



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Avaliação da viabilidade técnica de utilização de Policloreto de Alumínio em comparação ao Sulfato de Alumínio em uma ETA no Rio Grande do Sul

Autor: Luísa Tavares Soares

Orientador: Prof.^ª Dr.^ª Líliliana Amaral Féris

Porto Alegre, novembro de 2020

Autor: Luísa Tavares Soares

Avaliação da viabilidade técnica de utilização de Policloreto de Alumínio em comparação ao Sulfato de Alumínio em uma ETA no Rio Grande do Sul

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientador: Prof.^ª Dr.^ª Liliana Amaral Féris

Banca Examinadora:

Prof.^ª Dr.^ª Aline Schilling Cassini, UFRGS

Dr.^ª Keila Guerra Pacheco Nunes, UFRGS

Porto Alegre

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Simone e José Luiz, por sempre priorizarem a minha educação e a da minha irmã. Também, por todo o apoio e incentivo durante todo o curso de Graduação em Engenharia Química na UFRGS, não teria sido possível sem o auxílio deles.

Ao meu noivo, César, por todo apoio, compreensão e paciência durante todo esse período conturbado da graduação.

À minha irmã, Taís, por me incentivar a ir atrás dos meus sonhos.

Aos meus avós, Ana e Roberto, por toda a ajuda e apoio sempre. À minha avó, Helena (*In Memoriam*), por desde criança me incentivar a buscar conhecimento e aprendizado.

Aos meus demais familiares e amigos, por sempre torcerem por mim e me incentivarem a não desistir.

Aos meus colegas de trabalho, por toda a ajuda em relação aos horários de trabalho para não atrapalhar meus estudos.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Liliana, por aceitar me orientar nesse trabalho e pela ajuda na execução.

RESUMO

A água é um dos mais importantes elementos para a manutenção da vida humana. Além de fazer parte da composição corporal, é responsável por todas as funções orgânicas. A economia mundial também depende da água nas indústrias, agricultura, geração de energia, transporte e uso doméstico. Por essa razão, água é um bem indispensável para toda a população. Porém, muitas regiões do Brasil e do mundo ainda não possuem acesso à água potável e ao saneamento básico. Conseqüentemente, a falta de água e o tratamento inadequado afetam a saúde da população mundial e igualmente a economia. A água bruta necessita passar por etapas de tratamentos físicos e químicos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) para tornar-se adequada para o consumo da população. A principal etapa do tratamento de água consiste no processo de coagulação-floculação que realiza a remoção de impurezas solubilizadas na água. Neste processo, é necessária a dosagem de um agente coagulante. Existem vários coagulantes disponíveis no mercado para serem utilizados no tratamento de água. Para definição de escolha do coagulante é importante a realização de testes na água bruta captada pela ETA. Nesse contexto, o presente estudo objetivou comparar a utilização dos coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC (Policloreto de Alumínio), através de Testes de Clarificação (*Jar Test*). Foram analisadas 3 amostras de água bruta com diferentes valores de turbidez e para cada amostra foram utilizadas 3 dosagens diferentes de cada coagulante. O estudo foi realizado simulando o processo de tratamento de uma ETA que emprega o Sulfato de Alumínio como coagulante. Os resultados mostraram que o coagulante PAC possui, em média, 24,3 % maior eficiência do que o Sulfato de Alumínio, porém possui custo mais elevado na situação avaliada. O PAC pode ser utilizado na água bruta da ETA estudada, no entanto, a viabilidade econômica necessitaria de maiores estudos.

Palavras-chave: *água, coagulação, Sulfato de Alumínio, PAC.*

ABSTRACT

Water is one of the most important elements for the maintenance of human life. In addition to being part of the body composition, it's responsible for all organic functions. The world economy also depends on water in industries, agriculture, power generation, transportation and domestic use. For this reason, the need for water is indispensable for the entire population. However, many regions of Brazil and the world do haven't access to water and basic sanitation. Consequently, the lack of water and inadequate treatment affect the health of the world population and the economy as well. Raw water needs to go through stages of physical and chemical treatments at Water Treatment Plants (WTP) to become suitable for the population's consumption. The main stage of water treatment consists of the coagulation-flocculation process that removes impurities solubilized in water. In this process, the dosage of a coagulant is necessary. There are several coagulants available on the market to be used in water treatment. To define the choice of coagulant, it is important to carry out tests on the raw water captured by the Water Treatment Plants. In this context, the present study wants to compare the use of Aluminum Sulfate and Aluminium Polychloride coagulants, through Clarification Tests (Jar Test). 3 samples of raw water with different turbidity values were analyzed and for each sample 3 different dosages of each coagulant were used. The study was carried out simulating the treatment process of a WTP that currently uses Aluminum Sulfate as a coagulant. The results showed that the Aluminium Polychloride coagulant is, on average, 24.3 % more efficient than Aluminum Sulfate, but has a higher cost on the situation evaluated. The Aluminium Polychloride can be used in the raw water of the study, however, the economic viability would need further studies.

Keywords: *water, coagulation, Aluminum Sulfate, Aluminium Polychloride.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição da água na Terra.....	3
Figura 2: Crescimento da cobertura de água e esgoto no Brasil no período de 2008 a 2016. ...	5
Figura 3: Crescimento do abastecimento de água e quantidade de perda de água na distribuição no Brasil no período de 2014 a 2018.....	5
Figura 4: Índice de Desenvolvimento Humano em relação ao índice de acesso ao saneamento.....	6
Figura 5: Disponibilidade regional de água no Brasil em 2017.	7
Figura 6: Internações hospitalares por falta de saneamento básico.	7
Figura 7: Internações hospitalares devido à falta de saneamento básico por faixa etária.	8
Figura 8: Etapas do tratamento de água.	9
Figura 9: Processo de coagulação e floculação.	10
Figura 10: Relação do tamanho do floco com o pH dos coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC.....	11
Figura 11: Foto da calha Parshall na ETA estudada.....	14
Figura 13: Equipamento agitador utilizado no teste de clarificação com os recipientes contendo as amostras de água bruta.....	17
Figura 14: Sedimentação dos flocos formados durante o procedimento de agitação.	19
Figura 15: Variação da turbidez da água bruta no mês de abril de 2020.	21
Figura 16: Relação entre a dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada e a turbidez da água bruta do mês de abril de 2020.	22
Figura 17: Variação da turbidez da água bruta no mês de maio de 2020.	22
Figura 19: Variação da turbidez da água bruta no mês de junho de 2020.	23
Figura 20: Relação entre a dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada e turbidez da água bruta do mês de junho de 2020.	24
Figura 21: Variação da turbidez da água bruta no mês de julho de 2020.	24
Figura 22: Relação entre a dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada e a turbidez da água bruta do mês de julho de 2020.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros água tratada.	13
Tabela 2: Amostras de água bruta coletadas para a realização dos testes.....	15
Tabela 3: Análises realizadas a cada uma hora na ETA estudada.	16
Tabela 4: Análises realizadas a cada duas horas.	16
Tabela 5: Classificação do tamanho do floco.	18
Tabela 6: Classificação da velocidade de sedimentação dos flocos.	18
Tabela 7: Dosagens de Sulfato de Alumínio e PAC utilizadas nos testes.	20
Tabela 8: Médias de turbidez da água bruta e dosagem média de Sulfato de Alumínio nos meses abril, maio, junho e julho de 2020.	25
Tabela 9: Resultados das análises realizadas nas amostras de água bruta coletadas para a realização do estudo.	26
Tabela 10: Resultados do teste de clarificação da amostra 1 utilizando Sulfato de Alumínio como coagulante.....	26
Tabela 11: Resultados do teste de clarificação da amostra 1 utilizando PAC como coagulante.	27
Tabela 12: Resultados do teste de clarificação da amostra 2 utilizando Sulfato de Alumínio como coagulante.....	28
Tabela 13: Resultados do teste de clarificação da amostra 2 utilizando PAC como coagulante.	28
Tabela 14: Resultados do teste de clarificação da amostra 3 utilizando Sulfato de Alumínio como coagulante.....	29
Tabela 15: Resultados do teste de clarificação da amostra 3 utilizando PAC como coagulante.	30
Tabela 16: Consumo de Sulfato de Alumínio e Cal no período de abril a julho de 2020.	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETA	Estação de Tratamento de Água
PAC	Policloreto de Alumínio
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
pH	Potencial Hidrogênico
RPM	Rotação por minuto
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo principal	2
1.2	Objetivos específicos	2
2	Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica	3
2.1	Importância da água	3
2.2	Disponibilidade de água no Brasil	4
2.3	Tratamento de água	8
2.4	Parâmetros de qualidade da água tratada	13
3	Materiais e Métodos	14
3.1	Local e amostragem	14
3.2	Análises realizadas no tratamento da ETA estudada	16
3.3	Teste de Clarificação	17
3.3.1	Experimentos realizados	19
4	Resultados	21
4.1	Avaliação da variação de turbidez e de insumos	21
4.2	Testes de Clarificação	26
4.2.1	Resultados dos testes realizados na amostra 1	26
4.2.2	Resultados dos testes realizados na amostra 2	27
4.2.3	Resultados dos testes realizados na amostra 3	29
4.2.4	Considerações gerais	30
4.3	Análise econômica preliminar	30
4.3.1	Dados mensais de consumo de Sulfato de Alumínio e alcalinizante	31
4.3.2	Custo estimado do consumo de PAC	32
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	33
	REFERÊNCIAS	34

1 Introdução

A água é um recurso natural de extrema importância para todos os seres vivos. Além de fazer parte da composição corporal do ser humano, é responsável pela hidratação, leva nutrientes e sais minerais para as células e elimina substâncias tóxicas através de suor e urina.

Na economia, a água é o elemento base para a fabricação de diversos produtos nos mais variados setores. A geração de energia, produção agropecuária e uso doméstico também dependem dos recursos hídricos. Muitos lugares sofrem com escassez ou má distribuição de água, colocando a saúde da população em risco. Além disso, em algumas regiões ocorre contaminação da água causando doenças na população.

A distribuição de água tratada para a população é realizada pelas Estações de Tratamento de Água (ETAs) dos municípios. A água bruta captada passa por processos físicos e químicos com o objetivo de eliminar as suas impurezas para enquadrar-se nos padrões de qualidade para o consumo humano vigentes.

A primeira etapa realizada no tratamento após a captação da água bruta é a adição do coagulante. No processo de coagulação ocorre a remoção das partículas em suspensão. O Sulfato de Alumínio é um dos coagulantes mais aplicados no tratamento de água.

Existem vários tipos diferentes de coagulantes, além do Sulfato de Alumínio, que podem ser aplicados no tratamento de água, como Sulfato de Alumínio Férrico, Cloreto Férrico, Policloreto de Alumínio (PAC), Tanino e outros. A literatura abordada no presente trabalho mostra que existem muitos estudos comparativos em relação à eficiência dos coagulantes no tratamento de água. Porém, a viabilidade de aplicação de determinado coagulante depende das características da água bruta captada e do sistema de tratamento utilizado. Portanto, é necessária a realização de testes prévios para a aplicação de um coagulante em uma determinada estação de tratamento de água.

Nesse contexto, o presente trabalho visa comparar a utilização de dois coagulantes em amostras de água bruta, através de Testes de Clarificação. O estudo foi realizado em uma estação de tratamento que utiliza o Sulfato de Alumínio como coagulante e será feita uma análise de viabilidade de utilização do PAC.

