 12 – Duplicatas com os melhores valores.....	47
Tabela 13 – Eficiência de remoção no quarto ensaio com a água bruta.....	48
Tabela 14 – Valores médios e desvios padrões da água tratada pela coagulação convencional.....	49

LISTA DE SIGLAS

pH	Potencial hidrogeniônico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ONU	Organização das Nações Unidas
OMS	Organização Mundial da Saúde
PRC	Portaria de Consolidação
NTU	Unidades de Turbidez Nefelométrica
VMP	Valor Máximo Permitido
PCU	Unidades de Platina e Cobalto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
mg Pt/L	Miligrama de Platina por Litro
µm	Micrometros
EC	Eletrocoagulação
I	Corrente elétrica
i	Densidade de corrente elétrica
A	Ampere
m ²	Metro quadrado
g	Gramas
s	Segundos
S	Área de superfície do eletrodo
rpm	Rotações por minuto
mm	Milímetros
Sanepar	Companhia de Saneamento do Paraná
nm	Nanômetro
mL	Mililitros
°C	Graus Célsius
mg/L	Miligramas por litro
[H ⁺]	Concentração de íons de hidrogênio
C/mol	Coulomb por mol
mol	Unida base do Sistema Internacional de Unidades
ppm	Partes por milhão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	JUSTIFICATIVA	15
4	REFERENCIAL TEÓRICO	16
4.1	ÁGUA PARA CONSUMO	16
4.2	COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO	17
4.2.1	Coagulação	17
4.2.1.1	Coagulante	18
4.2.2	Floculação	19
4.2.3	Sedimentação	19
4.3	ELETROCOAGULAÇÃO	20
4.3.1	Reações envolvidas nos eletrodos	21
4.3.2	Fatores que influenciam na eletrocoagulação	22
4.3.2.1	Efeito da corrente e da densidade elétrica	22
4.3.2.2	Efeito do pH	22
4.3.2.3	Efeito da condutividade na água	23
4.3.2.4	Efeito do arranjo dos eletrodos	23
4.3.2.5	Efeito da distância entre os eletrodos	24
4.4	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	24
4.4.1	Cor	24
4.4.2	Turbidez	24
4.4.3	Condutividade elétrica	25
4.4.4	pH	25
4.4.5	Alcalinidade	25
5	METODOLOGIA	26
5.1	ÁGUA BRUTA	26
5.2	SISTEMA DE OPERAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO	27
5.2.1	Procedimento experimental	29
5.3	SISTEMA DE OPERAÇÃO DO TRATAMENTO POR COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO	30
5.3.1	Procedimento experimental	30

5.4	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	31
5.4.1	Determinação da cor aparente	32
5.4.2	Determinação da turbidez.....	32
5.5	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR APARENTE E TURBIDEZ.....	32
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA DE RIO DO CAMPO (CAMPO MOURÃO – PR) ...	34
6.2	TRATAMENTO DE ÁGUA PELO SISTEMA DE ELETROCOAGULAÇÃO	34
6.3	TRATAMENTO DE ÁGUA PELO SISTEMA DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/SEDIMENTAÇÃO	39
7	CONCLUSÃO.....	51
8	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que devido à evolução do meio urbano e dos centros industriais, cresceu-se a procura de recursos hídricos que atendam a demanda de consumo. Com isso espera-se que a água, a qual será distribuída, esteja em condições adequadas para consumo, sendo assim com a maior eficiência de remoção de parâmetros que interferem na sua qualidade.

Ao mesmo tempo que as companhias de saneamento recebem títulos de concessão para a exploração e tratamento de águas superficiais e subterrâneas, devem, também, saber qual o melhor tipo de tratamento que deverão fazer ao explorá-las, a fim de viabilizar todo o processo, tornando-o o mais eficiente.

O uso dos métodos convencionais de tratamento de água com fases que levam em consideração a entrada de coagulantes, tempo de floculação, sedimentação, filtração e posterior processo de desinfecção, demandam de uma estrutura para cada fase. Por ser um método muito dependente de uma velocidade e de período de rotação de pás para a formação de flocos e de tempo para a sua deposição, é preciso que existam tanques que recebam grandes volumes e que deem vazão para o prosseguimento do tratamento (SABESP, 2015).

Por ser um tratamento que necessite a aplicação de coagulantes, no processo convencional ocorre aplicações de doses que possam ser excedentes para o tratamento tornando-o ineficiente quanto ao desperdício de coagulantes e poder haver mais precipitados metálicos. Em um procedimento eletroquímico, o qual trabalha com a aplicação de corrente elétrica sobre eletrodos, pode viabilizar pelo baixo volume de reagentes que auxiliem na coagulação das partículas, uma vez que o processo de oxirredução poderá suprir na presença de agentes coagulantes.

A eletrocoagulação, por ser um método eletroquímico, tem a capacidade de tornar-se um procedimento altamente eficiente na remoção de parâmetros físico-químicos e por conciliar um processo de desinfecção, pois ao adicionar sais para auxiliar na sua condução elétrica em meio aquoso, podem possuir em sua estrutura elementos antissépticos (HAKIZIMANA et al., 2017).

Quanto a isso, a busca por meios mais eficientes de remoção de parâmetros que interfiram na qualidade de água para o consumo humano existirá, para que sempre tenham tecnologias que tragam o conforto e confiança naquilo que é o bem comum mais precioso que existe para a manutenção da vida.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comparar a eficiência de remoção de cor aparente e de turbidez do processo de eletrocoagulação com o processo de coagulação/floculação/sedimentação de água bruta de rio do Campo, Campo Mourão – PR.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a água bruta do rio: pH, cor aparente, turbidez, alcalinidade e condutividade elétrica;
- Avaliar a eficiência da eletrocoagulação em razão do tempo de eletrólise de 15, 30 e 45 minutos, quanto à redução de cor aparente, turbidez e condutividade elétrica para valores de pH de 5, 6 e 7;
- Avaliar a eficiência da coagulação/floculação/sedimentação com uso de sulfato de alumínio em jar test variando-se os volumes do coagulante (20 mg/L, 40 mg/L, 50 mg/L, 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L) e com o pH de coagulação com variação de 5 a 8;
- Selecionar as melhores dosagens de coagulante e pH em função da remoção de cor aparente e turbidez e repetir esse ensaio em jar test;
- Comparar os índices de redução de cor aparente e turbidez da eletrocoagulação com coagulação convencional.

3 JUSTIFICATIVA

É de grande valia que constantemente haja evolução das tecnologias das quais se aplicam no tratamento de água. O nível de potabilidade ao qual se exige pela legislação (PRC Nº 5 de 28 de setembro de 2017) deve ser respeitado a fim de promover a saúde da população que a consome.

Mesmo sabendo da abundância de água, o que caracteriza a Terra como planeta água, e de sua versatilidade no uso de inúmeros processos produtivos e de serviços é muito importante que haja o respeito quanto á sua distribuição e, principalmente, do seu consumo.

Dado pelo instituto Trata Brasil (2020) em 2018 cerca de 233 mil casos de doenças estão associadas pela falta de saneamento em todo o Brasil. Tendo em vista um dado tão elevado e com a entrada do novo Marco Legal do Saneamento Básico é possível que em um futuro possa existir uma universalização de abastecimento à população, dando-a uma garantia de água potável.

A tecnologia conhecida como tratamento de água convencional ou também chamada de tratamento completo envolve as etapas de pré-oxidação (com ou sem) coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. O uso do sulfato de alumínio como agente coagulante é um dos mais comuns conforme é mostrado no Manual de Projetos de Saneamento da Sanepar (2018). Supondo do uso comum, pode-se aferir que é um coagulante que traz níveis de tratamento aceitáveis, de fácil aquisição e transporte, e isso releva do seu uso como um agente para realização de parte do presente estudo comparativo.

O método da eletrocoagulação, que se utiliza de um método eletrolítico, surge como um procedimento alternativo para o tratamento de água, visto que, traz a entrada de coagulantes pela oxidação dos eletrodos, desestabilização dos poluentes e formação dos flocos, conforme afirma Mollah et al. (2004). Sabendo de sua eficácia para se fazer um bom tratamento, o presente trabalho trará o modelo como uma forma de tratamento e, ao final, será aferido um comparativo com o tratamento convencional.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Água para Consumo

A água é um bem imprescindível para a população humana. Sabendo de sua importância, a Organização das Nações Unidas (ONU), através da Assembleia Geral, emitiu a Resolução 64/292 (2010) que assegura o direito humano à água e ao saneamento. Essa conquista faz com que o direito à água se faz necessária por um acesso seguro e aceitável para todos e, isso, deve ser realizado pelos Estados que devem providenciar recursos que tragam consigo tecnologias eficazes e seguras.

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2012) organizou um estudo que traz uma realidade global promissora para o investimento no tratamento de água de abastecimento. Neste documento a organização reflete que para cada dólar americano investido no tratamento o retorno econômico global é duplicado. Com relação a saúde da população, o retorno é refletido em um impacto positivo devido aos benefícios de ser abastecido por uma água potável.

Pensando no bem-estar da população brasileira, o atual Marco Legal do Saneamento Básico (Lei Nº 14.026, 15 de Julho de 2020) agindo em conjuntura com a lei que define os padrões de potabilidade da água (PRC Nº 5, 28 de Setembro de 2017) faz com que o Brasil tenha condições de atender ao coletivo, uma vez que, assegurado o direito ao consumo, faz com que a legislação aja no atendimento quase que total – espera-se chegar ao atendimento de 99% da população até o final de 2033 de acordo com o novo marco legal (Lei Nº 14.026, 15 de Julho de 2020).

Os padrões estabelecidos na Portaria de Consolidação nº 5 traz que para 95% das amostras com uma turbidez de Valor Máximo Permitido (VMP) em 0,5 NTU deverá ter sido proveniente de um tratamento com filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta) e se apresentar um VMP de 1 NTU será de um tratamento com filtração lenta. No padrão organoléptico, a água deverá apresentar uma turbidez na faixa de 5 NTU e a cor aparente um valor de 15 PCU, não podendo exceder esses valores pré-estabelecidos.

Quanto a matéria-prima, a Resolução CONAMA nº 357/05 e 430/2011 do CONAMA faz considerações que são pertinentes quanto a classificação dos corpos hídricos superficiais, pois fundamenta enquadramentos de como são essas classificações. Dentre os valores máximos permitidos a turbidez não pode ultrapassar

100 NTU, de cor verdadeira com valor máximo de 75 mg Pt/L e um pH na faixa de 6 até 9.

Partindo da classe da água que servirá de abastecimento humano, a CONAMA nº 357/05 faz indicações quanto ao melhor tratamento. No Quadro 1 são apresentados os tratamentos indicados para cada uma.

Quadro 1 – Classe e tratamento indicado de água doce

Classe da água	Tratamento
Especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento simplificado
Classe 2	Tratamento convencional
Classe 3	Tratamento convencional ou avançado

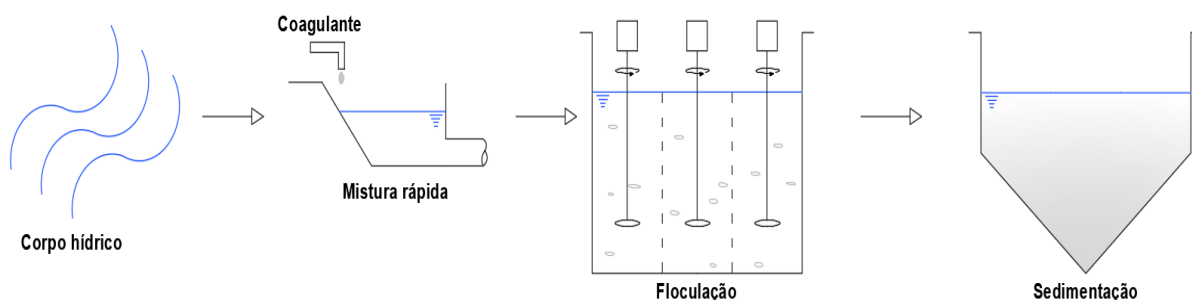
A Classe 4 é destinada à navegação e ao paisagismo.

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA nº 357/2005 E 430/2011

4.2 Coagulação, floculação e sedimentação

De acordo com Howe et al. (2016) e Davis (2017) o ciclo de tratamento convencional de água pode ser configurado pela importância dos processos dados pela coagulação e flotação, pois são fases que estão dando início ao processo de remoção dos poluentes que se encontram em suspensão. Quando há a agregação destes poluentes, as partículas ganham volume, ocasionando sua sedimentação ao fundo do tanque. A Figura 1 demonstra essas fases de tratamento.

Figura 1 – Fase de coagulação, floculação e sedimentação do tratamento convencional



Fonte: Adaptado de Howe et al. (2016)

4.2.1 Coagulação

Davis (2017) propõem que as partículas podem se comportar devido a suas propriedades elétricas, podendo interferir no processo de coagulação, dentre essas propriedades se destacam: a dupla camada elétrica, significando que coloides

acumulem em sua superfície cargas negativas com as quais atraem cargas opostas, adsorvendo-as em uma camada compacta. Após essa camada forma-se uma outra, a camada difusa e de característica contrária a da compacta, dando assim a dupla camada; o potencial zeta, correspondendo ao movimento que uma partícula carregada faz até o polo de carga oposta e levando consigo uma nuvem de íons (camada difusa); e a estabilidade das partículas, ao qual leva em consideração a interação entre as forças de atração e de repulsão entre as partículas.