1.1 Objetivo principal

O objetivo geral do estudo é avaliar a viabilidade técnica de utilização de Policloreto de Alumínio (PAC) no processo de coagulação da água bruta em comparação ao Sulfato de Alumínio, empregado usualmente em uma empresa de tratamento de água de abastecimento.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Avaliar a variação da turbidez da água bruta captada e da dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada em uma empresa de tratamento de água de abastecimento municipal no período de abril a julho de 2020.
- Estudar comparativamente a eficiência dos reagentes Sulfato de Alumínio e Policloreto de Alumínio (PAC) como coagulantes através de testes de clarificação aplicados a amostras de água bruta com diferentes valores de turbidez.
- Comparar os custos de utilização dos coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC, a partir dos resultados obtidos através dos testes de clarificação.

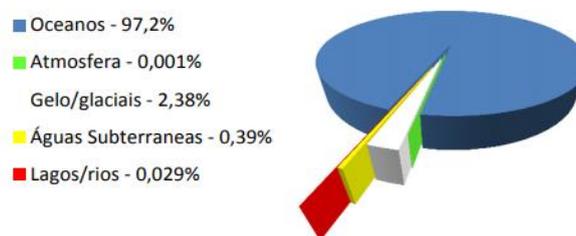
2 Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica

Neste tópico será realizada a revisão bibliográfica de assuntos relacionados ao estudo de viabilidade de aplicação do Policloreto de Alumínio. Os itens abordam a importância da água para a vida humana, a sua disponibilidade no Brasil e os conceitos sobre o funcionamento do tratamento de água em uma estação de abastecimento.

2.1 Importância da água

A água é um dos mais importantes elementos para a vida humana. Entre 60 e 70 % do peso corporal humano é composto por água; além de regular a temperatura interna, é indispensável para todas as funções orgânicas. Por essa razão, a necessidade de acesso à água potável é primordial para toda a população. Menos de 3 % da água do mundo é doce, e a maior parte apresenta-se congelada nas regiões polares ou encontra-se subterrânea, dificultando a sua utilização. A Figura 1 ilustra a distribuição de água no planeta Terra e observa-se que 97,2 % correspondem à água dos oceanos.

Figura 1: Distribuição da água na Terra.



Fonte: DA SILVA, 2014

A utilização da água pelo homem vai muito além das suas necessidades vitais; é fundamental para propósitos socioeconômicos. Suas principais funções são o abastecimento doméstico e industrial, geração de energia, irrigação, navegação, pesca, aquicultura, preservação da fauna e da flora, criação de espécies e transporte de despejos. O uso da água na indústria varia de acordo com as necessidades do processo. Pode ser utilizada na incorporação de produtos, limpeza, sistemas de refrigeração e geração de vapor. Porém, os resíduos industriais são os principais causadores da poluição hídrica (DE SOUZA, 2014).

Saneamento é um conjunto de medidas com o objetivo de prevenir doenças e melhorar a qualidade de vida da população preservando as condições do meio ambiente. No Brasil, a

Constituição e a Lei nº. 11.445/2007 definem que o saneamento básico é um direito da população. O conjunto engloba a infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, limpeza e drenagem urbana, esgotamento sanitário, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

Segundo o Instituto Trata Brasil (2012), para um país ser denominado desenvolvido, o saneamento básico é um fator essencial, pois leva à melhoria da qualidade de vida das pessoas. No mundo, 633 milhões de pessoas continuam sem acesso à uma fonte de água potável. Sendo que 91 % da população mundial tem acesso à água potável, mas estima-se que mais de 80 % da água utilizada não seja coletada e nem tratada. Além disso, calcula-se que aproximadamente 1,8 bilhões de pessoas consomem água contaminada por coliformes fecais. Porém, o acesso à água potável vem crescendo no decorrer dos anos. De 1990 a 2015, o número de pessoas com acesso à água aumentou em 65 %. Ainda assim, é previsto que 40 % da população mundial terá pouco acesso à água em 2050 (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

2.2 Disponibilidade de água no Brasil

Com o aumento da população mundial, conseqüentemente, aumentou-se a necessidade de alimentos e produtos industrializados. Essa demanda necessita também de maior utilização de recursos hídricos e outros recursos naturais (DA SILVA, 2014). No Brasil, o consumo médio de água é de 154,9 litros por dia por habitante. Sendo que o Rio de Janeiro é o estado que consome mais água no país, aproximadamente 254,9 litros por habitante (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

O crescimento do mercado brasileiro de saneamento de água tem ocorrido lentamente, em comparação com outros mercados emergentes. Em 2013, foi assinado o Plano Nacional de Saneamento Básico que visa o acesso universal de água potável até o ano de 2023 (SUDRÉ, 2020). A Figura 2 ilustra o crescimento do saneamento no Brasil durante o período de 2008 a 2016. Segundo números recentes do SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento), 16 % da população brasileira, que corresponde a aproximadamente 35 milhões de pessoas, não têm acesso à água tratada (AEGEA, 2016).

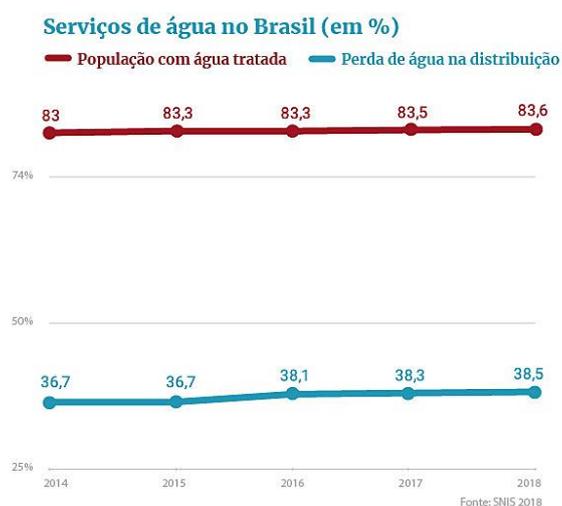
Figura 2: Crescimento da cobertura de água e esgoto no Brasil no período de 2008 a 2016.



Fonte: AEGEA, 2016

Na Figura 3, é possível visualizar que não houve um crescimento considerável da cobertura de saneamento no Brasil no período de 2014 a 2018. Além disso, observa-se a elevada perda de água na distribuição que ocorre devido aos vazamentos na rede ou às ligações clandestinas.

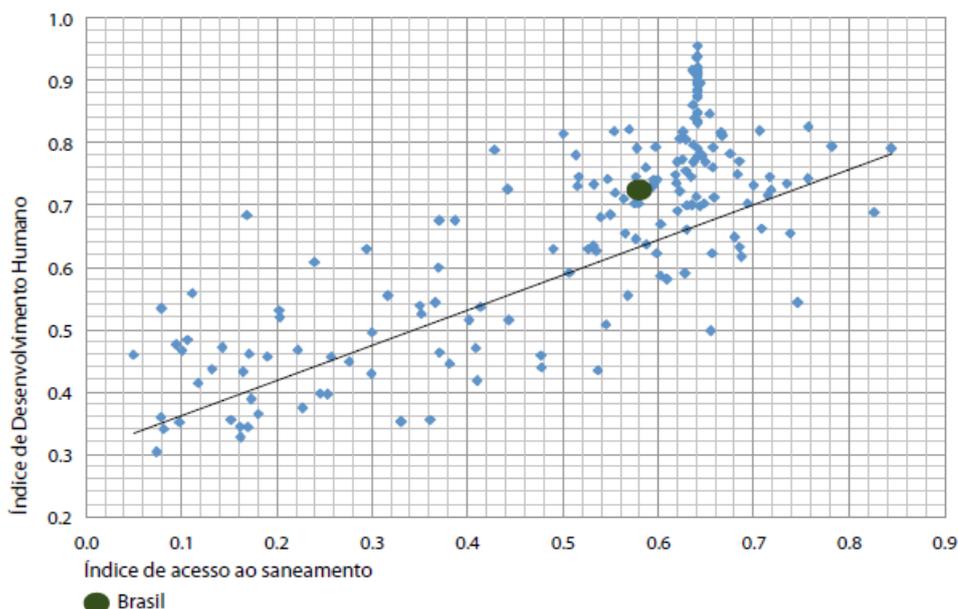
Figura 3: Crescimento do abastecimento de água e quantidade de perda de água na distribuição no Brasil no período de 2014 a 2018.



Fonte: SUDRÉ, 2020

Em uma comparação a nível mundial, o Brasil está atrasado no setor de saneamento básico. Em 2011, o país ocupava a 112ª posição no ranking de saneamento entre 200 países. Essa situação possui impacto direto nos indicadores de saúde e na economia do país (CEBDS; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2014). Na Figura 4, é possível observar que o índice de acesso ao saneamento está diretamente relacionado com o IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) do país.

Figura 4: Índice de Desenvolvimento Humano em relação ao índice de acesso ao saneamento.



Fonte: CEBDS; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2014

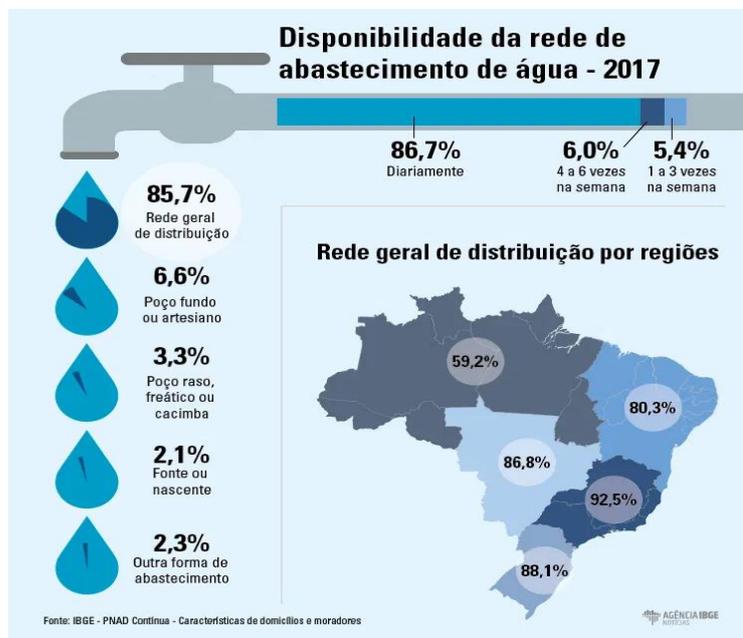
A maioria da população brasileira reside nas regiões sudeste e nordeste. Historicamente, são as regiões que possuem maiores registros de escassez de água e períodos de seca. A utilização dos recursos hídricos da Amazônia é inviável devido aos elevados custos de transporte e decorrentes impactos ambientais, apesar do elevado volume de água na região (EOS, 2019).

A escassez da água não afeta somente o acesso à água tratada nas residências da população, mas igualmente a indústria e a agricultura. Esses setores sofrem um enorme impacto comprometendo a situação econômica do país. Além disso, pode comprometer o funcionamento de hidrelétricas, podendo causar até racionamento de energia (EOS, 2019).

O Brasil possui 12 % dos recursos hídricos do planeta, porém ainda possui áreas com dificuldades de acesso à água. A poluição, regiões desérticas e falta de chuvas são alguns dos motivos que podem levar ao desabastecimento em algumas regiões do país. O acesso ao abastecimento de água nas regiões norte e nordeste do Brasil ainda passa por dificuldades, permanecendo abaixo da média nacional também em relação ao esgotamento sanitário e coleta de lixo. A região norte possui apenas 59,2 % dos domicílios ligados à rede de distribuição e o nordeste possui 80,3 %, porém o acesso diário é de 66,0 % nesta região (AGROEMDIA,

2018). Na Figura 5, é possível observar a situação geral no país em relação à região demográfica.