Dada a propriedades que as partículas podem apresentar, Davis (2017) lista quatro mecanismos que desestabilizam as suspensões em meio aquoso, sendo eles:

- Compressão da dupla camada: se houver uma força de compressão na dupla camada elétrica, as forças de repulsão serão reduzidas resultando em uma união permanente;
- Adsorção e neutralização da carga: neste caso pode haver a desestabilização das partículas devido aos íons de sais hidrolisados e pré-hidrolisados ou pelos polímeros catiônicos;
- Adsorção e formação de pontes: através das cadeias de polímeros pode haver adsorção na superfície das partículas em apenas um ou mais lugares. Howe et al. (2016) reitera que as pontes formadas pelos polímeros será dada pela dose ótima de coagulante, sendo ela garantida pela proporcionalidade à concentração de partículas;
- Desestabilização por varredura: quando há o uso de doses superiores de hidróxidos de metal e sais de alumínio e de ferro surgem precipitados insolúveis que aprisionam as partículas nos precipitados amorfos.

4.2.1.1 Coagulante

A escolha do coagulante deve levar em consideração fatores que tornem o tratamento mais eficiente, tanto no sentido econômico quanto no tipo de partículas e característica que a água se encontra (DAVIS, 2017). Uma maneira de encontrar o melhor é através de estudos laboratoriais que utilizam equipamentos tal como *jar test* que auxilia nos ensaios.

Há uma grande variedade de agentes coagulantes no mercado, podendo ser orgânico e inorgânico. Dentre os inorgânicos pode-se saber dos sais metálicos, com

uma atenção ao sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), pois é o tipo mais comum no tratamento de água (SOUZA, 2016; DAVIS, 2017).

Souza (2016) estabelece que a faixa efetiva de uso do sulfato de alumínio se encontre entre o pH 5 a 8. Davis (2017) coloca como faixa ideal de pH de 5,5 até 7,7.

4.2.2 Floculação

Howe et al. (2016) propõem que a partir dos movimentos aleatórios que as partículas ficam no fluido, a sua velocidade de agregação acaba não sendo igual para todos. Com isso o mecanismo de floculação acaba sendo diferenciado devido aos diâmetros das partículas, podendo ocorrer em microescala (diâmetros menores que $0,1 \mu\text{m}$) e em macroescala (maiores que $0,1 \mu\text{m}$), ocasionando uma sedimentação diferencial devido a essas diferenças (DAVIS, 2017).

Davis (2017) reitera que a velocidade de mistura em tanques de floculação devem respeitar um período que faça com que as partículas consigam se colidir e comecem a se agregar, promovendo a formação de flocos que tenham tamanho suficiente para a sedimentação. O excesso de mistura pode ocasionar a quebra desses flocos, promovendo a sua dispersão novamente.

4.2.3 Sedimentação

A sedimentação é o processo posterior à entrada de coagulantes na água, a fim de promover um agente aglutinante com os poluentes dispersos na água e posterior à floculação, que promove a mistura do coagulante em meio aquoso e auxilia no movimento das partículas, para que assim elas possam colidir umas com as outras resultando em flocos.

Howe et al. (2016) explica que a sedimentação será um processo em que a água fica em repouso por um período, logo, com esse tempo de espera, os flocos formados são maiores que os poluentes e com isso a força gravitacional auxilia para que eles possam se depositar ao fundo do tanque de repouso, dando assim o processo de sedimentação.

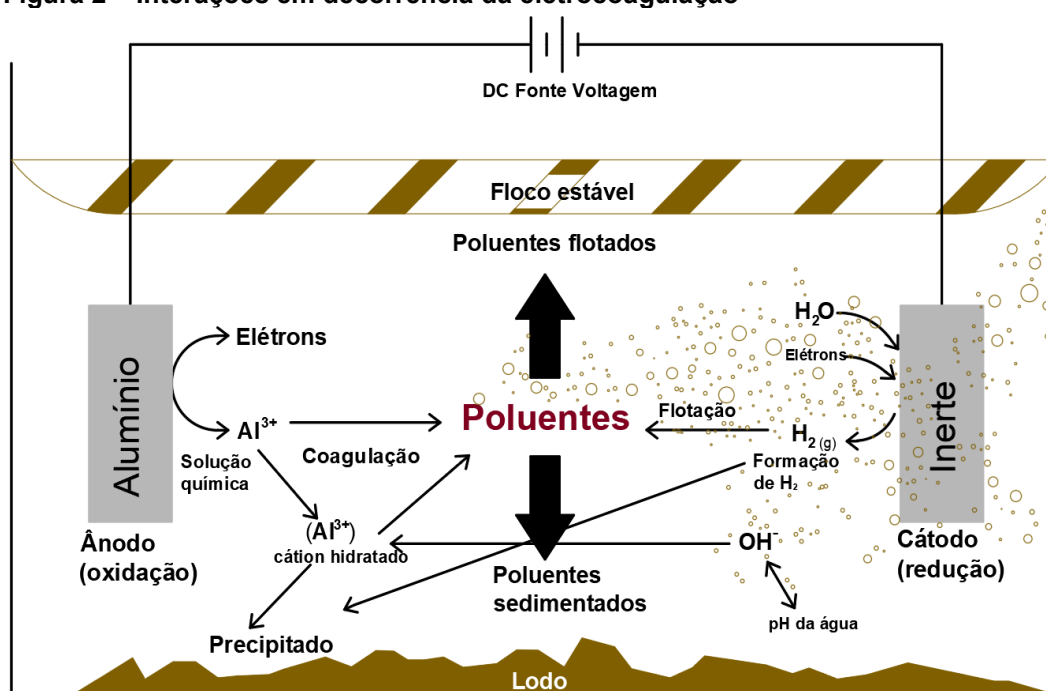
4.3 Eletrocoagulação

De acordo com Chen e Hung (2007) a eletrocoagulação (EC) é um método que utiliza a eletricidade para a formação de coagulantes pela dissolução dos eletrodos metálicos. No eletrodo com característica de ânodo, ocorre a formação de íons metálicos e no que tem característica de cátodo ocorre a formação de gases de hidrogênio. Estabelecem, ainda, que placas de alumínio são usualmente utilizados para o tratamento de água e as de ferro para tratamento de efluentes.

Hakizimana et al. (2017) introduz que na EC há combinações que fazem do processo eficiente quanto ao tratamento. Dentre as combinações que ocorrem em meio aquoso pode-se citar o mecanismo eletroquímico, trazendo as dissoluções no metal e a redução da água, o mecanismo químico com as mudanças no pH da água e o mecanismo físico, ao qual ocorrem os processos de coagulação e flotação. Mamelkina et al. (2019) baseia que, em decorrência da eletrocoagulação, os poluentes que se encontram em suspensão se desestabilizam e começam a emulsionar ou a se dissolverem.

Na Figura 2 é ilustrado como podem ocorrer as interações no processo de eletrocoagulação, mostrando sua complexidade no tratamento de remoção dos contaminantes.

Figura 2 – Interações em decorrência da eletrocoagulação



Fonte: Adaptado de Hakizimana et al. (2017)

No que se refere às vantagens que a EC traz como tratamento de água e de efluentes, redução nos custos operacionais, redução no risco de poluição secundária, redução de coagulantes químicos em decorrência do uso de placas metálicas, presença de um sistema operacional fácil e simplificado, além de poder utilizar, como fonte energética renovável, a energia solar conforme explicitam Hakizimana et al. (2017) e Nawarkar e Salkar (2019).

Nas desvantagens que a eletrocoagulação pode trazer como modelo de tratamento, Hakizimana et al. (2017) pontua a passivação do eletrodo, significando a criação de uma película devido ao produto formado nas reações, a exigência da correção da condutividade elétrica no tratamento de água e a necessidade de manutenção devido ao processo de oxirredução que ocorrem nas placas metálicas.

4.3.1 Reações envolvidas nos eletrodos

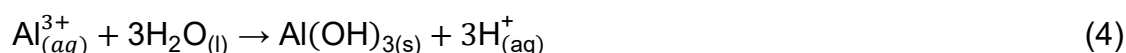
As reações que ocorrem no processo de eletrocoagulação podem ser separados entre o ânodo e cátodo, Chen e Hung (2007), Hakizimana et al. (2017), Nawarkar e Salkar (2019) estabelecem que para reações no ânodo ocorre a oxidação do alumínio sólido, conforme Equação 1.



Para reações no cátodo há a redução da água em gás hidrogênio e hidroxilas, conforme Equação 2.



Das reações ocorridas em (1) e (2), é possível ocorrer reações de ácido/base, nisso a Equação 3 será em condição alcalina e a Equação (4) em condição ácida.



4.3.2 Fatores que influenciam na eletrocoagulação

4.3.2.1 Efeito da corrente e da densidade elétrica

De acordo com Hakizimana et al. (2017), a corrente elétrica (I) é um dos principais parâmetros de funcionamento da eletrocoagulação. Com isso ela é definida em função de sua densidade de corrente (i), dada por A/m^2 , que se faz pela razão da corrente sobre a área da superfície do eletrodo. A Equação 5 demonstra como ela se dá e como é seu comportamento de continuidade de conservação da corrente entre o ânodo e o cátodo.

$$I = i_{\text{ânodo}} \times S_{\text{ânodo}} = i_{\text{cátodo}} \times S_{\text{cátodo}} \quad (5)$$

Hakizimana et al. (2017) credita para a Lei de Faraday que a densidade de corrente determinará a dosagem de coagulante que originará, devido a oxidação do metal no ânodo, e a formação de gases, devido a redução da água no cátodo. Dessa, Neves (2009) referencia a lei dada pela Equação 6.

$$m = \frac{M \times I \times t}{z \times F} \quad (6)$$

em que:

m = massa de eletrodo consumida em g;

M = massa molar do material do eletrodo em g/mol;

I = corrente elétrica aplicada em A;

t = tempo de eletrólise em s;

z = número de elétrons envolvidos na reação de oxidação;

F = constante de Faraday (96.487 C/mol).

4.3.2.2 Efeito do pH

De acordo com Chen e Hung (2007) o pH afeta a eficiência da EC e na solubilidade dos hidróxidos metálicos, assim como, na liberação de cloro devido a presença de compostos que tenham em sua composição íons cloreto, como o cloreto de sódio utilizado para aumentar a condutividade. A performance do tratamento depende da natureza dos poluentes com a melhor remoção ocorrendo com valores de pH próximo a neutralidade, porém quando isso ocorre o consumo de energia é maior devido a variação da condutividade.

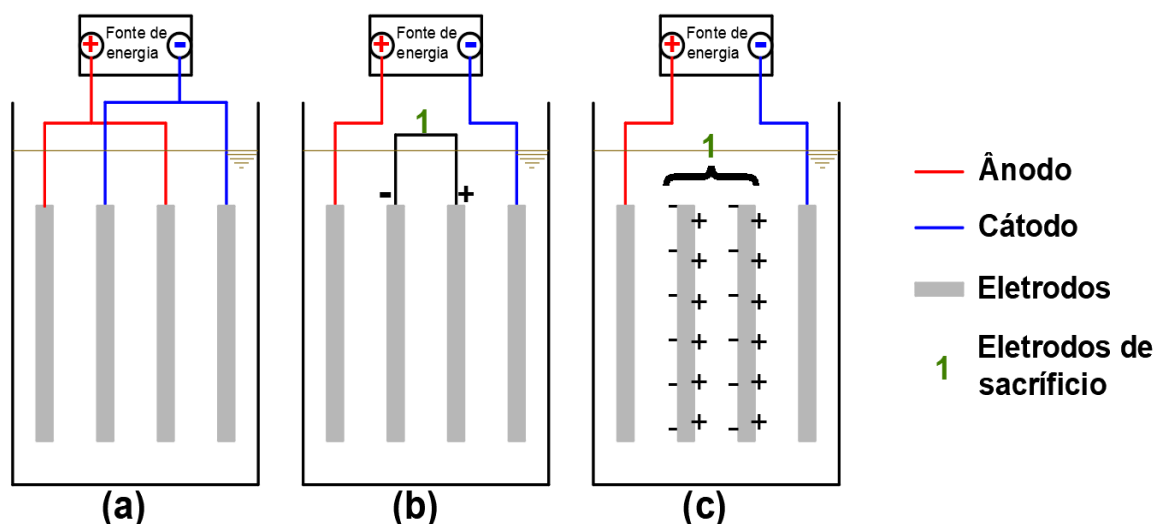
4.3.2.3 Efeito da condutividade na água

Quanto à condutividade elétrica, é possível adicionar alguns sais que auxiliem no transporte das cargas elétricas, com isso Chen e Hung (2007) promovem a adição do cloreto de sódio, pois com a dissociação iônica do sal formará íons cloreto, que por sua vez agem na redução de íons carbonato ou de íons sulfato. Os autores afirmam, ainda, que a existência destes auxiliam na precipitação de íons de cálcio e de magnésio que causam a formação de uma película em torno dos eletrodos, o que causaria uma redução na eficiência do tratamento.

4.3.2.4 Efeito do arranjo dos eletrodos

Os eletrodos podem ser configurados, principalmente, de três formas diferentes, podendo ser: conexão monopolar em paralelo (Figura 3a) conexão monopolar em série (Figura 3b) e a conexão bipolar em série (Figura 3c).

Figura 3 – Arranjo dos eletrodos



Fonte: Adaptado de Hakizimana et al. (2017)

Hakizimana et al. (2017) explica que quando há a configuração monopolar em paralelo haverá uma alternância entre placas com características de ânodo e de cátodo, conforme representado na Figura 3a. Expõe, ainda, que quando tem a configuração monopolar em série, as placas centrais são conectadas internamente e adquirindo a característica de eletrodos de sacrifício, a corrente elétrica que passa sobre todas é a mesma, mas com uma diferença de potencial diferente entre cada

placa, conforme é demonstrado na Figura 3b. Na configuração bipolar em série, as placas externas estão conectadas a fonte de energia enquanto as placas internas não são conectadas, estas acabam tendo um comportamento bipolar sendo possível verificar sua atuação tanto como ânodo assim como cátodo, como na Figura 3c.