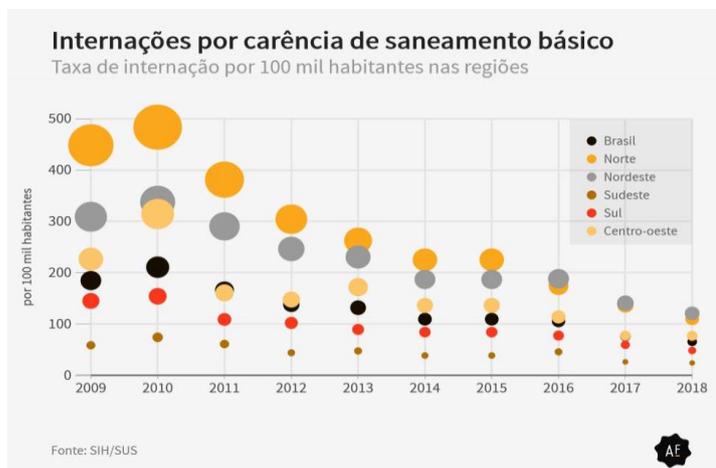
Figura 5: Disponibilidade regional de água no Brasil em 2017.



Fonte: AGROEMDIA, 2018

A saúde das pessoas é diretamente impactada pela falta de saneamento básico. Na Figura 6, é possível verificar que houve uma redução no número de internações no país no decorrer dos anos. As maiores taxas correspondem às regiões que possuem menor disponibilidade de abastecimento de água, ou seja, as regiões do norte e nordeste brasileiro. (CUNHA; FÁVERO, 2019).

Figura 6: Internações hospitalares por falta de saneamento básico.

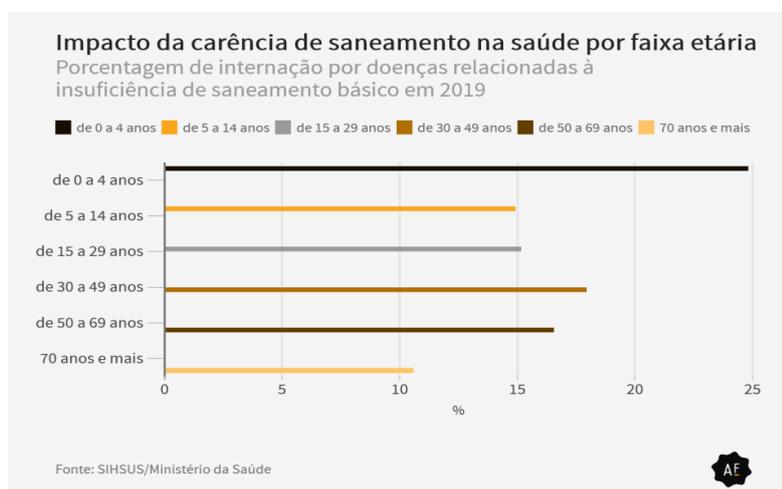


Fonte: CUNHA; FÁVERO, 2019

Segundo dados da UNICEF, 297 mil crianças menores de 5 anos morrem, no mundo, devido à diarreia associada ao saneamento inadequado, por ano. A água contaminada também pode transmitir doenças como cólera, disenteria, hepatite A e febre tifoide. No Brasil, em 2018, foram registradas mais de 230 mil internações por doença de veiculação hídrica e 2180 óbitos. Além disso, no mesmo ano, foram gastos 90 milhões com internações no SUS (UNICEF, 2019).

As doenças relacionadas à falta de saneamento básico, no Brasil, afetam mais crianças de 0 a 4 anos, conforme é possível observar na Figura 7. Já as pessoas a partir de 70 anos são as menos afetadas.

Figura 7: Internações hospitalares devido à falta de saneamento básico por faixa etária.



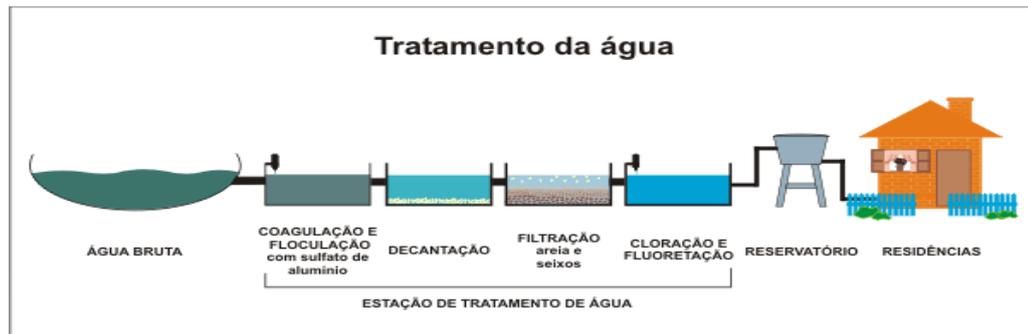
Fonte: CUNHA; FÁVERO, 2019

O saneamento básico possui uma grande influência no aproveitamento escolar dos jovens brasileiros. Uma análise realizada com informações da Pnad de 2012 identificou que alunos sem acesso à coleta de esgoto tem um atraso maior do que estudantes com a mesma condição econômica, no entanto, que moram em locais com coleta de esgoto. Porém, a falta de acesso à água tratada possui um impacto ainda maior. A partir dos dados do estudo, estima-se que se os estudantes sem acesso a esses serviços, caso o adquirissem, reduziriam o atraso escolar em 6,8 % (CEBDS; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2014).

2.3 Tratamento de água

A água tratada utilizada para o consumo humano e industrial passa por várias etapas realizadas nas estações de tratamento de água e abastecimento. As etapas podem ser visualizadas na Figura 8.

Figura 8: Etapas do tratamento de água.



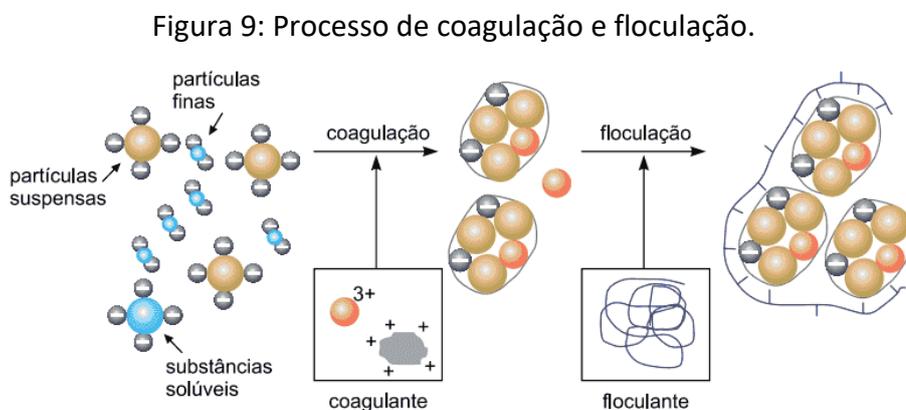
Fonte: SANEP, 2020

A primeira etapa consiste na captação da água que é retirada de mananciais ou reservatórios hídricos, passando por um sistema de gradeamento que impede a passagem de sólidos. A água é então bombeada para a estação de tratamento e, em seguida, é adicionado o coagulante, ocorrendo a etapa de coagulação. A etapa a seguir é a de floculação em que ocorre a formação dos flocos. Após o processo de coagulação e floculação, a água passa pelo processo de decantação para sedimentação dos sólidos. A água decantada é encaminhada para os filtros e, por fim, é realizada a adição de cloro e flúor. A água é armazenada em reservatórios para manter o abastecimento e atender demandas excessivas (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

A etapa de coagulação é uma das etapas mais importantes do processo de tratamento de água. Esse processo envolve a aplicação de produtos químicos para a precipitação dos compostos em solução e desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas que não poderiam ser removidas através de outros processos. As etapas de coagulação e floculação são importantes para que as outras etapas subsequentes ocorram de maneira eficiente (decantação e filtração). Devido à grande importância de um processo de coagulação eficiente, o desenvolvimento de novos agentes coagulantes constitui grande avanço na tecnologia de tratamento de água (RICHTER, 2009).

A coagulação é a fase do processo em que constituintes de uma determinada amostra de água são desestabilizados e a floculação é a fase em que as partículas desestabilizadas, ou as partículas formadas durante a desestabilização, são induzidas a se acumular em agregados. Os critérios de viabilidade e condições ótimas de coagulação e floculação aplicadas ao tratamento de água dependem dos constituintes da água (BRATBY, 1980).

No processo de coagulação ocorrem reações de hidrólise e de polimerização entre o coagulante e as partículas presentes na água. Os coagulantes liberam espécies químicas com alta carga elétrica e de sinal contrário ao das partículas presentes na água bruta. Dessa forma, ocorre a redução das forças eletrostáticas de repulsão que mantêm separadas as partículas em suspensão. Consequentemente, eliminando o impedimento da aproximação das diversas partículas presentes, conforme pode ser visualizado na Figura 9. As reações químicas sofrem influência do pH, das espécies iônicas presentes na água, do tipo e da concentração dos coloides, do coagulante utilizado e sua concentração e das condições de aplicação do coagulante (UNICAMP, 2001).



Fonte: KURITA, 1999

A eficiência do processo de coagulação-floculação depende das variáveis: tipo de coagulante usado, dosagem de coagulante, pH, tipo e dosagem de aditivos químicos como polieletrólitos, sequência de adição de produtos químicos e intervalo de tempo entre os pontos de dosagem, intensidade e duração da mistura, tipo de dispositivo para a mistura, gradiente de velocidade aplicado durante a fase de floculação, tempo de retenção do floculador, tipo de dispositivo usado para agitação e geometria do floculador (BRATBY, 1980).

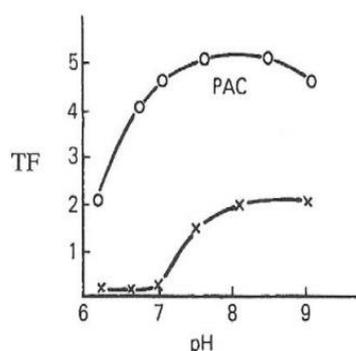
Os coagulantes mais utilizados nas estações de tratamento são o Sulfato de Alumínio e o Cloreto Férrico. O Sulfato de Alumínio possui fórmula química $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$, onde “n” corresponde ao número de moléculas de água de cristalização (aproximadamente de 14 a 18). O composto possui massa molecular de $342,16 \text{ g mol}^{-1}$ quando anidro, decompõe-se na temperatura de $600 \text{ }^\circ\text{C}$ com desprendimento de anidrido sulfúrico. É produzido a partir do hidrato de alumínio, com teor de água suficiente para não ocorrer cristalização (RICHTER, 2009).

Um dos grandes desafios ocasionados pelo tratamento de água é o destino final do lodo gerado pelo processo de tratamento. O lodo acumulado nos decantadores possui elevada concentração de alumínio e, em muitas estações de tratamento de água, esse resíduo retorna ao local de captação da água bruta. Segundo Piantá (2008), há evidências que em locais onde as fontes de água possuíam maiores teores de alumínio ocorriam mais casos da doença de Alzheimer. Além disso, o alumínio também é considerado tóxico para peixes e invertebrados (PIANTÁ, 2008).

O (PAC) Policloreto de Alumínio também é um coagulante utilizado em estações de tratamento de água. É um coagulante inorgânico a base de alumínio e um dos mais eficientes, principalmente quando comparado ao Sulfato de Alumínio e ao Cloreto Férrico. É um composto poli-nuclear de íons de alumínio polimerizados que durante a hidrólise libera uma quantidade de ácido menor do que a liberada pelos coagulantes tradicionais, provocando menor variação de pH e, conseqüentemente, menor consumo de neutralizantes (MEMPHIS, 2020). Como vantagens da sua utilização, destacam-se a redução de dosagem de produtos químicos, seu elevado grau de ionização, possibilidade de atua em uma faixa ampla de pH, redução de cor e turbidez da água tratada, aumento do tamanho e peso dos flocos, redução de custo operacional e outros benefícios (CONSTANTINO; YAMAMURA, 2009).

Na Figura 10, é possível observar o tamanho dos flocos (TF) formados com a utilização do PAC e do sulfato de alumínio em função do pH. O PAC forma flocos maiores do que o Sulfato de Alumínio para as mesmas faixas de pH, aumentando a velocidade de sedimentação dos flocos (CONSTANTINO; YAMAMURA, 2009).

Figura 10: Relação do tamanho do floco com o pH dos coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC.



Fonte: CONSTANTINO; YAMAMURA, 2009

Em algumas estações de tratamento, às vezes é necessária a utilização de um agente de floculação para auxiliar no processo de formação dos flocos. Nesse processo, o agente floculante auxilia na união de partículas coaguladas ou desestabilizadas para a formação de maiores flocos possibilitando a separação por sedimentação (LEGNER, 2013). Além disso, aceleram a taxa de floculação e fortalecem os flocos formados. Nesse processo, a água deve ser submetida à agitação mecânica para possibilitar a agregação dos flocos com os sólidos em suspensão. Na saída dos floculadores, os flocos devem ter tamanho e densidade adequados ao processo de clarificação por sedimentação (BRATBY, 1980).

A sedimentação é o processo físico que separa as partículas sólidas em suspensão da água utilizando as forças gravitacionais e a diferença de massa específica. Os flocos de sujeira mais pesados ficam depositados no fundo dos tanques, separando-se da água. Esse processo de sedimentação é denominado de decantação e é realizado em tanques durante o tempo mínimo necessário. Após essa etapa é realizada a etapa de filtração, que consiste em um processo físico-químico para separação de impurezas em suspensão na água, através da passagem por um meio poroso. O meio pode ser composto de diversos materiais granulares, como areia, carvão ativado e antracito. Por fim, após o processo de filtração, são adicionados os produtos químicos necessários para garantir a qualidade da água tratada (LEGNER, 2013).

De acordo com Constantino e Yakamura (2009), a utilização de PAC em uma estação de tratamento de água que anteriormente utilizava Sulfato de Alumínio, trouxe vantagens. O custo com coagulante aumentou, porém, melhoraram os resultados em relação à qualidade da água: foi reduzida a dosagem de coagulante utilizada, aumentando a autonomia dos reservatórios, houve redução no consumo de cal e minimização do custo operacional. Além disso, a utilização do PAC tornou possível o aumento de tempo de carreira dos filtros (aumentando o intervalo de tempo de lavagem) e aumentou-se o intervalo de tempo de lavagem dos decantadores.

Segundo Lemos, Filho e Cavallini (2020) que desenvolveram um estudo comparativo com Sulfato de Alumínio Férrico e PAC, através de *Jar Test*, em relação aos custos, o Sulfato de Alumínio Férrico é mais vantajoso. Entretanto, os resultados com PAC foram melhores em relação à remoção de cor e turbidez. Além do mais, a dosagem necessária de PAC foi menor do que a de Sulfato de Alumínio Férrico.

Conforme Padilha (2011), testes realizados com Sulfato de Alumínio, Cloreto Férrico e PAC obtiveram melhores resultados com o PAC. Ensaio realizado através de *Jar Test* demonstraram uma maior eficiência com a utilização de PAC, este, alcançou menor valor de turbidez remanescente com uma dosagem menor de coagulante. Da Silva (2014) também realizou um estudo utilizando *Jar Test* comparando os coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC. Igualmente, os resultados obtidos com o PAC foram melhores do que com Sulfato de Alumínio, e além do mais, foram obtidos resultados mais baixos de alumínio residual.

2.4 Parâmetros de qualidade da água tratada

A água tratada pelas estações de tratamento deve atender aos parâmetros do Anexo XX da Portaria de Consolidação 05/2017 do Ministério da Saúde. Alguns dos parâmetros analisados são pH, turbidez e cor.

O pH corresponde ao grau de acidez ou basicidade da água. O valor do pH será tanto menor quanto maior for a quantidade de coagulante adicionado à água. A turbidez da água é causada pela presença de partículas em suspensão ou em estado coloidal que absorvem e refletem a luz incidente. Quanto melhor for o tratamento aplicado à água, menor será a turbidez residual. Já a cor da água potável é considerada um fator estético para aceitação do consumidor final. A ocorrência de cor é devida a existência de partículas coloridas de substâncias em solução (KUHN, 2018).

Na Tabela 1 encontram-se os valores dos parâmetros exigidos de pH, turbidez e cor da água tratada. O valor máximo permitido de turbidez na saída dos filtros da estação de tratamento é de 0,5 NTU.

Tabela 1: Parâmetros água tratada.

Parâmetro	Valor exigido
pH	6,0 – 9,5
Turbidez (NTU)	5,0
Cor (mg/L Pt-Co)	15

Os parâmetros da Tabela 1 são exigidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação 05/2017 do Ministério da Saúde e devem ser monitorados pelas estações de tratamento de água.

3 Materiais e Métodos

O tópico aborda a metodologia utilizada para realização do estudo comparativo entre os coagulantes Sulfato de Alumínio e Policloreto de Alumínio.

3.1 Local e amostragem

O estudo foi realizado em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) localizada no estado do Rio Grande do Sul. A unidade opera 24 horas por dia, com uma vazão média de 500 L/s e abastece quatro cidades, totalizando uma população de 175.908 habitantes.

A água bruta é captada no Rio dos Sinos que recebe despejos industriais e esgoto doméstico. A vazão de água bruta na entrada da ETA é medida através de uma régua localizada na Calha Parshall. Logo no início da calha, ocorre aplicação de gás cloro para eliminação de agentes patogênicos. E em seguida é adicionado o coagulante Sulfato de Alumínio, no ponto de indicação circulado na Figura 11.

Figura 11: Foto da calha Parshall na ETA estudada.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

Foram coletadas 3 amostras de 20 litros cada no ponto antes do local de aplicação do coagulante e em seguida estudadas. As coletas foram realizadas em 3 dias diferentes para ser possível a realização do estudo com diferentes valores de turbidez da água bruta. Na Tabela 2, encontram-se os valores de turbidez das amostras coletadas e as dosagens de Sulfato de Alumínio que estavam sendo aplicadas nas datas em que foram coletadas

Tabela 2: Amostras de água bruta coletadas para a realização dos testes.

Data	Turbidez água bruta (NTU)	Dosagem de Sulfato de Alumínio (ppm)
21/06/2020	21	25
03/07/2020	64	34
13/07/2020	37	28

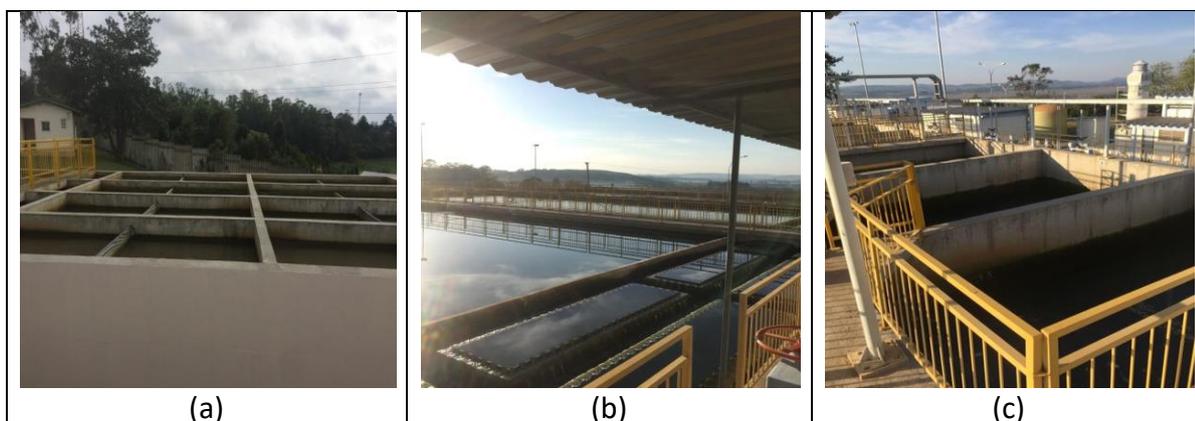
Para o estudo foram coletadas amostras com turbidez 21, 37 e 64 NTU. Considerando a amostra de 21 NTU de turbidez um valor de turbidez baixo, a amostra de 37 NTU médio e a amostra com turbidez de 64 NTU alto.

Ocasionalmente, na ETA é utilizado polieletrólito como auxiliar no processo de floculação, o qual é dosado diretamente nos floculadores. A utilização torna-se necessária caso a etapa de floculação não esteja ocorrendo de maneira eficiente. A Figura 12 (a) mostra onde ocorre a floculação.

Devido à utilização do coagulante Sulfato de Alumínio no tratamento, dependendo da dosagem necessária, torna-se indispensável a dosagem de um alcalinizante para correção do pH. A dosagem de cal ocorre nos 3 decantadores da ETA, Figura 12 (b), ou em casos de alta dosagem de coagulante, também deve ser realizada no início da Calha Parshall.

Após a água passar pelos filtros, Figura 12 (c), ela é direcionada para uma câmara de mistura em que são adicionados ácido fluossilícico, para fluoretação; orto polifosfato (auxilia na retirada de elementos incrustados na tubulação) e gás cloro. Por fim, a água já tratada e dentro dos parâmetros de garantia de qualidade conforme a Lei nº 9.433 (Anexo XX da Portaria de Consolidação número 5 de 28/09/2017 do Ministério da Saúde) é enviada para dois reservatórios que distribuem a água para as cidades que a ETA abastece.

Figura 12: Dispositivos utilizados na ETA estudada para o tratamento de água; (a) Floculador; (b) Decantadores; (c) Filtros.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

Para o controle dos parâmetros da água bruta e a garantia de qualidade da água tratada são realizadas análises de hora em hora, simulando o processo de tratamento. Os resultados das análises devem corresponder aos parâmetros exigidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação número 5 de 28/09/2017 do Ministério da Saúde da Lei nº. 9.433.

3.2 Análises realizadas no tratamento da ETA estudada

Os procedimentos de controle da eficiência do processo na ETA envolvem análises que são realizadas de hora em hora e outras que são realizadas a cada duas horas. As análises realizadas a cada uma hora encontram-se descritas na Tabela 3 e as realizadas a cada duas horas, na Tabela 4. As análises realizadas seguem os procedimentos de acordo com Kuhn (2018).

Tabela 3: Análises realizadas a cada uma hora na ETA estudada.

Amostra	Análises realizadas
Água decantada	Turbidez e cloro livre.
Água floculada	Velocidade de sedimentação do floco, tamanho do floco, turbidez após filtração, pH e residual de alumínio.

Tabela 4: Análises realizadas a cada duas horas.

Amostra	Análises realizadas
Água bruta	pH, turbidez e odor.
Água tratada	pH, turbidez, cor, cloro livre, flúor, odor e gosto.
Água filtrada	Turbidez e alumínio residual.

Além das análises realizadas durante o processo de tratamento, são realizadas outras análises para cumprir com os parâmetros exigidos pelo anexo XX da Portaria de Consolidação número 5 de 28/09/2017 do Ministério da Saúde. Nas amostras de água bruta também são analisados oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, teor de ferro, teor de manganês, dureza, matéria orgânica, alcalinidade e cor. Assim como, na amostra de água tratada são analisados oxigênio dissolvido, teor de ferro, teor de manganês, dureza, matéria orgânica e alcalinidade. Na amostra de água filtrada também é realizada a análise de matéria orgânica.