4.3.2.5 Efeito da distância entre os eletrodos

De acordo com Hakizimana et al. (2017), a distância entre os eletrodos tem interferência no consumo de energia, consideram que quanto menor a distância entre as placas metálicas, menor o consumo de energia. Com essa distância menor surgem mais bolhas de gás produzidas pelas reações de oxirredução, auxiliando nas reações com os poluentes.

4.4 Parâmetros Físico-químicos

Os parâmetros físico-químicos são ferramentas que auxiliam na avaliação da água e de efluentes, podendo ocorrer no pré e no pós-tratamento. Quanto a isso, as leituras aferidas nas amostras de água irão avaliar sua qualidade que será ofertada à população.

4.4.1 Cor

Richter e Azevedo Netto (1991) determinam que a presença de cor na água é devido a presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão. Em muitos casos a cor que surge nos corpos hídricos é resultado da decomposição de vegetais que se depositam em seus leitos.

Os autores afirmam que o potencial hidrogeniônico tem capacidade de interferir na intensidade da cor. Quanto mais alcalina a água mais intensa é a cor e quanto mais acidificada mais fácil de fazer a remoção.

4.4.2 Turbidez

De acordo com Bittencourt e Paula (2014) a turbidez é um parâmetro que indica qual o nível de espalhamento que um feixe luz incidente tem ao passar por um meio

aquoso. Essa difusão pode ser entendida pela presença de partículas que ficam em suspensão, podendo ser de origem mineral ou mesmo pelo lançamento de efluentes não tratados diretamente em leitos de rios. As autoras entendem que a presença de um alto índice de turbidez afeta no ecossistema aquático, além de aumentar os custos no tratamento.

4.4.3 Condutividade elétrica

A condutividade tem relação com o nível de corrente elétrica que a água é capaz de conduzir. Por conter uma proporcionalidade quanto a sua condução, permite realizar estimativas do quanto de sólidos há em uma amostra (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991), dando ao pesquisador suporte na estimativa de adequação em casos de ensaios.

4.4.4 pH

De acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), o potencial hidrogeniônico é um instrumento muito importante e frequentemente utilizado na química da água, podendo ser utilizada em todas as fases do tratamento. Tem o papel de auxiliar na neutralização, a depender de qual o nível que o pesquisador quer dar a sua amostra, na precipitação, coagulação, desinfecção e no controle corrosivo.

Pode ser visto como o logaritmo negativo de concentração de íon hidrogênio (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991), conforme demonstrado na Equação 7.

$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+] \quad (7)$$

4.4.5 Alcalinidade

De acordo com Richter e Azevedo Netto (1991) a presença de íons bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) ou hidróxidos (OH^-) conferem a água com característica básica. Estes íons são importantes no controle da água, uma vez que estão relacionados no auxílio da coagulação dos poluentes.

5 METODOLOGIA

Para a determinação dos valores de remoção de cor aparente e de turbidez, a base experimental deverá seguir a montagem do sistema de operação da eletrocoagulação, um sistema de operação para o *jar test*, um armazenamento correto para a água bruta, a realização da leitura dos valores dos parâmetros físico-químicos antes e após a realização dos procedimentos, adequação do pH com uma solução de base, realizar os procedimentos de acordo com suas bases pré-estabelecidas e realizar o percentual de eficiência de remoção dos parâmetros.

5.1 Água bruta

Para realização dos ensaios experimentais, foi feita a coleta de água bruta do Rio do Campo.

Foi coletado um volume de 120 litros de matéria prima que é utilizada num período máximo de 7 dias, pois após esse período suas características básicas sofrem interferência em decorrência da degradação da matéria orgânica.

Esta água foi armazenada dentro de uma bombona de volume máximo de 120 litros. A necessidade de se colocar dentro dela é a de manter todo o volume de maneira homogênea para se fazer sua caracterização de cor aparente, turbidez, pH, condutividade elétrica e alcalinidade. Toda vez que a água bruta foi utilizada para algum experimento, foi feita a agitação dela para manter a dispersão dos poluentes. Através da Figura 4 é possível ver o local de armazenagem e a vassoura que foi utilizada para agitar a água.

Figura 4 – Bombona para armazenar água bruta do rio do Campo (Campo Mourão/PR)



Fonte: Autoria própria (2021)

5.2 Sistema de Operação da Eletrocoagulação

A base da eletrocoagulação é formada por um reator cilíndrico de acrílico ao qual recebe um volume de 4 litros de água bruta de rio. Próximo a sua face inferior encontra-se um registro ao qual retira-se amostra pós-tratamento.

Os eletrodos utilizados na experimentação são de alumínio com dimensões de 10 cm de altura, 19,5 cm de largura e 0,3 cm de espessura. Ao todo são utilizadas 6 placas a uma distância entre si de 10 mm, com o uso de anéis de borracha para se fazer esse distanciamento. O seu suporte é feito por um material inerte, sendo fixados em dois orifícios puncionados na parte emersa e de um na parte submersa, a fim de manter maior estabilidade.

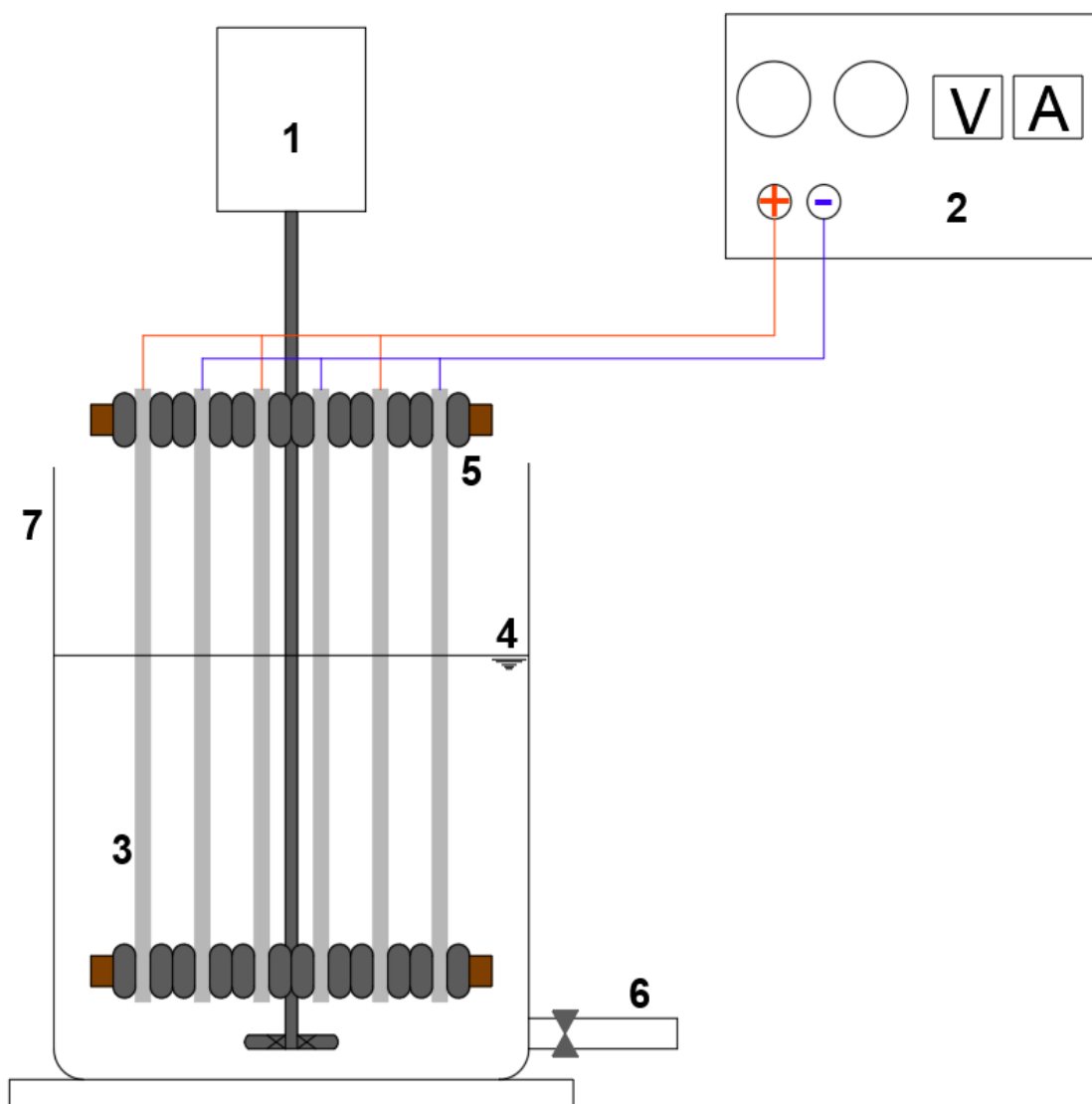
Com a estrutura dos eletrodos colocado, o arranjo é disposto em paralelo para haver a oxidação e redução das placas com uma fonte de alimentação de corrente elétrica contínua.

Para que haja uma maior eficiência no pré-tratamento, é colocado um agitador mecânico dentro do reator, este agitador auxiliará na movimentação do fluido durante

o processo, fazendo com que os íons liberados pela oxidação da placa de alumínio se aglutinem com os poluentes suspensos.

Na Figura 5 é exemplificado o modelo de sistema de operação ao qual operará a eletrocoagulação, sendo que os números representam cada parte. O número (1) o agitador mecânico, o (2) a fonte de alimentação de corrente elétrica contínua (os símbolos (V) e (A) representam, respectivamente, o regulador de voltagem e o regulador de corrente, (3) os eletrodos de alumínio, (4) volume de água bruta, (5) suporte juntamente com os anéis de borracha, (6) o registro de coleta de amostra de água pós-tratamento e (7) reator acrílico cilíndrico.

Figura 5 – Esquema de operacionalização da eletrocoagulação sem escala



Fonte: Adaptado de Souza (2016)

5.2.1 Procedimento experimental

Com a montagem da base de operação do procedimento da eletrocoagulação, o reator recebe um volume de 4 litros de água bruta de rio. Nesse momento é feita a correção do pH, sendo ela realizada a cada 1,0 unidade de uma faixa variante de pH 5, valor inicial, a pH 7, valor final.

É adicionado cloreto de sódio (NaCl), cerca de 0,75 gramas, para aumentar a condutividade elétrica no meio aquoso, auxiliando na diminuição do consumo de energia e, como sua formação contém cloro, ajudará na desinfecção já que é um elemento utilizado nas estações de tratamento.

Dada a correção, foram feitas análise físico-químicas de uma amostra de água bruta e, posteriormente, realizado o cálculo de eficiência de remoção dos valores.

Retirada a amostra, o reator recebe os eletrodos e o agitador mecânico. As placas recebem as conexões elétricas, com as quais trabalham em um sistema monopolar em paralelo. A corrente é fixada em 5 amperes e, com o decorrer do tempo de eletrólise, os polos positivo e negativo são alternados, para que haja um equilíbrio nos eletrodos que são oxidados e nos que são reduzidos.

As amostras retidas devem ficar em repouso por um período de 30 minutos, para haver uma sedimentação dos poluentes, e posteriormente é retirada uma amostra do sobrenadante.

Seguindo o método do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), cada tempo de batelada (15, 30 e 45 minutos) tem uma duplicata, sendo utilizado os valores médios com seus respectivos desvios padrões.

Os resultados obtidos após efetivação de cada batelada e leitura dos parâmetros são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Esquema de anotação de dados para a eletrocoagulação

		pH Z			
Tempo (minutos)	Análises	Ensaio			
		Bruto 1	Tratado 1	Bruto 2	Tratado 2
h	Cor aparente	a	b	a	b
	Turbidez	a	b	a	b

a – Refere-se aos valores relacionados a água bruta para cada batelada;
b – Refere-se aos valores relacionados a amostra após tratamento;
h – Tempo de batelada;
Z – Valor do pH inicial da amostra.

Fonte: Autoria própria (2020)

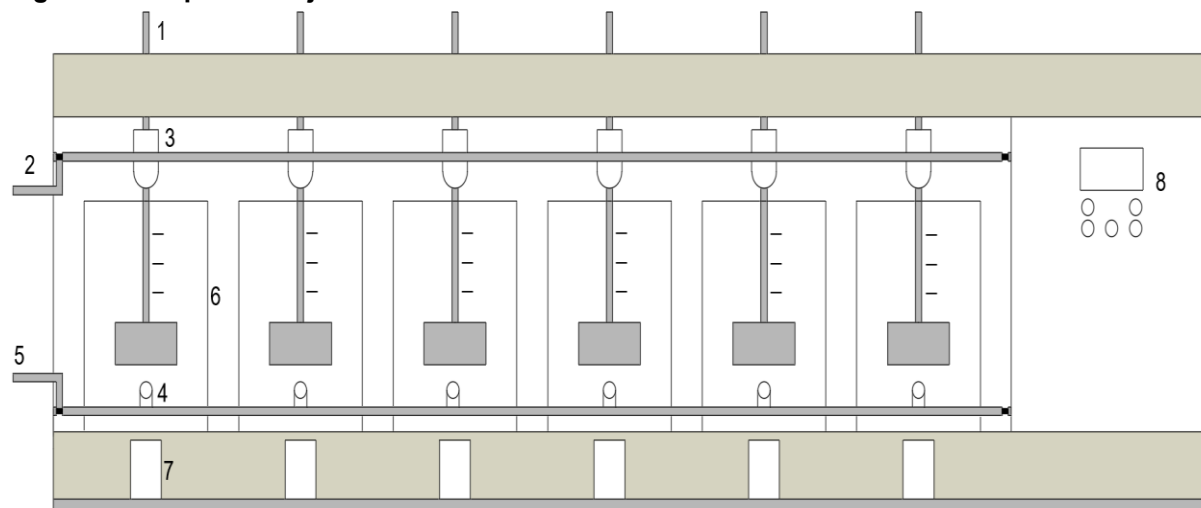
5.3 Sistema de Operação do Tratamento por Coagulação, Floculação e Sedimentação

Sua base é formada por um equipamento jar test da marca EthikTechnology modelo 218 – 6LDB. Ele contém seis jarros graduados. Próximo ao fundo de cada jarro, na face frontal, encontra-se uma mangueira com a qual comunica-se com os tubos de fundo chato que recebem a amostra.