Assim como são realizadas análises na água tratada após passar pela câmara de mistura, a ETA também realiza análises nas amostras coletadas ao longo da rede de distribuição. Essas coletas são exigidas para garantir que a água está chegando com qualidade ao consumidor final. Nessas amostras além das análises físico-químicas, são realizadas análises bacteriológicas.

3.3 Teste de Clarificação

Na rotina de trabalho da ETA, também é realizado semanalmente o teste de clarificação (*Jar Test*). O teste visa avaliar a melhor dosagem de coagulante que deve ser utilizada no tratamento, ou podem ser avaliados outros produtos. Por isso, o teste de clarificação foi utilizado como recurso neste trabalho para serem avaliadas as dosagens de Sulfato de Alumínio e PAC nas amostras de água bruta. O equipamento agitador utilizado para o teste, da marca Ethik (Figura 13), foi utilizado para simular as etapas de coagulação, floculação e decantação do tratamento de água.

Figura 13: Equipamento agitador utilizado no teste de clarificação com os recipientes contendo as amostras de água bruta.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

As amostras de água bruta foram colocadas em 6 recipientes de vidro com 1 litro de amostra e então adicionado a quantidade pré-determinada de coagulante. O equipamento possui hastes metálicas que promoveram a agitação. O ensaio foi programado através de um *display* contido no equipamento. Primeiramente, foi realizada uma rotação intermediária de 70-80 RPM durante 3 minutos, em seguida ocorreu uma redução na rotação para 50-60 RPM durante 11 minutos (tempo de formação do coágulo) e, por fim, o agitador reduziu a velocidade gradativamente até parar totalmente.

Após o término do processo de agitação foi necessário levantar as hastes de agitação e aguardar 10 minutos para a sedimentação dos flocos. Com relação ao aspecto do floco foi observado o seu tamanho e pode ser classificado como: Não Floculou (N), Miúdo (M), Regular (R), Bom (B) e Ótimo (O), de acordo com a Tabela 5. Os flocos não possuem tamanho regular e devem ser classificados de acordo com o tamanho predominante.

Tabela 5: Classificação do tamanho do floco.

Diâmetro do floco (mm)	Classificação
-	Não Floculou (N)
<1	Miúdo (M)
1 -2	Regular (R)
3	Bom (B)
>3	Ótimo (O)

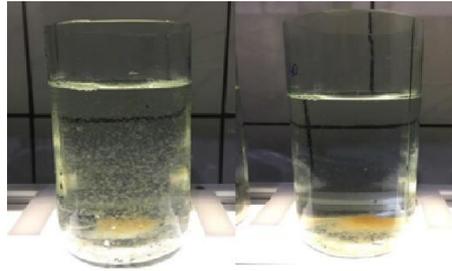
Com relação à velocidade de sedimentação podemos classificar como: Não Sedimentou (N), Lenta (L), Regular (R), Boa (B) e Ótima (O), de acordo com a Tabela 6. A velocidade é medida através da distância percorrida pela maioria dos flocos em 10 segundos.

Tabela 6: Classificação da velocidade de sedimentação dos flocos.

cm/10 s	Classificação
-	Não Sedimentou (N)
<1	Lenta (L)
1-2	Regular (R)
3	Boa (B)
>3	Ótima (O)

Na Figura 14, é possível visualizar o processo de sedimentação dos flocos após o procedimento de agitação.

Figura 14: Sedimentação dos flocos formados durante o procedimento de agitação.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

As análises realizadas nos testes de clarificação neste estudo para comparar a eficiência dos coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC foram: pH, turbidez, cor e alcalinidade. Para determinação do pH foi utilizado um pHmetro da marca Digimed modelo DM-2P. O eletrodo e o termopar foram imersos diretamente na amostra para a realização da leitura.

A análise de pH foi realizada com uma amostra de água retirada do recipiente e as demais foram realizadas após filtração com um algodão em um funil. O fluxo de filtração foi ajustado para aproximadamente uma gota por segundo e os primeiros 50 mL foram desprezados.

Foi utilizado o turbidímetro 2100Q da marca Hach para a determinação da turbidez das amostras. A amostra foi colocada em uma cubeta de vidro e o resultado foi expresso em NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez). As análises de cor foram realizadas no fotômetro Nova 60A e os resultados foram expressos em mg/L Pt-Co (escala platina-cobalto) ou U.C. (Unidade de Cor).

A alcalinidade é a indicação de substâncias básicas presentes na água e é uma propriedade que permite a neutralização ou a redução de suas características ácidas. O método utilizado foi o titulométrico com ácido sulfúrico e indicador metilorange. O resultado foi expresso em mg/L de CaCO_3 .

3.3.1 Experimentos realizados

A água bruta captada no Rio dos Sinos sofre grandes mudanças em relação às suas características devido a fenômenos meteorológicos, características dos efluentes recebidos e o nível de água do rio. Devido a isso, as dosagens dos produtos adicionados à água também apresentam grandes variações e devem ser ajustados conforme a necessidade do tratamento.

O teste de clarificação foi realizado em 3 dias diferentes com 3 amostras com diferentes valores de turbidez de água bruta. Com cada amostra foram elaborados testes de clarificação com 3 dosagens diferentes de cada coagulante em triplicata. A amostra de baixa turbidez (21 NTU) foi coletada no dia 21/06/2020, média turbidez (37 NTU) em 13/07/2020 e de alta turbidez (64 NTU) em 03/07/2020.

As dosagens de Sulfato de Alumínio utilizadas foram definidas a partir de dados provenientes do tratamento realizado na ETA durante o período que a água foi coletada. Para a definição da dosagem de PAC foi realizado um rápido pré-teste observando-se a floculação para avaliar quais as dosagens que poderiam ser utilizadas no teste com o objetivo de serem testadas dosagens mais baixas do que as de Sulfato de Alumínio. As dosagens de Sulfato de Alumínio e PAC utilizadas encontram-se na Tabela 7. Para cada amostra de água bruta foram utilizados 3 valores diferentes de dosagem de Sulfato de Alumínio e de PAC. Para cada dosagem realizaram-se 3 testes, somando ao final 54 amostras.

Tabela 7: Dosagens de Sulfato de Alumínio e PAC utilizadas nos testes.

Amostra	Turbidez água bruta (NTU)	Dosagens de Sulfato de Alumínio (ppm)	Dosagens de PAC (ppm)
1	21	22, 25 e 28	16, 19 e 22
2	37	25, 28 e 31	20, 23 e 26
3	64	31, 34 e 37	23, 25 e 28

A solução de Sulfato de Alumínio utilizada no tratamento possuiu concentração de 650 g/L. Para a realização do teste foi preparada uma solução 1 % através de diluição. A amostra de PAC utilizada nos testes possuiu concentração de 435 g/L e foram realizadas diluições para obtenção de uma solução a 1 %.

4 Resultados

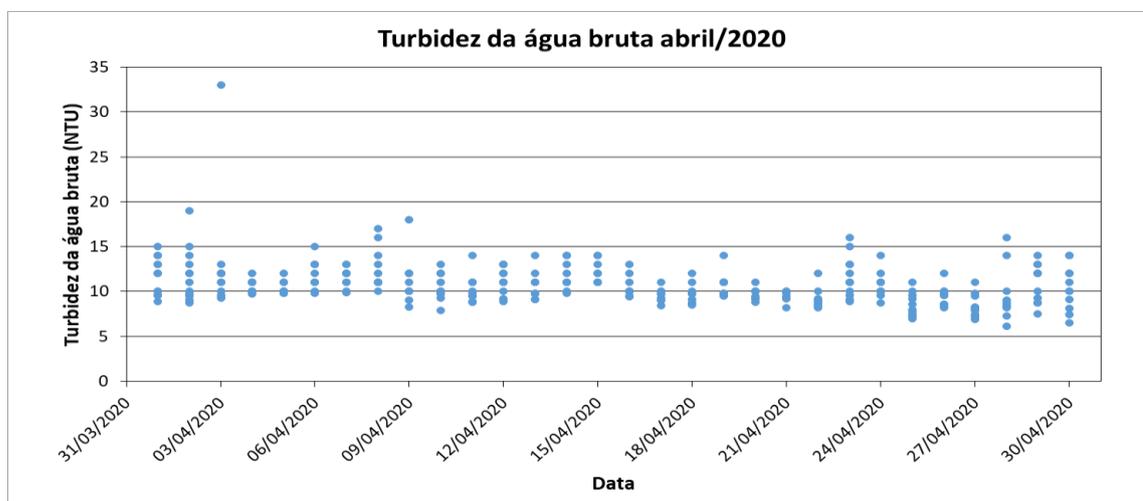
O tópico apresenta os resultados obtidos através de coleta de dados e análises realizadas nas amostras de água bruta coletadas. Inicialmente, foi realizado um diagnóstico dos dados referentes à turbidez da água bruta nos meses de abril a julho de 2020 com as respectivas dosagens de Sulfato de Alumínio utilizadas na ETA estudada. A seguir, encontram-se os resultados dos testes de clarificação realizados nas amostras com Sulfato de Alumínio e PAC. E por fim, foi realizada uma análise econômica relativa aos custos dos coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC.

4.1 Avaliação da variação de turbidez e de insumos

Foi realizado um levantamento dos dados de turbidez da água bruta ao longo dos meses abril, maio, junho e julho de 2020 e as dosagens correspondentes de Sulfato de Alumínio utilizadas. Nos gráficos, é possível observar a variação das características da água no período. Além disso, é importante ressaltar que a dosagem adequada de coagulante não depende somente da turbidez da água bruta, mas também de outras características, como matéria orgânica presente na água, alcalinidade e pH.

Na Figura 15 é possível visualizar os dados de turbidez da água bruta referentes ao mês de abril de 2020. A média dos resultados foi de 10,65 NTU, resultado relativamente baixo de turbidez.

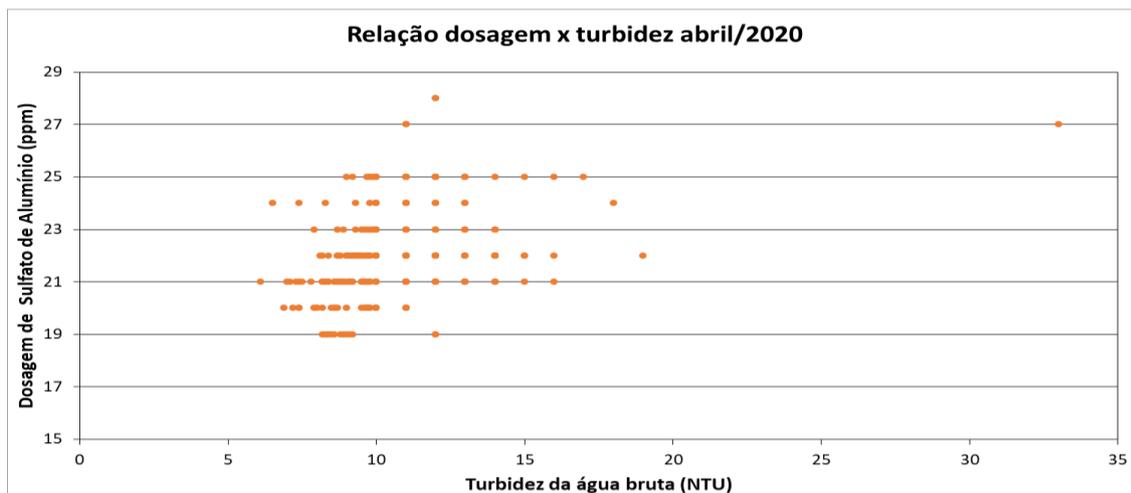
Figura 15: Variação da turbidez da água bruta no mês de abril de 2020.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

Na Figura 16, encontram-se os resultados de turbidez com a respectiva dosagem de Sulfato de Alumínio que foi utilizada no tratamento. A concentração média de Sulfato de Alumínio utilizada foi de 22,25 ppm, e observa-se que os valores de turbidez não apresentaram grande variação no mês de abril.