Em sua composição há a régua articulada, onde se localizam os tubos de vidro de fundo abaulado para adicionar o coagulante.

Na Figura 6 é apresentado o jar test em que os números indicam: (1) agitador, (2) alavanca para girar a régua com os frascos com coagulantes, (3) frasco para alcalinizante ou acidificante e coagulante, (4) mangueira, (5) alavanca para girar a régua com as mangueiras para se fazer a coleta, (6) jarro graduado de 2 litros, (7) frasco de coleta de amostra e (8) display que configura as rotações dos agitadores e o tempo de agitação.

Figura 6 – Esquema do jar test



Fonte: Autoria própria (2020)

5.3.1 Procedimento experimental

Os experimentos se dão com o uso do jar test, em que os jarros recebem um volume de 2 litros de água bruta com sua temperatura corrigida para 25 °C. A variação foi dentro da faixa de pH 5 a 8 para uma melhor eficiência do sulfato de alumínio (Souza, 2016), essa correção se dá pelo uso do hidróxido de sódio (NaOH), com

concentração de 8 g/L, em dosagens de 4 mg/L, 8 mg/L, 12 mg/L, 16 mg/L, 18 mg/L, 20 mg/L, 24 mg/L, 26 mg/L e 28 mg/L. Em cada jarro há a colocação do hidróxido de sódio, previamente estabelecido, e o sulfato de alumínio (40 mg/L), com dosagens variando em 20 mg/L, 40 mg/L, 50 mg/L, 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L, foi inserido durante a mistura rápida com rotação de 420 rpm, com um tempo 10 segundos. Passado esse período, iniciou-se a agitação lenta de 25 rpm por um tempo de 21 minutos.

Decorrido o tempo de ensaio, as amostras têm um tempo de sedimentação primário de 7 minutos para a primeira coleta do sobrenadante e um tempo de sedimentação secundário de 14 minutos para a segunda coleta.

Realizando os ensaios no jar test, os dados coletados são expostos em uma tabela, como exemplificado no Quadro 3.

Quadro 3 – Esquema de anotação de dados para o jar test da água coagulada e decantada

Ensaio	Jarro	Produtos Químicos				Coleta				
		Sulfato de Alumínio		NaOH		pH de coagulação	Sobrenadante		Sobrenadante	
		(40 g/L)		(8 g/L)			Ts1 = 7 min	Ts2 = 14 min		
		Vs1 = 1 cm/min		Vs2 = 0,5 cm/min						
		Turbidez		Cor Aparente		Turbidez	Cor Aparente			
mg/L		mL		mg/L		mL		UNT	PCU	
k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u
k – Número do ensaio referente aos 6 jarros; l – Número de cada jarro; m – Valor de coagulante em mg/L; n – Volume de coagulante a ser adicionado à água; o – Valor de hidróxido de sódio em mg/L; p – Volume de hidróxido de sódio à água; q – pH após a mistura rápida do coagulante; r – valor de turbidez após a primeira coleta; s – Valor de cor aparente após a primeira coleta, t – Valor de turbidez após a segunda coleta; u – Valor de cor aparente após a segunda coleta.										

Fonte: Autoria própria (2021)

5.4 Determinação dos Parâmetros Físico-químicos

Todas as análises seguem o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), em que os procedimentos são feitos em duplicatas.

Para realizar as leituras dos parâmetros, a fim de promover o cálculo futuro de eficiência de remoção, foi feita a leitura da cor aparente e da turbidez da água bruta de rio e, posteriormente, das amostras de água após tratamento.

5.4.1 Determinação da cor aparente

Para a sua determinação é utilizado o espectrofotômetro da marca HACK, sendo o modelo DR5000. O equipamento se encontra no Núcleo de Pesquisas em Engenharia Ambiental, no Bloco F, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Campo Mourão.

De acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), a cor é determinada pelo método colorimétrico entre 450 e 465 nm.

Para cada coleta feita dos ensaios, foi avaliada a cor aparente utilizando uma cubeta que recebe um pequeno volume do sobrenadante ao qual será avaliada absorvância de cada amostra. Como o aparelho de leitura encontra-se previamente calibrado, a leitura é avaliada pelo comprimento de onda de 455 nm, dado como uma boa opção pelo *Standard Methods* (APHA, 2017).

5.4.2 Determinação da turbidez

Para a sua determinação foi utilizado o turbidímetro da marca TECNOPON, modelo TB-1000. O equipamento se encontra no laboratório de engenharia de alimento no Bloco C da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Campo Mourão.

Para realizar as leituras, é necessário fazer a calibração do equipamento com os padrões que vêm juntamente com o equipamento. Após isso, pode-se analisar as amostras que devem ser colocadas nas cubetas para analisar o valor de Unidades Nefelométrica de Turbidez (UNT).

5.5 Eficiência de Remoção de Cor Aparente e Turbidez

Obtido os resultados após o procedimento experimental, é preciso fazer o cálculo de eficiência de remoção para a cor aparente e a turbidez.

A equação matemática utilizada para determinar o percentual ($R\%$) é dada pela Equação 8.

$$R\% = \left(\frac{C_B - C_T}{C_B} \right) \times 100 \quad (8)$$

Em que C_B corresponde à concentração de água bruta e C_T à amostra de água tratada.

Os valores de remoção são ordenados em uma tabela que tem como configuração os tempos de ensaio, com os valores médios de cor aparente e turbidez da água bruta e da tratada com seus respectivos valores de remoção, como configurasse no Quadro 4 para a eletrocoagulação e no Quadro 5 para o jar test.

Quadro 4 – Modelo de tabela para os ensaios e para o percentual de remoção médios para a eletrocoagulação

pH Z						
Tempo de ensaio (minutos)	Bruto		Tratado		Eficiência (%)	
	Cor aparente (PCU)	Turbidez (UNT)	Cor aparente (PCU)	Turbidez (UNT)	Cor aparente	Turbidez
h	A'	B'	A'	B'	c	d

h – Tempo de batelada;
 Z – Valor do pH inicial da amostra;
 A' – Valor médio com respectivo desvio padrão para a cor aparente;
 B' – Valor médio com respectivo desvio padrão para a turbidez;
 c – Valor médio com respectivo desvio padrão para a eficiência de remoção da cor aparente;
 d – Valor médio com respectivo desvio padrão para a eficiência de remoção da turbidez.

Fonte: Autoria própria (2020)

Quadro 5 – Modelo de tabela para os ensaios e para o percentual de remoção médios para o jar test

Item	Al ₂ (SO ₄) ₃	NaOH	Percentual de remoção médio			
	(40 g/L)	(8 g/L)	Ts1		Ts2	
	mg/L	mg/L	Turbidez	Cor Aparente	Turbidez	Cor Aparente
X	m	o	R'	S'	T'	U'

X – Corresponde a duplicata do ensaio escolhido;
 m – Valor de coagulante em mg/L;
 o – Valor de hidróxido de sódio em mg/L;
 R' – Valor médio com respectivo desvio padrão para a eficiência de remoção da cor aparente para Ts1;
 S' – Valor médio com respectivo desvio padrão para a eficiência de remoção da turbidez para Ts1;
 T' – Valor médio com respectivo desvio padrão para a eficiência de remoção da cor aparente para Ts2;
 U' – Valor médio com respectivo desvio padrão para a eficiência de remoção da turbidez para Ts2.

Fonte: Autoria própria (2020)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram divididos no que se refere na determinação da caracterização da água bruta de rio do Campo (Campo Mourão – PR), na determinação dos ensaios da eletrocoagulação e, finalmente na determinação dos ensaios de coagulação convencional.

6.1 Caracterização da água bruta de rio do Campo (Campo Mourão – PR)

Para a realização dos ensaios, foi realizada a captação de 120 litros de água do rio do Campo (Campo Mourão – PR) no dia 31 de março de 2021.

Ao encher a bombona plástica com o volume obtido, realizou-se a homogeneização para a sua caracterização. Os valores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização da água bruta

Características				
pH	Cor aparente	Turbidez	Alcalinidade	Condutividade elétrica
	PCU	UNT	ppm	μS/cm
6,67	38	27,5	13	24,3

Fonte: Aatoria própria (2021)

Todo o volume foi armazenado em temperatura ambiente por no máximo uma semana e sem a adição de produtos químicos que alterassem seus valores iniciais. As modificações que foram realizadas ocorreram de maneira isolada, ou seja, apenas com o volume com o qual se trabalharia no momento de ensaio com a eletrocoagulação e no ensaio pela jar test.

6.2 Tratamento de água pelo sistema de eletrocoagulação

Toda a execução dos ensaios de eletrocoagulação foram programados em três tempos de trabalho com a alternância do pH inicial da amostra. Devido a água bruta do rio do Campo estar com uma condutividade muito baixa, foi necessário que fizesse a correção, para cada ensaio, de sua condução, com isso foi realizada a aplicação de cloreto de sódio para que houvesse seu aumento, pois isso auxiliaria na baixa

necessidade de aplicar uma alta voltagem para conseguir chegar à corrente de trabalho de 5 amperes.

As primeiras análises corresponderam ao pH 5, com os quais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de ensaios com pH inicial 5,00

pH: 5,00					
Tempo (min)	Análises	Ensaio			
		Bruto 1	Tratado 1	Bruto 2	Tratado 2
15	Cor aparente (PCU)	38,00	0,00	36,00	1,00
	Turbidez (UNT)	27,00	0,04	27,00	0,04
30	Cor aparente (PCU)	30,00	0,00	32,00	0,00
	Turbidez (UNT)	30,00	0,10	29,00	0,12
45	Cor aparente (PCU)	38,00	2,00	37,00	2,00
	Turbidez (UNT)	27,00	0,41	29,00	0,46

Fonte: Autoria própria (2021)

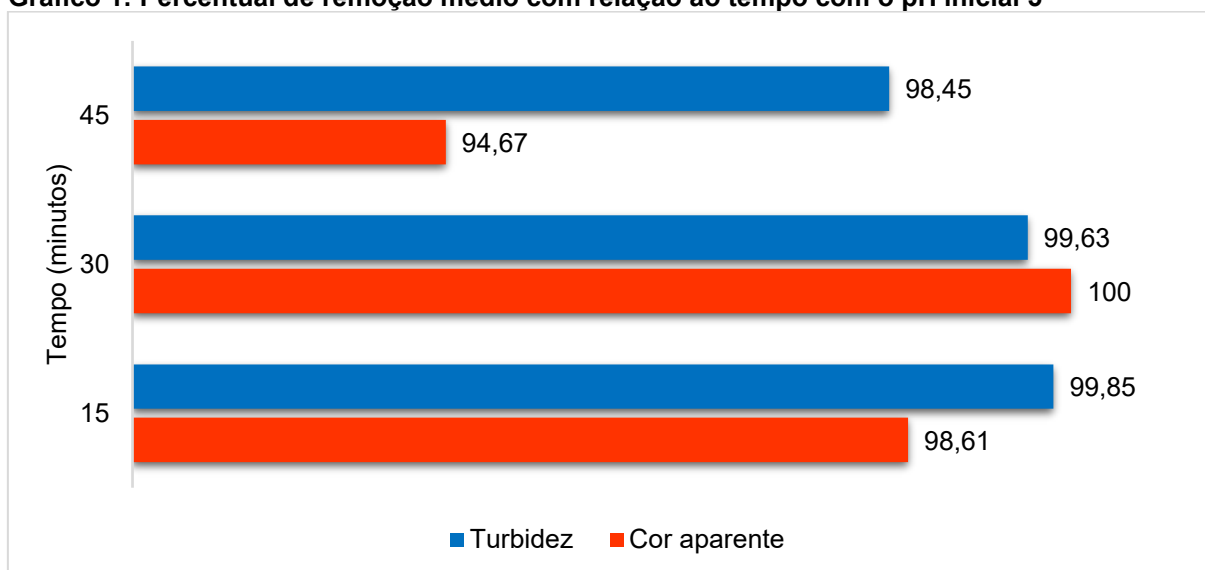
Desse primeiro ensaio foi gerado os valores médios das duplicatas, sendo elas demonstradas pela Tabela 3.

Tabela 3: Valores médios e desvios padrões na água bruta e na água tratada com pH 5,00

pH 5,00						
Tempo de ensaio (minutos)	Bruto		Tratado		Eficiência (%)	
	Cor aparente (PCU)	Turbidez (UNT)	Cor aparente (PCU)	Turbidez (UNT)	Cor aparente	Turbidez
15	37,00 ±1,00	27,00 ±0,00	0,50 ±0,50	0,04 ±0,00	98,61 ±1,39	99,85 ±0,00
30	31,00 ±1,00	29,50 ±0,50	0,00 ±0,00	0,11 ±0,01	100,00 ±0,00	99,63 ±0,04
45	37,50 ±0,50	28,00 ±1,00	2,00 ±0,00	0,44 ±0,03	94,67 ±0,07	98,45 ±0,03

Fonte: Autoria própria (2021)

Analisando os valores médios dos ensaios realizados com o pH 5 foi possível verificar a eficiência na redução da cor aparente e da turbidez existente na água bruta. É possível notar que a maioria dos valores se aproximam de zero, viabilizando todo o tratamento realizado. Com isso, os percentuais de remoção médios são apresentados através do Gráfico 1.

Gráfico 1: Percentual de remoção médio com relação ao tempo com o pH inicial 5

Fonte: Autoria própria (2021)

Observando o percentual de remoção médio dos ensaios, pode-se confirmar a supressão da cor aparente e da turbidez ao meio, tornando o procedimento como efetivo para os valores iniciais da água.

Com o procedimento em pH 5,00 terminado, foi preparada a segunda batelada de ensaios em que o valor inicial do pH foi alterado para 6,00. Com isso, os elementos ficaram expostos na Tabela 4.

Tabela 4: Valores de ensaios com pH inicial 6,00

pH: 6,00					
Tempo (min)	Análises	Ensaio			
		Bruto 1	Tratado 1	Bruto 2	Tratado 2
15	Cor aparente (PCU)	41,00	3,00	40,00	2,00
	Turbidez (UNT)	27,00	0,13	27,00	0,17
30	Cor aparente (PCU)	28,00	15,00	32,00	17,00
	Turbidez (UNT)	27,00	3,00	29,00	2,80
45	Cor aparente (PCU)	35,00	1,00	34,00	2,00
	Turbidez (UNT)	27,00	0,46	27,00	0,48

Fonte: Autoria própria (2021)

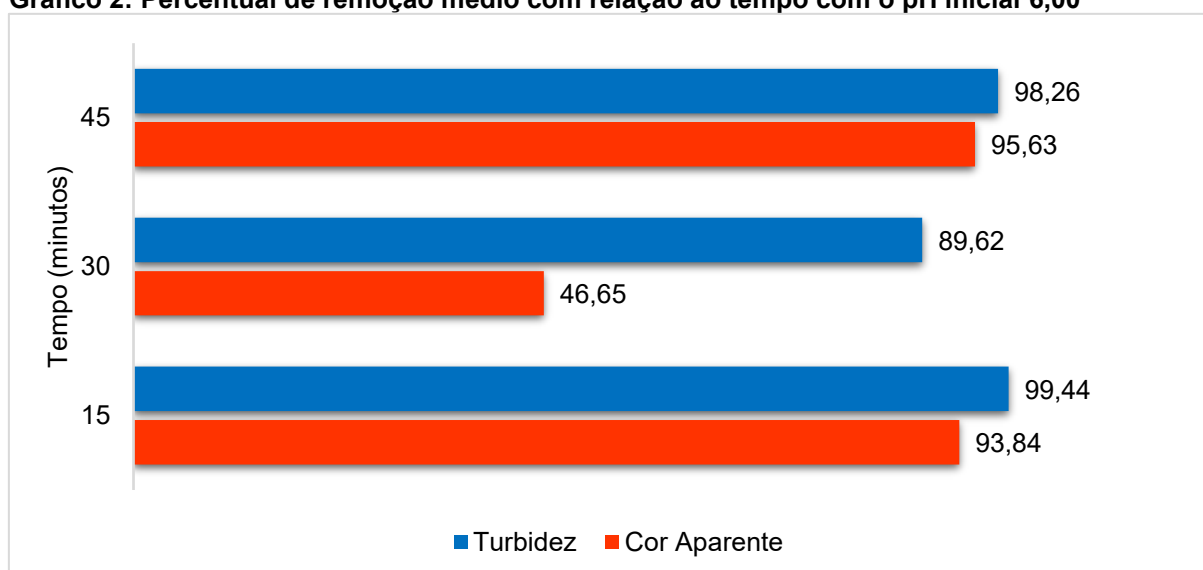
Os valores médios com seus respectivos desvios padrões foram ordenados conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Valores médios e desvios padrões na água bruta e na água tratada com pH 6,00

Tempo de ensaio (minutos)	pH 6,00					
	Bruto		Tratado		Eficiência (%)	
	Cor aparente (PCU)	Turbidez (UNT)	Cor aparente (PCU)	Turbidez (UNT)	Cor aparente	Turbidez
15	40,50 ±0,50	27,00 ±0,00	2,50 ±0,50	0,15 ±0,02	93,84 ±1,16	99,44 ±0,07
30	30,00 ±2,00	28,00 ±2,00	16,00 ±1,00	2,90 ±0,10	46,65 ±0,22	89,62 ±0,73
45	34,50 ±0,50	27,00 ±0,00	1,50 ± 0,50	0,47 ±0,01	95,63 ±1,51	98,26 ±0,04

Fonte: Autoria própria (2021)

Analisando os valores correspondentes ao ensaio em que se utilizou o pH 6 como inicial, notou-se um bom tratamento para a remoção dos parâmetros, principalmente aos ensaios de 15 minutos e de 45 minutos, em que o índice de remoção foi superior quando comparado com o ensaio de 30 minutos. Os percentuais médios de remoção representam melhor o tratamento, sendo elucidado pelo Gráfico 2.

Gráfico 2: Percentual de remoção médio com relação ao tempo com o pH inicial 6,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Pela leitura realizada no Gráfico 2 pode-se notar que o procedimento experimental alcançou melhores resultados em 15 minutos e 45 minutos. No tempo de 30 minutos o parâmetro cor aparente obteve um percentual menor que 50%, sendo não efetivo para trabalhar com uma água bruta com o mesmo padrão com o qual se trabalhou.

Ao final foi realizado o ensaio com o pH inicial em 7,00, assim os valores foram dispostos na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de ensaios com pH inicial 7,00

pH: 7,00					
Tempo (min)	Análises	Ensaio			
		Bruto 1	Tratado 1	Bruto 2	Tratado 2
15	Cor aparente	31,00	0,00	29,00	1,00
	Turbidez	28,00	0,01	27,00	0,00
30	Cor aparente	30,00	12,00	31,00	11,00
	Turbidez	30,00	2,70	29,00	2,70
45	Cor aparente	36,00	3,00	37,00	2,00
	Turbidez	28,00	1,04	29,00	1,10

Fonte: A autoria própria (2021)

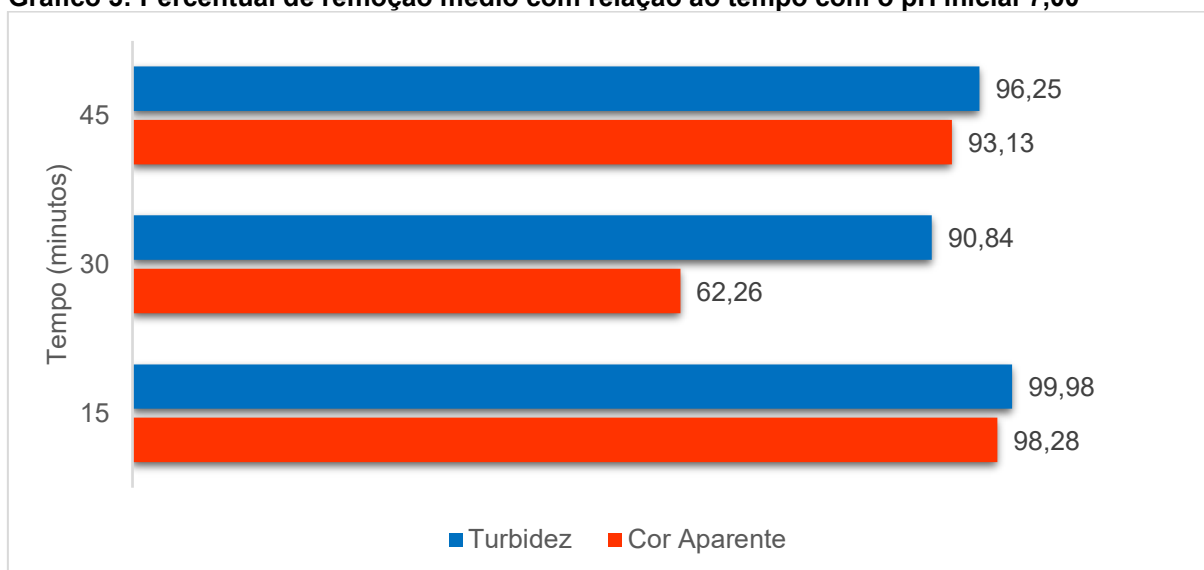
Através dos dados obtidos foi construída a tabela em que dispõem dos valores médios com seus respectivos desvios padrões para o ensaio de pH 7,00, conforme demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7: Valores médios e desvios padrões na água bruta e na água tratada com pH 7,00

pH 7,00						
Tempo de ensaio (minutos)	Ensaio		Ensaio		Eficiência (%)	
	Cor aparente (PCU)	Turbidez (UNT)	Cor aparente (PCU)	Turbidez (UNT)	Cor aparente	Turbidez
15	31,00 ±2,00	27,50 ±0,50	0,50 ±0,50	0,01 ±0,01	98,28 ±1,72	99,98 ±0,02
30	30,50 ±0,50	29,50 ±0,50	11,50 ±0,50	2,70 ±0,00	62,26 ±2,26	90,84 ±0,16
45	36,50 ±0,50	28,50 ±0,50	2,50 ±0,50	1,07 ±0,03	93,13 ±1,46	96,25 ±0,04

Fonte: A autoria própria (2021)

Em primeira análise foi possível verificar um melhor resultado no ensaio de 15 minutos, um valor mediano no tempo de 45 minutos e um valor abaixo no tempo de 30 minutos. Verificando esse resultado, o Gráfico 3 foi apresentado para melhor elucidar a situação ensaiada.

Gráfico 3: Percentual de remoção médio com relação ao tempo com o pH inicial 7,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Diferentemente dos resultados encontrados no ensaio com pH 6,00, no de pH 7,00 o ensaio de 30 minutos ficou acima dos 50%, diferentemente do que ocorreu no anterior.

Fazendo uma análise global dos procedimentos pela eletrocoagulação, pode-se notar que os melhores resultados foram obtidos com um pH mais ácido com relação aos demais. Com relação a isso, os valores encontrados no tempo de ensaio de 30 minutos foram os melhores com relação ao tratamento da água bruta.

Fazendo uma relação com os resultados obtidos por Manzoni Junior et. al (2020), com o qual faz um estudo de tratamento com água bruta e pH inicial de 6, viu-se que nos tempos de tratamento de 30 e 45 minutos apresentou índices de remoção de cor aparente e turbidez chegaram próximos dos 100%. No presente trabalho, com o pH 6 viu-se que no tempo de 30 minutos apresentou um valor abaixo. A diferença pode ter sido devido as características da água bruta, por ter valores diferentes.

6.3 Tratamento de água pelo sistema de coagulação/floculação/sedimentação

Para a realização dos ensaios de jar test, foram variadas as concentrações de sulfato de alumínio como coagulante químico e de hidróxido de sódio como base para alteração do pH inicial das amostras. Determinadas as dosagens, verificou-se quais seriam suas eficiências quanto a remoção de cor aparente e turbidez.

A primeira análise foi experimentada a adição de apenas coagulante, a fim de verificar qual o índice de remoção dos parâmetros pré-estabelecidos sem a alteração do pH. Para isso, foram adotados concentrações de 20 a 100 mg/L, conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8: Ensaio sem adição de NaOH

Ensaio	Jarro	Produtos Químicos				pH de coagulação	Coleta			
		Sulfato de Alumínio		NaOH			Sobrenadante		Sobrenadante	
		(40 g/L)		(8 g/L)			Ts1 = 7 min		Ts2 = 14 min	
		Vs1 = 1 cm/min		Vs2 = 0,5 cm/min			Turbidez	Cor Aparente	Turbidez	Cor Aparente
		mg/L	mL	mg/L	mL					
		1	1	20	1		0	0	6,40	25
2	40		2	0	0	5,71	28	44	23	41
3	50		2,5	0	0	5,36	28	44	23	41
4	60		3	0	0	4,81	27	37	23	40
5	80		4	0	0	4,38	29	46	26	44
6	100		5	0	0	4,24	29	45	22	42

Fonte: Autoria própria (2021)

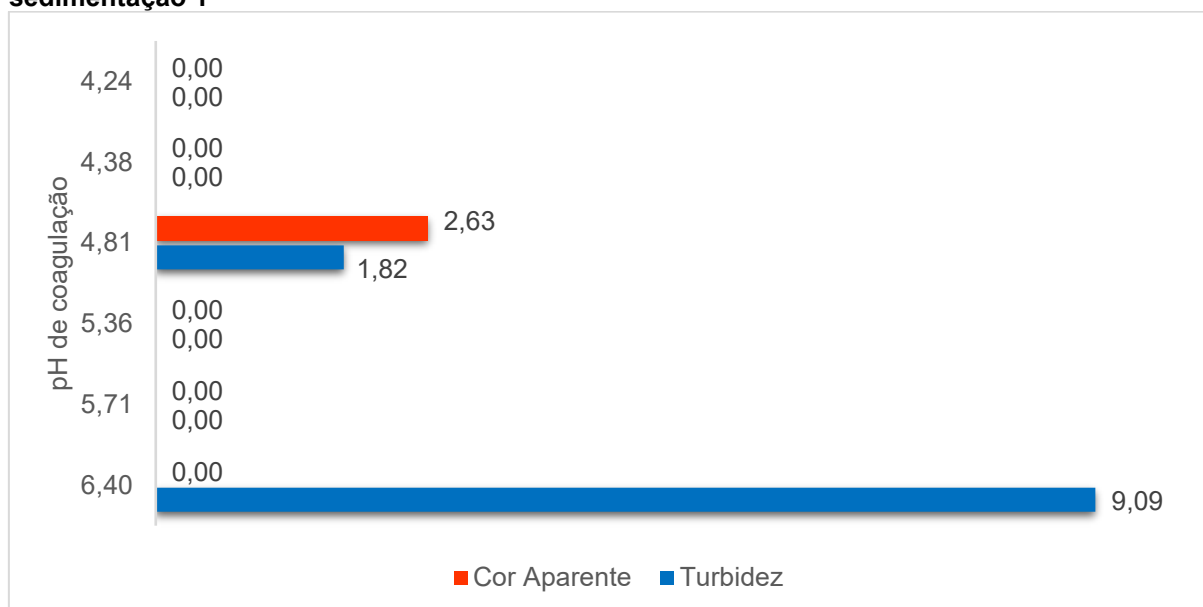
Pela análise da Tabela 8, verificou-se que o pH de coagulação da água bruta logo após a mistura rápida tornou-se mais ácida conforme aumentava-se o volume de coagulante inserido nos jarros. Isso confirmou que a água possui uma alcalinidade muito baixa, não tendo função de tamponamento.