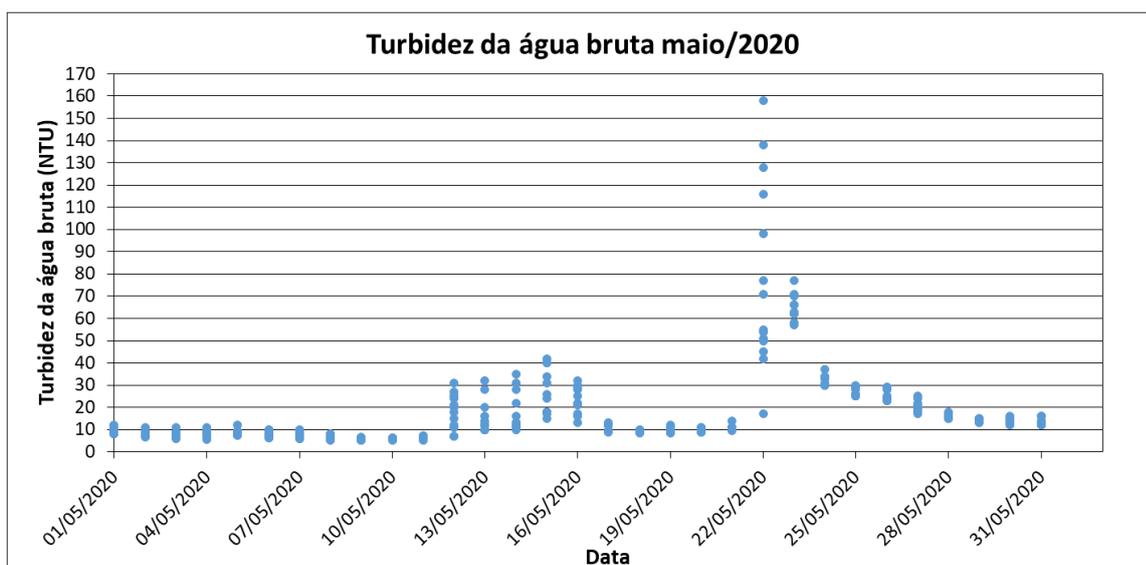
Figura 16: Relação entre a dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada e a turbidez da água bruta do mês de abril de 2020.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

Os dados de turbidez da água bruta do mês de maio encontram-se na Figura 17. A média de turbidez da água bruta foi de 18,37 NTU.

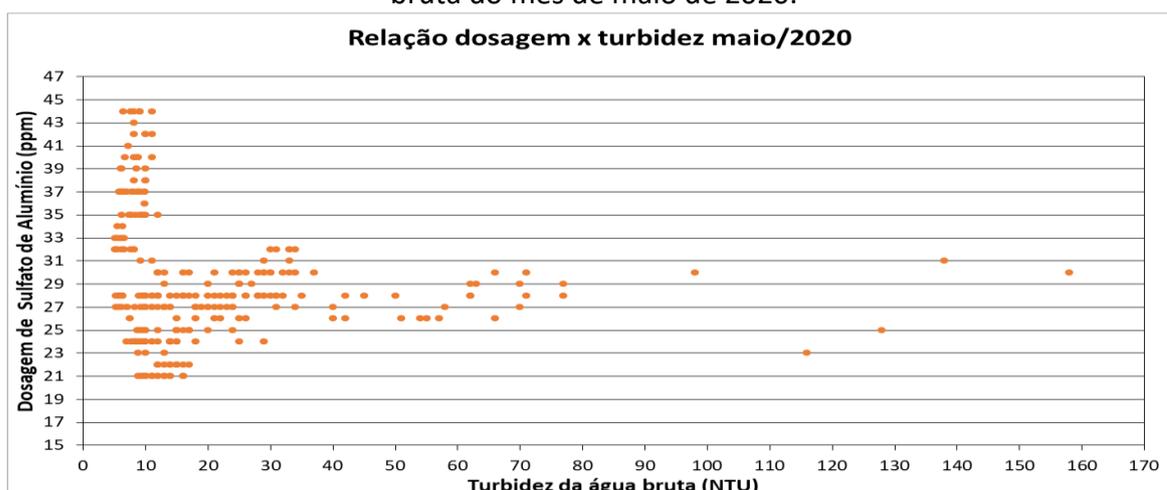
Figura 17: Variação da turbidez da água bruta no mês de maio de 2020.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

As dosagens de Sulfato de Alumínio utilizadas no mês de maio podem ser visualizadas na Figura 18, onde a concentração média de dosagem utilizada em maio foi de 28,67 ppm. Os resultados de turbidez foram maiores do que no mês anterior, e conseqüentemente, as dosagens também foram superiores. Ocorreram grandes variações nos resultados de turbidez da água bruta, chegando a aproximadamente 160 NTU.

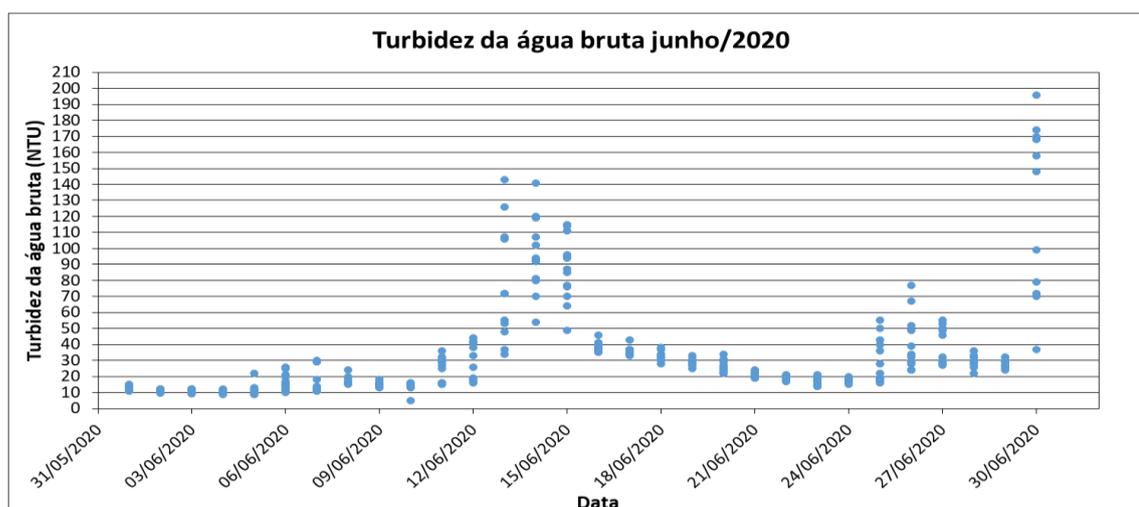
Figura 18: Relação entre a dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada e a turbidez da água bruta do mês de maio de 2020.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

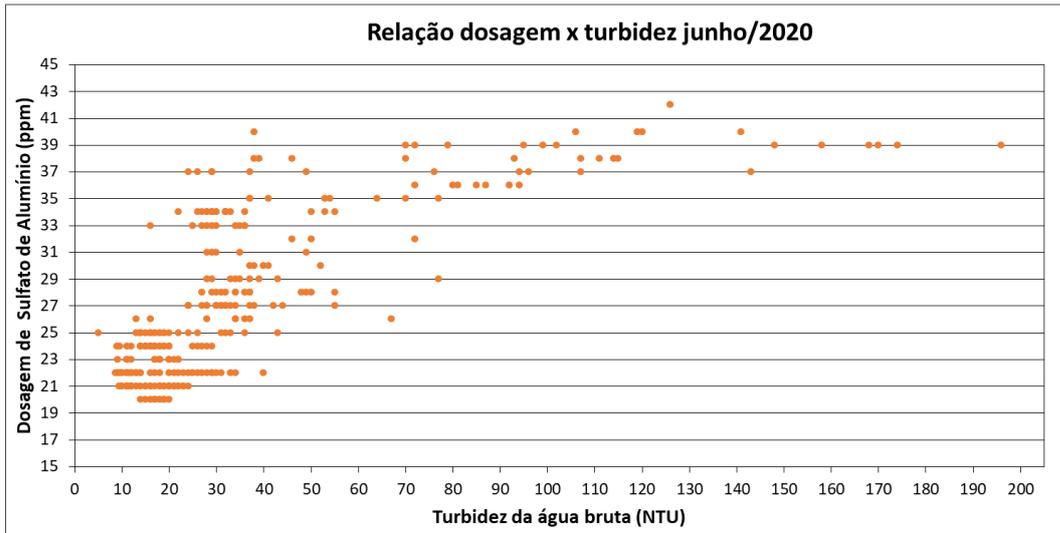
No mês de junho, a média dos resultados de turbidez foi mais alta do que nos meses de abril e maio, 36,67 NTU, conforme pode ser verificado na Figura 19.

Figura 19: Variação da turbidez da água bruta no mês de junho de 2020.



A concentração média do mês de junho foi de 27,29 ppm, os valores das dosagens utilizadas encontram-se na Figura 20. É possível observar que a média de turbidez foi superior ao mês anterior, porém a dosagem média foi praticamente igual, isso ocorre devido às outras características da água bruta que exigiram uma dosagem maior de coagulante.

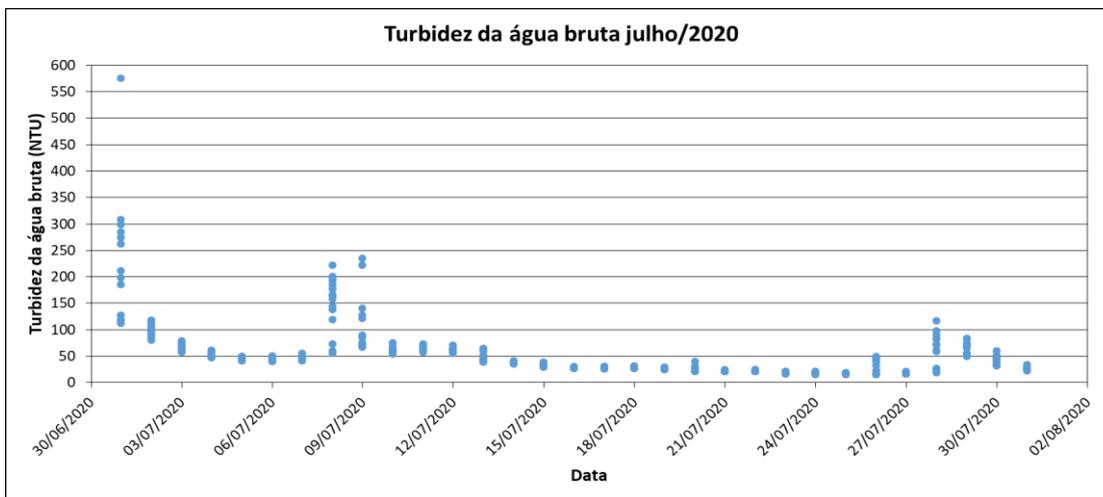
Figura 20: Relação entre a dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada e turbidez da água bruta do mês de junho de 2020.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

No mês de julho, a média de turbidez da água bruta chegou a valores mais altos do que nos outros meses, 55,74 NTU. Na Figura 21, é possível visualizar os valores de turbidez do mês de julho.