Com relação à remoção da cor aparente e da turbidez, pode-se notar que sua eficiência ficou muito baixa, evidenciando a necessidade de adicionar íons hidróxidos (OH^-). Os resultados de eficiência foram ordenados na Tabela 9 em gráficos para elucidar os percentuais. O Gráfico 4 faz relação com o tempo de sedimentação 1 e o Gráfico 5 faz relação ao tempo de sedimentação 2.

Tabela 9: Eficiência de remoção primeiro ensaio com a água bruta

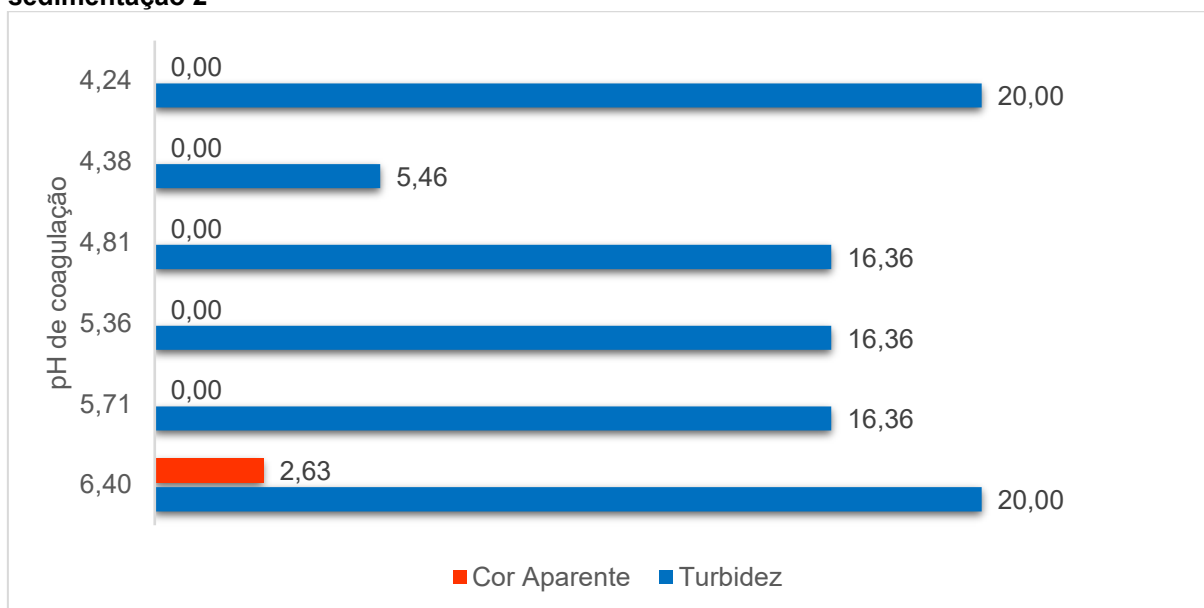
Ensaio	Jarro	pH de coagulação	Ts1 = 7 min		Ts2 = 14 min	
			Vs1 = 1 cm/min		Vs2 = 0,5 cm/min	
			Turbidez	Cor Aparente	Turbidez	Cor Aparente
			%	%	%	%
1	1	6,40	9,09	0,00	20,00	2,63
	2	5,71	0,00	0,00	16,36	0,00
	3	5,36	0,00	0,00	16,36	0,00
	4	4,81	1,82	2,63	16,36	0,00
	5	4,38	0,00	0,00	5,46	0,00
	6	4,24	0,00	0,00	20,00	0,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 4: Percentual de remoção com relação ao ensaio 1 do jar test para o tempo de sedimentação 1

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 5: Percentual de remoção com relação ao ensaio 1 do jar test para o tempo de sedimentação 2



Fonte: Autoria própria (2021)

Aferindo os gráficos, pode-se perceber que a eficiência máxima de remoção da turbidez é de 20% enquanto a cor aparente se aproxima de 3%, sem a correção do pH.

Nos ensaios 2 e 3 são colocados volumes de hidróxido de sódio para verificar se há uma melhora quanto a remoção dos parâmetros. Com isso, os valores de ensaio são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Ensaios com uso de NaOH

Ensaio	Jarro	Produtos Químicos				pH de coagulação	Coleta			
		Sulfato de Alumínio		NaOH			Sobrenadante		Sobrenadante	
		(40 g/L)		(8 g/L)			Ts1 = 7 min		Ts2 = 14 min	
		mg/L		mL			Vs1 = 1 cm/min		Vs2 = 0,5 cm/min	
		Turbidez		Cor Aparente			Turbidez		Cor Aparente	
UNT		PCU		UNT		PCU				
2	1	20	1	4	1	6,67	0,95	6	0,8	4
	2	20	1	8	2	6,76	0,62	3	0,47	3
	3	40	2	12	3	6,61	0,45	3	0,19	1
	4	50	2,5	16	4	6,71	0,37	2	0,12	1
	5	50	2,5	20	5	6,68	0,89	4	0,31	2
	6	60	3	24	6	6,87	0,93	5	0,52	4
3	1	20	1	12	3	7,99	31	46	29	45
	2	40	2	16	4	7,7	2,5	7	0,7	4
	3	50	2,5	18	4,5	7,46	1,77	6	0,65	4
	4	60	3	26	6,5	7,64	29	43	26	36
	5	80	4	26	6,5	7,1	1,46	4	0,62	3
	6	100	5	28	7	6,62	1,55	4	0,51	3

Fonte: Autoria própria (2021)

Conforme é verificado na Tabela 10, a concentração de sulfato de alumínio está entre 20 mg/L a 50 mg/L e de hidróxido de sódio está entre 4 mg/L a 24 mg/L no ensaio 2. No ensaio 3 o coagulante está numa faixa de 20 mg/L a 100 mg/L e numa faixa de solução básica de 12 mg/L a 28 mg/L.

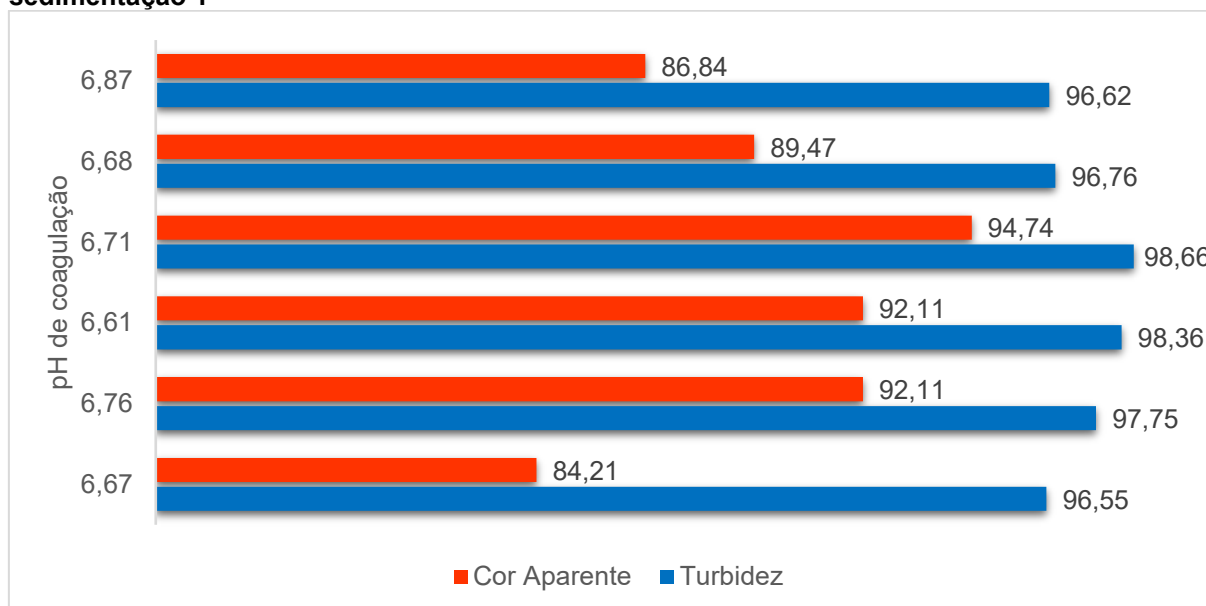
Analisando, primeiramente, foi possível analisar que no ensaio 2 o uso de NaOH auxiliou no tamponamento da água, deixando o pH de coagulação próximo ao valor inicial da água bruta. No ensaio 3 verificou-se que houve uma elevação do pH em alguns jarros, que contribuiu para a elevada leitura de cor aparente e de turbidez.

Na Tabela 11 e no Gráfico 6 há a representação do percentual de remoção de cor aparente e de turbidez para o ensaio 2 para o primeiro tempo de sedimentação, no Gráfico 7, para o segundo tempo de sedimentação.

Tabela 11: Eficiência de remoção no segundo e terceiro ensaio com a água bruta

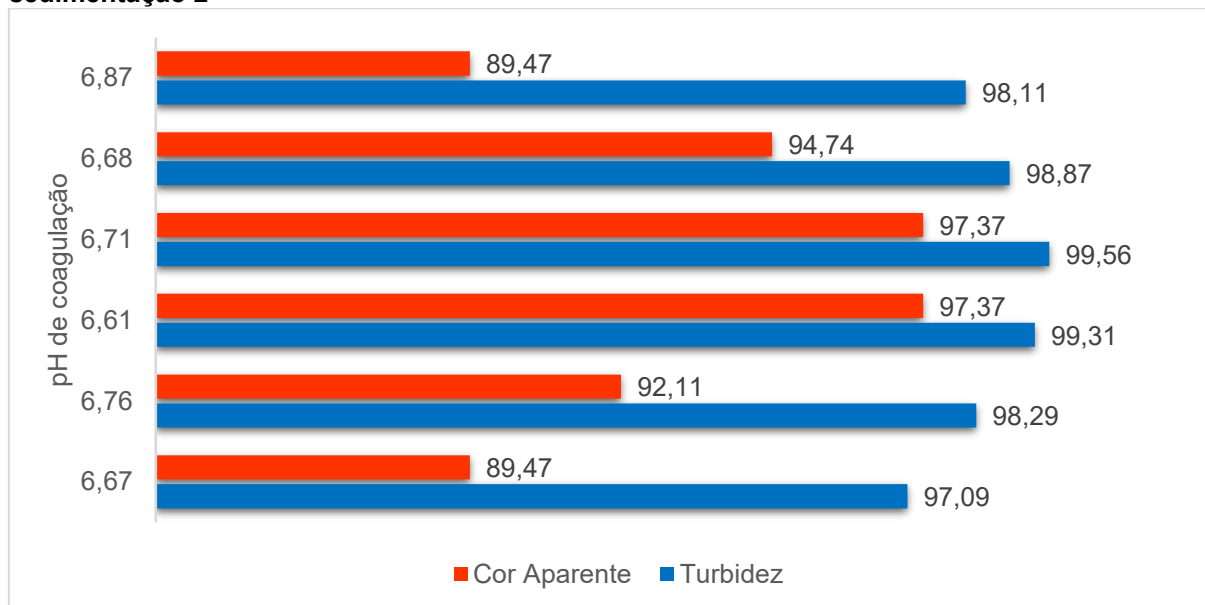
Ensaio	Jarro	pH de coagulação	Ts1 = 7 min		Ts2 = 14 min	
			Vs1 = 1 cm/min		Vs2 = 0,5 cm/min	
			Turbidez	Cor Aparente	Turbidez	Cor Aparente
			%	%	%	%
2	1	6,67	96,55	84,21	97,09	89,47
	2	6,76	97,75	92,11	98,29	92,11
	3	6,61	98,36	92,11	99,31	97,37
	4	6,71	98,66	94,74	99,56	97,37
	5	6,68	96,76	89,47	98,87	94,74
	6	6,87	96,62	86,84	98,11	89,47
3	1	7,99	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	7,7	90,91	81,58	97,46	89,47
	3	7,46	93,56	84,21	97,64	89,47
	4	7,64	0,00	0,00	5,46	5,26
	5	7,1	94,69	89,47	97,75	92,11
	6	6,62	94,36	89,47	98,15	92,11

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 6: Percentual de remoção com relação ao ensaio 2 do jar test para o tempo de sedimentação 1

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 7: Percentual de remoção com relação ao ensaio 2 do jar test para o tempo de sedimentação 2