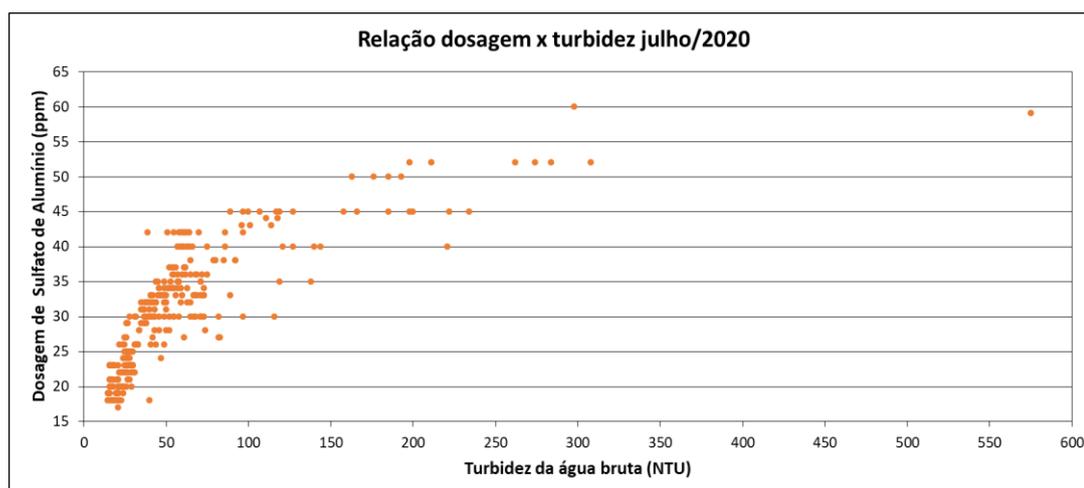
Figura 21: Variação da turbidez da água bruta no mês de julho de 2020.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

A turbidez de água bruta permaneceu mais elevada durante praticamente todo o mês de julho, e portanto, foram utilizadas dosagens mais altas de coagulante, chegando a uma média de 30,07 ppm. As dosagens de Sulfato de Alumínio que foram utilizadas no mês de julho podem ser verificadas na Figura 22.

Figura 22: Relação entre a dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada e a turbidez da água bruta do mês de julho de 2020.



Fonte: Luísa Tavares Soares, 2020

Na Tabela 8, podem ser visualizadas as médias de turbidez da água bruta referentes a cada mês em que foram coletados os dados, e a dosagem média do coagulante Sulfato de Alumínio que foi utilizada.

Tabela 8: Médias de turbidez da água bruta e dosagem média de Sulfato de Alumínio nos meses abril, maio, junho e julho de 2020.

Mês	Turbidez média da água bruta (NTU)	Dosagem média de Sulfato de Alumínio (ppm)
Abril	10,65	22,25
Maio	18,37	28,67
Junho	33,67	27,29
Julho	55,74	30,07

Através dos dados apresentados na Tabela 8, observou-se que no mês de abril, a média dos valores de turbidez da água bruta foi a mais baixa em relação aos meses analisados. Já no mês de julho, a média de resultados foi a mais alta. Em relação as concentrações de Sulfato de Alumínio, no mês de abril praticaram-se as dosagens mais baixas em comparação aos outros meses. A mais alta de dosagem utilizada foi verificada no mês de julho que apresentou, igualmente, o valor mais alto de turbidez da água bruta.

4.2 Testes de Clarificação

Os testes de clarificação foram realizados com o objetivo de comparar o desempenho dos dois coagulantes na mesma amostra de água bruta. Previamente foram realizadas as análises de pH, turbidez, cor e alcalinidade nas amostras. Os resultados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados das análises realizadas nas amostras de água bruta coletadas para a realização do estudo.

Análises	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
Turbidez (NTU)	21	37	64
pH	6,9	6,7	7,1
Cor (mg/L Pt-Co)	52	81	119
Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)	22	16	12

Analisando os resultados apresentados na Tabela 9, verificou-se que as amostras com maior turbidez também apresentaram maior cor. Além disso, a amostra 3 possui um valor de alcalinidade mais baixo que as amostras 2 e 3.

4.2.1 Resultados dos testes realizados na amostra 1

Na amostra 1, foram utilizadas as dosagens de 22, 25 e 28 mg/L de Sulfato de Alumínio. Os valores foram definidos a partir da dosagem que estava sendo utilizada na ETA no dia em que a amostra foi coletada, 25 mg/L de Sulfato de Alumínio. Os resultados para os testes de clarificação encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados do teste de clarificação da amostra 1 utilizando Sulfato de Alumínio como coagulante.

Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)	Velocidade de sedimentação	Tamanho do floco	pH água floculada	Turbidez água floculada após filtração (NTU)	Cor (mg/L Pt-Co)	Alcalinidade água floculada (mg/L)
22	B	B	6,3	0,3	2	16
22	B	B	6,4	0,3	2	15
22	B	B	6,4	0,4	3	16
25	O	O	6,2	0,3	4	15
25	O	O	6,2	0,3	4	14
25	O	O	6,1	0,4	4	14
28	O	O	6,0	0,2	3	13
28	O	O	6,0	0,2	3	13
28	O	O	6,0	0,2	3	12

A partir dos resultados do teste, foi possível concluir que a dosagem do coagulante poderia ser reduzida para 22 mg/L, já que os resultados de velocidade de sedimentação, tamanho do

floco, turbidez após filtração e cor estão dentro dos parâmetros exigidos. A redução da dosagem de coagulante viabiliza a diminuição dos custos com reagentes e pode evitar a necessidade de utilização de alcalinizante.

A dosagem de PAC foi definida realizando-se um pré-teste de observação de floculação. A partir dos testes de floculação foram definidas as dosagens de 16, 19 e 22 mg/L de PAC. Os resultados para os testes de clarificação encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do teste de clarificação da amostra 1 utilizando PAC como coagulante.

Dosagem de PAC (mg/L)	Velocidade de sedimentação	Tamanho do floco	pH água floculada	Turbidez água floculada após filtração (NTU)	Cor (mg/L Pt-Co)	Alcalinidade água floculada (mg/L)
16	B	B	6,7	0,4	4	20
16	B	B	6,6	0,3	4	21
16	B	B	6,6	0,3	3	20
19	O	O	6,5	0,2	3	21
19	O	O	6,5	0,2	3	20
19	O	O	6,5	0,2	3	21
22	O	O	6,4	0,2	3	22
22	O	O	6,4	0,2	3	22
22	O	O	6,4	0,2	3	20

Através dos resultados descritos nas Tabelas 7 e 8, foi possível visualizar a diferença nos resultados de alcalinidade e pH para os dois coagulantes. Conforme mostram os resultados, a dosagem de PAC não altera muito a alcalinidade da água, que era de 22 mg/L CaCO₃ para a amostra coletada. Já nos resultados com Sulfato de Alumínio, utilizando-se a menor dosagem, houve uma redução de 27,3 % da alcalinidade.

4.2.2 Resultados dos testes realizados na amostra 2

Na amostra 2, com valor médio de turbidez 37 NTU, foram utilizadas as dosagens de 25, 28 e 31 mg/L de Sulfato de Alumínio. Na Tabela 12, encontram-se os resultados das análises de clarificação realizadas.

Tabela 12: Resultados do teste de clarificação da amostra 2 utilizando Sulfato de Alumínio como coagulante.

Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)	Velocidade de sedimentação	Tamanho do floco	pH água floculada	Turbidez água floculada após filtração (NTU)	Cor (mg/L Pt-Co)	Alcalinidade água floculada (mg/L)
25	B	B	5,6	0,3	2	10
25	B	B	5,5	0,2	2	10
25	B	B	5,5	0,2	2	10
28	O	O	5,3	0,2	3	9
28	O	O	5,3	0,2	5	9
28	O	O	5,3	0,2	3	10
31	O	O	5,0	0,3	3	5
31	O	O	5,1	0,2	3	8
31	O	O	5,2	0,2	3	7

A dosagem utilizada na ETA foi de 28 mg/L de Sulfato de Alumínio e como pode ser visto nos resultados com 25 mg/L, a dosagem poderia ser reduzida devido aos resultados dentro dos parâmetros exigidos. Observando os resultados da Tabela 9, valores de dosagem maiores possuem maior impacto na alcalinidade da água, tornando-se necessária a administração de alcalinizante. Ressaltando ainda que a amostra de água bruta já apresentava baixa alcalinidade, 16 mg/L de CaCO₃. Os resultados de dosagem de 25 mg/L apresentam uma redução de 37,5 % da alcalinidade.

As dosagens de PAC da amostra 2 também foram definidas através de um pré-teste, obtendo os valores de 20, 23 e 26 mg/L. Na Tabela 13, é possível visualizar os resultados obtidos através das análises realizadas.

Tabela 13: Resultados do teste de clarificação da amostra 2 utilizando PAC como coagulante.

Dosagem de PAC (mg/L)	Velocidade de sedimentação	Tamanho do floco	pH água floculada	Turbidez água floculada após filtração (NTU)	Cor (mg/L Pt-Co)	Alcalinidade água floculada (mg/L)
20	O	O	6,7	0,2	2	12
20	O	O	6,6	0,2	2	12
20	O	O	6,6	0,2	2	11
23	O	O	6,4	0,2	2	10
23	O	O	6,3	0,2	2	11
23	O	O	6,2	0,2	2	10
26	O	O	6,1	0,3	2	10
26	O	O	6,1	0,2	2	11
26	O	O	6,1	0,2	2	10

Avaliando os resultados encontrados nas Tabelas 12 e 13, novamente foi possível verificar um efeito menor do PAC em relação à alcalinidade e ao pH das amostras. Além disso, foi possível verificar que, novamente, a dosagem necessária de PAC foi menor.

4.2.3 Resultados dos testes realizados na amostra 3

Na amostra 3, com maior turbidez, 64 NTU, as dosagens de Sulfato de Alumínio utilizadas foram de 31, 34 e 37 mg/L. A dosagem utilizada no tratamento foi de 34 mg/L. Os dados das análises podem ser visualizados na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados do teste de clarificação da amostra 3 utilizando Sulfato de Alumínio como coagulante.

Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)	Velocidade de sedimentação	Tamanho do floco	pH água floculada	Turbidez água floculada após filtração (NTU)	Cor (mg/L Pt-Co)	Alcalinidade água floculada (mg/L)
31	B	B	4,9	0,3	4	4
31	B	B	4,9	0,3	4	4
31	B	B	4,9	0,3	4	3
34	B	B	4,8	0,3	4	3
34	B	B	4,7	0,2	4	3
34	B	B	4,7	0,2	4	3
37	O	O	4,5	0,2	4	3
37	O	O	4,5	0,2	4	3
37	O	O	4,6	0,2	4	3

A dosagem econômica, segundo os resultados da Tabela 14, foi de 31 mg/L devido aos resultados dentro dos parâmetros exigidos. Porém, mesmo utilizando a menor dosagem, a redução de alcalinidade foi de 66,7 %. Dessa forma, tornando-se indispensável a dosagem de alcalinizante. A alcalinidade da amostra 3 estava baixa, 12 mg/L de CaCO₃.

Para o teste com PAC na amostra 3, utilizaram-se as dosagens de 23, 25 e 28 mg/L. Os dados relativos ao teste estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados do teste de clarificação da amostra 3 utilizando PAC como coagulante.

Dosagem de PAC (mg/L)	Velocidade de sedimentação	Tamanho do floco	pH água floculada	Turbidez água floculada após filtração (NTU)	Cor (mg/L Pt-Co)	Alcalinidade água floculada (mg/L)
23	B	B	6,4	0,3	2	12
23	B	B	6,5	0,3	2	11
23	B	B	6,4	0,3	2	11
25	O	O	6,3	0,2	2	10
25	O	O	6,3	0,2	2	9
25	O	O	6,3	0,2	3	9
28	B	B	6,1	0,2	2	8
28	B	B	6,1	0,2	2	9
28	B	B	6,2	0,2	3	10

Mesmo utilizando dosagens mais altas de PAC, foi possível comprovar, através dos resultados descritos na Tabela 15, que não houve efeito considerável na alcalinidade e no pH das amostras. Portanto, é possível concluir que, utilizando-se o PAC como coagulante, nas condições avaliadas, geralmente, não há necessidade de adição de alcalinizante.