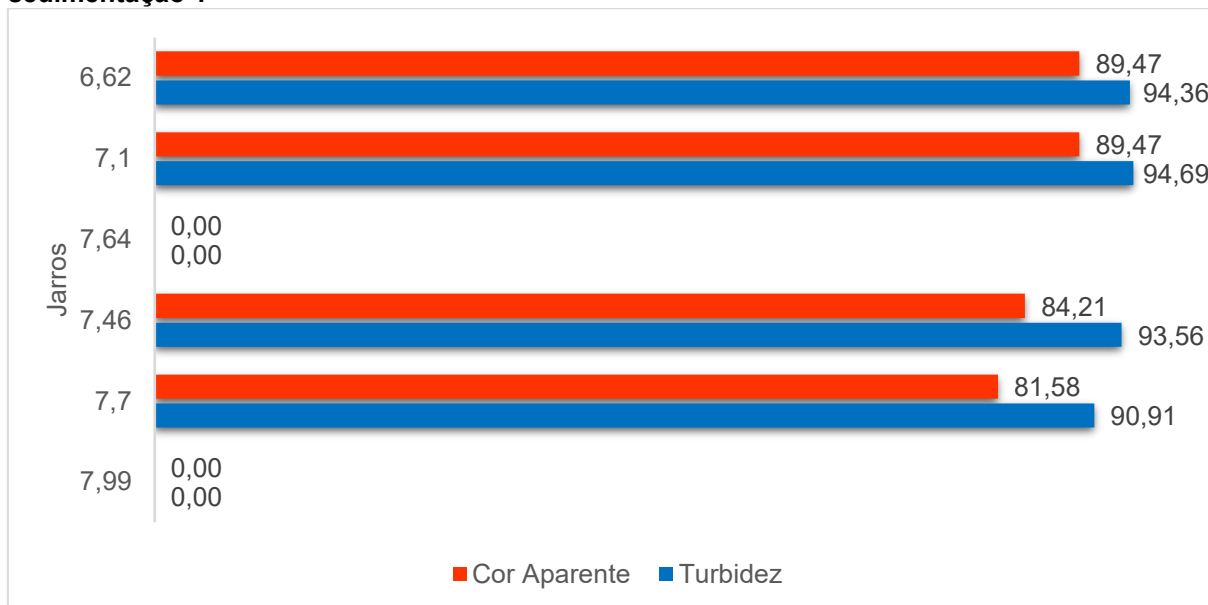
Fonte: Autoria própria (2021)

Analisando os gráficos 6 e 7, pode-se notar que houve grandes valores percentuais, garantindo uma boa coagulação entre valores de pH 6,6 e 7,7, região em que há predominância do precipitado de alumínio, a remoção ocorre por adsorção da matéria orgânica dissolvida no precipitado e subsequente floculação (mecanismo de varredura). Em estações de tratamento de água convencional se emprega predominantemente o mecanismo de coagulação por varredura devida a formação de flocos maiores e mais densos, melhorando assim a sedimentação.

Com relação aos tempos de sedimentação distintos, verificou-se que no tempo de 14 minutos os valores de remoção de turbidez quase chegaram aos 100%. Com relação a cor aparente, também houve uma melhora, que se acompanha com a turbidez. No entanto esse tempo de sedimentação em uma ETA depende do tamanho dos floculadores e tanques de sedimentação.

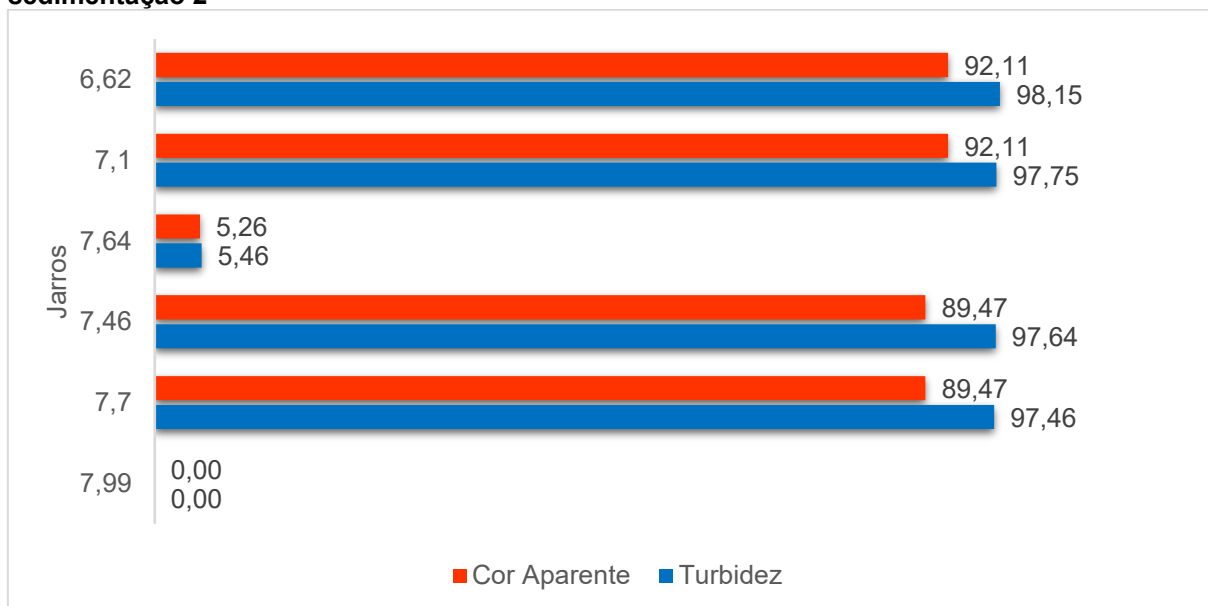
A Tabela 11 e os Gráficos 8 e 9 representam o percentual de remoção de cor aparente e turbidez para o ensaio 3, sendo que o primeiro representa o tempo de sedimentação 1 e o segundo o tempo de sedimentação 2.

Gráfico 8: Percentual de remoção com relação ao ensaio 3 do jar test para o tempo de sedimentação 1



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 9: Percentual de remoção com relação ao ensaio 3 do jar test para o tempo de sedimentação 2



Fonte: Autoria própria (2021)

Fazendo a leitura dos dados percentuais dos gráficos 8 e 9 pode-se verificar que em alguns valores de pH x dosagem, o percentual foi ínfimo ou então muito baixos, conforme é demonstrado pelo jarro pH 7,64 para os tempos primários e secundários de sedimentação. Com relação aos demais jarros é possível entender que há uma grande melhora de remoção, dando, também, sucesso ao tratamento.

Verificando os três cenários de ensaios, foi realizado, ao final, um reteste com os melhores valores de remoção, com isso foi construído o ensaio 4, o qual está demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12: Duplicatas com os melhores valores

Ensaio	Jarro	Produtos Químicos				pH de coagulação	Coleta			
		Sulfto de Alumínio		NaOH			Sobrenadante		Sobrenadante	
		(40 g/L)		(8 g/L)			Ts1 = 7 min	Ts2 = 14 min		
		mg/L		mL			Vs1 = 1 cm/min	Vs2 = 0,5 cm/min		
							Turbidez	Cor Aparente	Turbidez	Cor Aparente
							UNT	PCU	UNT	PCU
4	1	20	1	4	1	6,70	1,08	6	0,84	5
	2	20	1	8	2	6,82	0,69	5	0,41	4
	3	40	2	16	4	7,65	2,45	6	0,68	5
	4	50	2,5	18	4,5	4,39	1,83	5	0,7	5
	5	80	4	26	6,5	7,05	1,53	5	0,66	3
	6	100	5	28	7	6,55	1,64	3	0,52	3

Fonte: Autoria própria (2021)

Com o ensaio 4 houve algumas modificações, podendo ser devido a erros operacionais, porém os valores ficaram muito próximos aos realizados anteriormente. Os valores de pH de coagulação ficaram com valores bem semelhantes com aqueles que foram escolhidos para realização da duplicata, qualificando o ensaio.

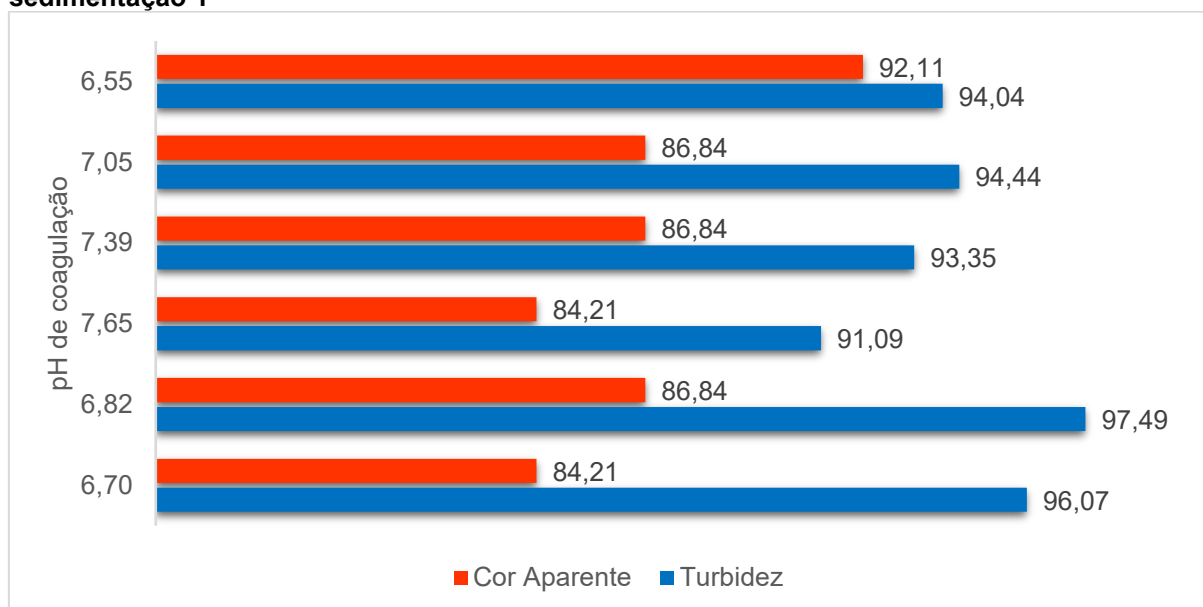
Com relação às duplicatas, é possível analisar que os valores correspondentes aos jarros que continham 20 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ e 8 mg/L de NaOH e os jarros que continham 100 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ e 28 mg/L de NaOH deram valores muito satisfatórios.

As representações gráficas dos resultados percentuais de remoção de cor aparente e de turbidez tornaram a análise mais simplificada, demonstrando que os ensaios previamente ditos foram os melhores em relação a todos as outras dosagens utilizadas para a realização do estudo, conforme demonstrado na Tabela 13 e posteriormente no Gráfico 10 e no Gráfico 11.

Tabela 13: Eficiência de remoção no quarto ensaio com a água bruta

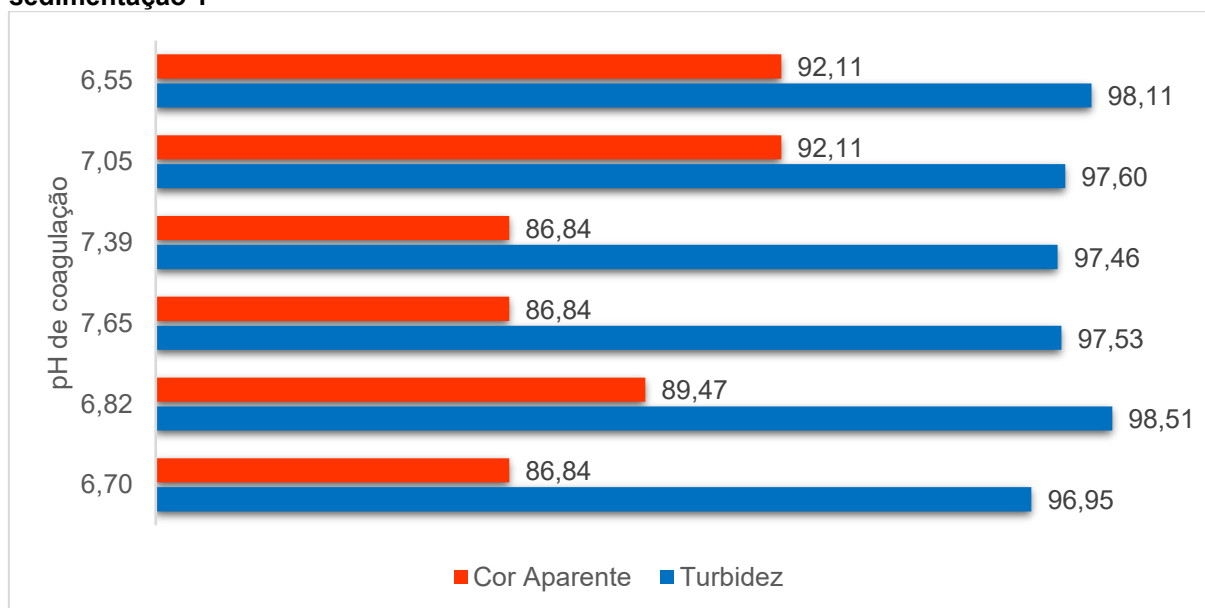
Ensaio	Jarro	pH de coagulação	Ts1 = 7 min		Ts2 = 14 min	
			Vs1 = 1 cm/min		Vs2 = 0,5 cm/min	
			Turbidez	Cor Aparente	Turbidez	Cor Aparente
			%	%	%	%
4	1	6,70	96,55	84,21	97,09	89,47
	2	6,82	97,75	92,11	98,29	92,11
	3	7,65	98,36	92,11	99,31	97,37
	4	7,39	98,66	94,74	99,56	97,37
	5	7,05	96,76	89,47	98,87	94,74
	6	6,55	96,62	86,84	98,11	89,47

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 10: Percentual de remoção com relação ao ensaio 4 do jar test para o tempo de sedimentação 1

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 11: Percentual de remoção com relação ao ensaio 4 do jar test para o tempo de sedimentação 1



Fonte: Autoria própria (2021)

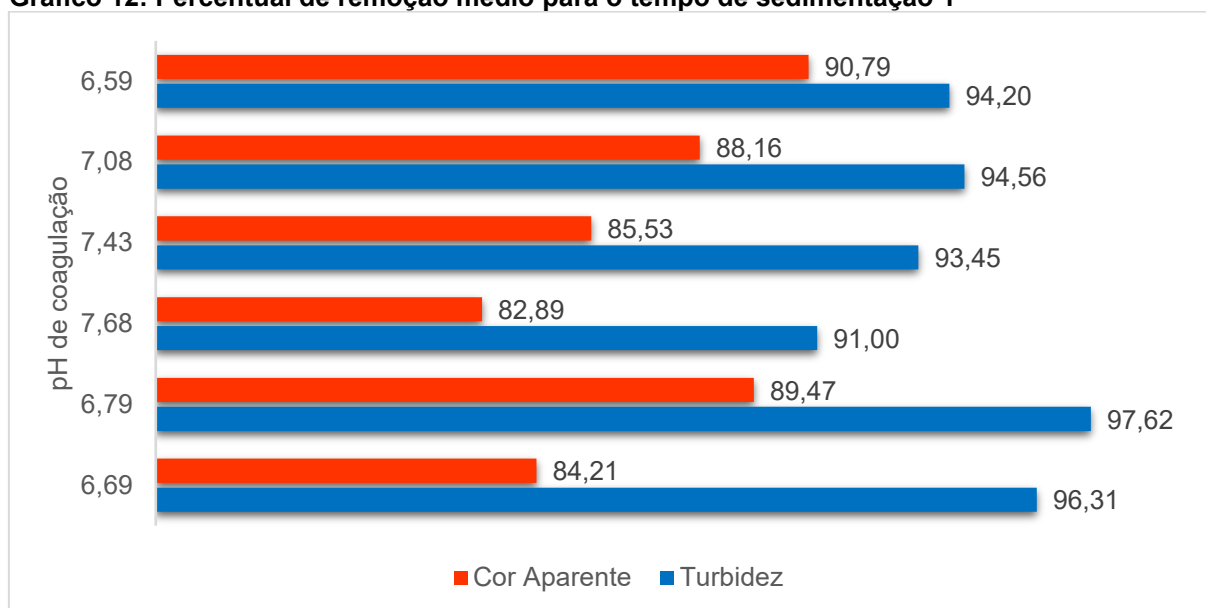
Após aferir todos os dados das duplicatas, foi realizado o cálculo dos valores médios e de seus respectivos desvios padrões para que se pudesse chegar a uma conclusão de qual foi a melhor dosagem de sulfato de alumínio e de hidróxido de sódio para o tratamento da água bruta. Com isso a Tabela 14 elucida os valores.

Tabela 14: : Valores médios e desvios padrões da água tratada pela coagulação convencional

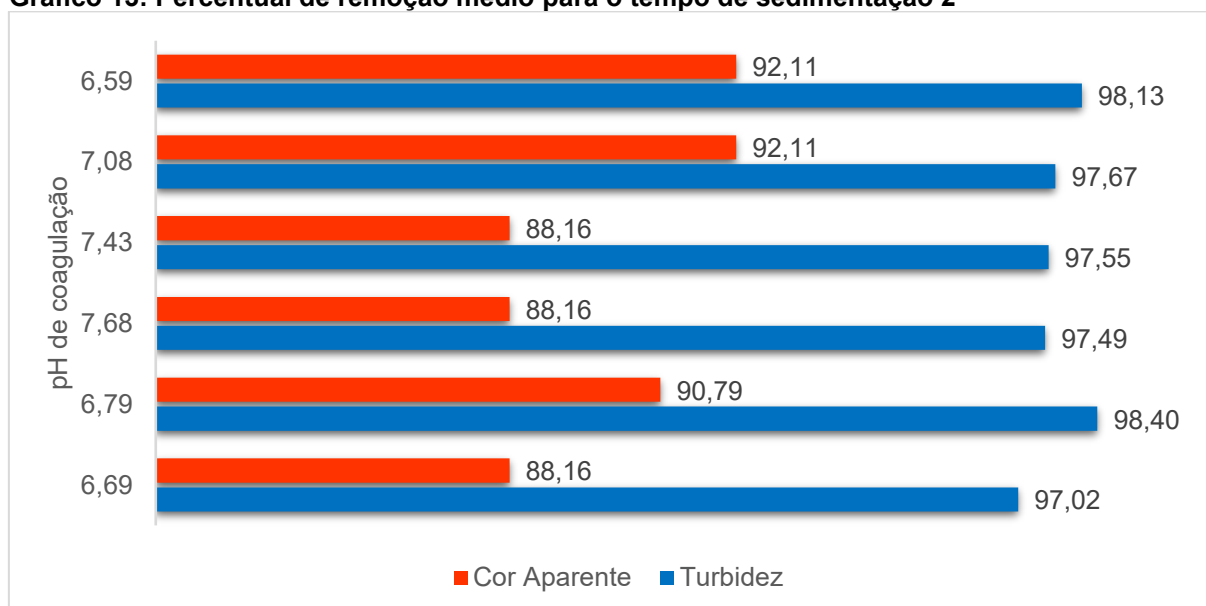
Item	Al ₂ (SO ₄) ₃ (40 g/L) mg/L	pH de coagulação médio	Percentual de remoção médio			
			Ts1		Ts2	
			Turbidez %	Cor Aparente %	Turbidez %	Cor Aparente %
A	20	6,69	96,31 ±0,24	84,21 ±0,00	97,02 ±0,07	88,16 ±1,32
B	20	6,79	97,62 ±0,13	89,47 ±2,63	98,40 ±4,41	90,79 ±1,32
C	40	7,68	91,00 ±0,09	82,89 ±1,32	97,49 ±0,04	88,16 ±1,32
D	50	7,43	93,45 ±0,11	85,53 ±1,32	97,55 ±0,09	88,16 ±1,32
E	80	7,08	94,56 ±0,13	88,16 ±1,32	97,67 ±0,07	92,11 ±0,00
F	100	6,59	94,20 ±0,16	90,79 ±1,32	98,13 ±3,02	92,11 ±0,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Do acordo com a Tabela 13, observa-se que o desvio foi consideravelmente baixo para a maioria dos ensaios, tornando-os aceitáveis para se determinar o melhor tratamento pelo uso do sulfato de alumínio. Disto, o Gráfico 12 e o Gráfico 13 apresentam os valores médios do percentual de remoção, para assim se determinar a escolha de maneira mais didática.

Gráfico 12: Percentual de remoção médio para o tempo de sedimentação 1

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 13: Percentual de remoção médio para o tempo de sedimentação 2

Fonte: Autoria própria (2021)

Após a leitura dos gráficos, verificou-se que o melhor ensaio que obteve a melhor remoção dos parâmetros de cor aparente e de turbidez foi o de item F, ou seja, ao ensaio que utilizou os valores de 100 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$, 28 mg/L de NaOH e pH de coagulação médio de 6,59.

7 CONCLUSÃO

Com relação a água bruta de rio, a coleta foi realizada no dia 31 de março de 2021 e apresentava pH 6,67, cor aparente de 38 PCU, turbidez de 27,5 UNT, alcalinidade de 13 ppm e condutividade elétrica de 24,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Com o delineamento do processo por eletrocoagulação operando com um sistema monopolar em paralelo, viu-se em sua maioria remoções acima dos 90% para a turbidez, exceto para o tempo de 30 minutos com pH 6 e, também, de 90% para a cor aparente, excluindo para o tempo de 30 minutos para o pH 6 e para o pH 7. Visto que os piores resultados foram encontrados nos tempos de 30 minutos e com pH 6 e pH 7, pode-se entender que os fatores tempo e pH interferiram numa melhora de resultados. Sendo verificado que em pH 5 o tempo de 30 minutos foi quase que garantido uma remoção total dos parâmetros analisados, nos outros ensaios o tempo de 30 minutos poderia ser trocado para os ensaios de 15 minutos ou 45 minutos, com os quais trariam melhores resultados.

Com o método experimental da coagulação convencional, notou-se que algumas combinações trouxeram valores satisfatórios quanto a remoção da turbidez e da cor aparente. Ao aplicar a duplicata com os melhores resultados obtidos previamente, viu-se que o tempo de sedimentação 2 apresentou melhores resultados quando comparado com o tempo de sedimentação 1. Com a realização do cálculo dos valores médios, constatou-se que o índice de remoção da turbidez foram superiores a 90% em sua totalidade, já para a cor aparente, apenas os ensaios caracterizados pelos itens B, E e F alcançaram a mesma marca dos 90%, sendo então os melhores delineamentos de trabalhabilidade para o presente trabalho.

Comparando os dois métodos de procedimentos experimentais, pode-se verificar que ambos podem ser utilizados para o tratamento de água bruta, visto os bons resultados apresentados. Contudo pode-se verificar que nos ensaios de eletrocoagulação houve resultados que alcançaram valores quase que totais de remoção dos parâmetros pré-estabelecidos, surtindo como uma melhor forma de tratamento, como exemplo elucidativo o ensaio ocorrido no tempo de 30 minutos com pH inicial em 5, além de ser um método que não utiliza coagulantes químicos, uma vez que, os eletrodos são responsáveis por liberar íons que trabalharão na formação dos flocos.

8 REFERÊNCIAS

APHA - American Public Health Association. AWWA - American Water Works Association. WEF Water Environmental Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. APHA/AWWA/WEF: Washington, 2017.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2017. **Marco Legal do Saneamento Básico**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, jul 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>. Acesso em: 28 out. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017. **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**. Disponível em: <https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida----o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2020.

BITTENCOURT, C.; PAULA, M. A. S. de. **Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos**. 1ª edição. São Paulo: Érica, 2014.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005. Brasil. Publicado no D.O.U. nº 053, de 18/03/2005.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Brasil. Publicado no D.O.U. nº 092, de 16/05/2011.

CHEN, G.; HUNG, Y.T. Electrochemical Wastewater Treatment Process. In: Wang, L. K.; Hung, Y.T.; Shammass, N. K. **Advanced Physicochemical Treatment Technologies**. Totowa, New Jersey: Humana Press Inc, 2007. Cap. 2, p. 67.

DAVIS, L. M. **Tratamento de Águas para Abastecimento e Residuárias**. Tradução: Sabine Alexandra Holler. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. Título Original: Water and wastewater engineering: design principles and practice.

HAKIZIMANA, J. N.; GOURICH, B.; CHAFI, M.; STIRIBA, Y.; VIAL, C.; DROGUI, P.; NAJA, J. **Electrocoagulation Process in Water Treatment: A Review of electrocoagulation modeling approaches**. Elsevier, fev. 2017, V.404, Desalination, p. 3-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916416315971?via%3DiHub>. Acesso em: 29 ago. 2020.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. Tradução: Noveritis do Brasil. São Paulo: Cengage, 2016. Título Original: Principles of water treatment.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Saiba como as doenças provocadas pela falta de saneamento se distribuem no Brasil**. Fevereiro 2020. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/blog/2020/02/18/saiba-como-as-doencas-provocadas->

[pela-falta-de-saneamento-se-distribuem-no-brasil/#:~:text=Entre%20as%20principais%20consequ%C3%Aancias%20est%C3%A3o,para%20cada%2010%20mil%20habitantes>](#). Acesso em: 19 out. 2020.

MAMELKINA, M. A.; TUUNILA, R.; SILLÄNPÄÄ, M.; HÄKKINEN, A. **Systematic Study on Sulfate Removal from Mining Waters by Electrocoagulation**. Elsevier, jun. 2019, V.216, Separation and Purification Technology, p. 43-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.056>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586618337468?via%3Dihub>. Acesso em: 06 nov. 2020.

MANZONI JUNIOR, M.; TOLDO, N. T. Y.; SOUZA, P. C. **Tratamento de efluente por processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio**. SEI, SICITE, nov. 2020. Disponível em: http://seisicite2020.td.utfpr.edu.br/trabalhos?field_id_value=&title=&field_modalidade_value=All&field_evento_value=All&field_data_value=All&field_mencao_honrosa_value=1&page=1. Acesso em: 10 mai. 2021.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D.L. **Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation**. Elsevier, oct. 2004, V.114, Journal of Hazardous Materials, p. 199-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389404004170>. Acesso em: 31 mar. 2021.

NAWARKAR, C. J.; SALKAR, V. D. **Solar Powered Electrocoagulation System for Municipal Wastewater Treatment**. Elsevier, fev. 2019, V.237, Fuel, p. 222-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.140>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236118316879?via%3Dihub>. Acesso em: 06 nov. 2020.

NEVES, F., L. **Eletrodissolução de Alumínio em Polpa Celulósica Proveniente da Reciclagem de Embalagens Cartonadas Multicamadas**. 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3865/2297.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 nov. 2020.

SABESP. **Manual do cliente**. Março 2015. Disponível em: http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/Folhetos/2016/manual_cliente.pdf. Acesso em 08 nov. 2020.

SANEPAR. **Manual de projetos de saneamento**. Diretrizes para a elaboração de projetos de sistemas de abastecimento de água. Tratamento de água. Módulo 10.1. Agosto 2018. Disponível em: http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/mps-versao-2018/modulo_10.1_-_diretrizes_-_projeto_de_tratamento_de_agua.pdf. Acesso em 10 fev. 2021.

SOUZA, P. C. **Aplicação do processo de eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria têxtil**. Junho 2016. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3665>. Acesso em: 20 ago. 2020.

ONU – Organização das Nações Unidas. Assembleia Geral. 64/292. **The human right to water and sanitation.** 28 de Julho de 2010. Disponível em: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292. Acesso em: 28 out. 2020.

OMS – Organização Mundial da Saúde. **Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG target and universal coverage.** 2012. Disponível em: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2012/globalcosts.pdf. Acesso em: 28 out. 2020.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. de. de. **Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada.** 1ª edição. São Paulo: Blucher, 1991.