4.2.4 Considerações gerais

A partir dos resultados obtidos através dos testes de clarificação, foi possível verificar que a alcalinidade e o pH decaem com o aumento da dosagem de coagulante. Além disso, que o Sulfato de Alumínio possui um efeito muito maior que o PAC em relação ao decaimento de alcalinidade. Utilizando-se o PAC ao invés do Sulfato de Alumínio, nas condições avaliadas, foi dispensável a utilização de alcalinizante.

Conclui-se também que realizando o teste de clarificação, frequentemente é possível tentar diminuir a dosagem utilizada no tratamento. Por isso, o teste é de grande importância, além de ser uma referência em casos de mudança repentina das características da água.

4.3 Análise econômica preliminar

Nesse tópico foi realizada uma análise econômica da utilização dos coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC. Foram considerados os valores dos produtos, a média de consumo mensal de cada coagulante e o custo de alcalinizante.

4.3.1 Dados mensais de consumo de Sulfato de Alumínio e alcalinizante

Na Tabela 16, é possível visualizar as quantidades consumidas de Sulfato de Alumínio e cal durante os meses abril, maio, junho e julho de 2020. Nos meses de maio e julho o consumo de Sulfato de Alumínio foi consideravelmente maior do que nos outros meses, devido à dosagem mais alta de coagulante e o volume de água produzido.

Tabela 16: Consumo de Sulfato de Alumínio e Cal no período de abril a julho de 2020.

Mês	Quantidade de Sulfato de Alumínio (kg)	Quantidade de Cal (kg)
Abril	25150,17	0
Maio	33429,119	401,302
Junho	27960,797	2882,078
Julho	33095,278	8813,622
Média mensal	29908,841	3024,25

O valor pago por quilo de Sulfato de Alumínio, pela estação de tratamento em que foi realizado o estudo, é de R\$ 0,4213, e é produzido pela própria empresa de abastecimento. Através da média calculada, estimou-se que a ETA gaste um valor de R\$ 12.600,59 mensais com Sulfato de Alumínio.

Nos meses de maio, junho e julho de 2020 foi necessário realizar a dosagem de cal no tratamento de água para o pH final da água tratada ficar dentro dos padrões exigidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação 05/2017 do Ministério da Saúde. A quantidade consumida encontra-se na Tabela 16. No mês de maio, apesar da média de turbidez da água bruta elevada, o consumo de cal foi mais baixo do que nos meses de junho e julho. Isso ocorre devido à diferença de alcalinidade da água no período.

Levando em consideração a média consumida de cal nesse período, estimou-se que a empresa consumiu um total de 3.024,25 kg mensais. O preço pago pelo quilo de cal foi de R\$ 0,55, comercializado em sacos de 20 kg pela CAL OESTE LTDA. Portanto, a empresa possui um custo mensal médio de R\$ 1.663,30. Além disso, a dosagem de alcalinizante implica em custos de água para produzir a solução, água de arraste para realizar a dosagem, água para limpeza diária da tubulação, energia gasta pelas bombas, espaço físico necessário para armazenagem, manutenção do sistema de dosagem e tempo de trabalho do operador para fazer a solução.

4.3.2 *Custo estimado do consumo de PAC*

Através dos resultados obtidos pelo teste de clarificação, concluiu-se que a dosagem econômica de PAC para determinada turbidez de água bruta foi de 24,3 % em média menor do que a dosagem de Sulfato de Alumínio utilizada. Considerando que a quantidade média mensal de consumo do produto será 24,3 % menor, estimando-se 22.640,99 kg, sendo o preço pago por kg de PAC de R\$ 1,32 (fornecido pela Ambientaly), o valor mensal seria de R\$ 29.886,11.

Após avaliação econômica da utilização dos coagulantes Sulfato de Alumínio e PAC, concluiu-se que o Sulfato de Alumínio possui vantagens em relação ao custo. Ainda, com a necessidade de utilização de alcalinizante, os custos serão de aproximadamente R\$ 15.622,22 mensais mais baixos, devido ao preço muito competitivo do Sulfato de Alumínio, que é aproximadamente $\frac{1}{3}$ do valor do PAC. Porém, foi considerado somente os custos do alcalinizante e não dos outros custos para a realização da sua dosagem no tratamento.

Considerando os resultados obtidos através dos testes realizados no estudo, comprovou-se que o PAC possui melhor desempenho do que o Sulfato de Alumínio. Além disso, uma análise econômica realizada em longo prazo ou mais aprofundada pode levar a resultados mais vantajosos para o PAC.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica de utilização de Policloreto de Alumínio (PAC) no processo de coagulação da água bruta em comparação ao Sulfato de Alumínio, empregado usualmente em uma empresa de tratamento de água de abastecimento. Primeiramente, foram analisados dados coletados de turbidez da água bruta no período de abril a julho de 2020 e as dosagens de Sulfato de Alumínio utilizadas.

Através dos dados coletados foi possível verificar que a turbidez da água bruta analisada possui grande variação. Conforme a turbidez da água aumenta, é necessário um aumento da dosagem de coagulante. Geralmente, com um aumento considerável na dosagem de Sulfato de Alumínio surge a necessidade de dosagem de alcalinizante.

Para realizar a avaliação comparativa dos coagulantes PAC e Sulfato de Alumínio, foram realizados Testes de Clarificação com 3 amostras de água bruta com valores diferentes de turbidez, coletadas em 3 datas diferentes. A partir dos resultados obtidos através dos ensaios, foi possível realizar uma comparação da eficiência dos coagulantes avaliados. O PAC apresentou resultados mais satisfatórios com dosagens 24,3 %, em média, menores do que o Sulfato de Alumínio. Além disso, foi observado que o PAC possui menor impacto em relação à alcalinidade da água, diminuindo a necessidade de utilização de alcalinizante.

Por meio da análise econômica realizada, constata-se que o Sulfato de Alumínio é mais vantajoso economicamente devido ao seu valor competitivo. Porém, a análise realizada não leva em consideração todos os fatores envolvidos. Poderia ser realizada futuramente uma análise econômica mais aprofundada levando em consideração outros fatores.

Conclui-se que o PAC pode ser utilizado como coagulante na ETA em que foi realizado o estudo. Além disso, foi comprovado que o PAC possui maior eficiência no tratamento do que o Sulfato de Alumínio e gera menor quantidade de resíduos. Porém, no estudo realizado para esse caso, o Sulfato de Alumínio é mais vantajoso economicamente.

REFERÊNCIAS

AEGEA. **Mercado de Saneamento**. 2016. Disponível em: <https://ri.aegee.com.br/a-aegee/mercado-de-saneamento/>. Acesso em: 23 de junho de 2020.

AGROEMDIA. *Norte e Nordeste convivem com saneamento básico precário, aponta IBGE*. **Agro em Dia**. 2018. Disponível em: <https://agroemdia.com.br/2018/04/26/norte-e-nordeste-convivem-com-carencias-no-acesso-a-saneamento-basico/>. Acesso em: 12 de agosto de 2020.

BRASIL. *Lei nº 9.433 da política nacional de recursos hídricos*, 8 de janeiro de 1997.

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.

BRATBY, J. **Coagulation and Flocculation**. England: Uplands Press LTDA, 1980.

CEBDS; INSTITUTO TRATA BRASIL. **Benefícios econômicos da expansão do saneamento**. 2014. Disponível em: https://cebds.org/wp-content/uploads/2014/03/Relatorio_Beneficios-Economicos-do-Saneamento.pdf. Acesso em: 23 de outubro de 2020.

CONSTANTINO, A. F.; YAMAMURA, V. D. **Redução do gasto operacional em estação de tratamento de água utilizando o PAC**. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA, 2. 2009, Maringá. **Anais Eletrônicos [...]** Maringá: 2009. Disponível em: http://www.dec.uem.br/eventos/ii_simpgeu/arquivos/Trabalhos/146.pdf. Acesso em 15 de junho de 2020.

CUNHA, A. R.; FÁVERO, B. *O saneamento básico no Brasil em 6 gráficos*. **Aos Fatos**. 2019. Disponível em: <https://www.aosfatos.org/noticias/o-saneamento-basico-no-brasil-em-6-graficos/>. Acesso em: 22 de setembro de 2020.

DA SILVA, W. R.; SILVA, M. R.; PIRES, T. B. *O uso sustentável e a qualidade da água na produção animal*. **Revista Eletrônica Nutrime**, Maringá, v. 11, n.5, p. 3617-3636, set./out. 2014. Disponível em: https://www.nutrime.com.br/arquivos_internos/artigos/ARTIGO266.pdf. Acesso em: 02 de outubro de 2020.

DE SOUZA, J. R.; DE MORAES, M. E. B.; SONODA, S. L.; SANTOS, H. C. R. G. *A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil*. **REDE - Revista Eletrônica do Prodepa**, Fortaleza, v.8, n.1, p. 26-41, abr. 2014. Disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/217/51>. Acesso em: 13 de junho de 2020.

EOS. **A exploração dos recursos hídricos no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://www.eosconsultores.com.br/exploracao-de-recursos-hidricos-no-brasil/>. Acesso em: 12 de agosto de 2020.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Manual do Saneamento Básico**. 2012. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/estudos/pesquisa16/manualimprensa.pdf>. Acesso em: 23 de outubro de 2020.

KUHN, C. **Marcha de Serviço para ETAS**. CORSAN, Porto Alegre, 2018.

KURITA. **Handbook of Water Treatment**. Second English Edition. 1999. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/39456186/Handbook-of-Water-Treatment>. Acesso em 21 de novembro de 2020.

LEGNER, C. *Sistema de Decantação*. **Revista TAE**, Santo André, v.13, n.1 p. 37-41, jun./jul. 2013. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Noticia/6314/sistema-de-decantacao>. Acesso em: 22 de junho de 2020.

LEMOS, K. S.; DE AGUIAR FILHO, S. Q.; CAVALLINI, G. S. *Avaliação comparativa entre os coagulantes sulfato de alumínio ferroso e policloreto de alumínio para tratamento de água: estudo de viabilidade econômica*. **Revista Desafios**, Tocantins, v. 7, n.1, p. 110-119, mar. 2020. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/7824/16525>. Acesso em: 23 de outubro de 2020.

MEMPHIS. **Coagulantes Aluclor**. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/produto/coagulantes-aluclor/>. Acesso em: 23 de agosto de 2020.

PADILHA, D. J.; CERUTI, F. C.; VIDAL, M. S.; MARTINS, C. H. **Análise da utilização de três diferentes coagulantes na remoção da turbidez de água de manancial de abastecimento**. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 7. 2011, Maringá. **Anais Eletrônicos [...]** Maringá: 2011. Disponível em: http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2011/anais/diana_janice_padilha2.pdf. Acesso em: 24 de outubro de 2020.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada**. 2001. 233 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-21012003-084719/publico/Pavanelli%2BG.pdf>. Acesso em: 13 de junho de 2020.

PIANTÁ, C. A. V. **Emprego de coagulantes orgânicos naturais como alternativa ao uso de Sulfato de Alumínio no tratamento de água**. 2008. 78 f. Projeto de pesquisa para diplomação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/26026/000754989.pdf>. Acesso em: 12 de agosto de 2020.

RICHTER, C. A. **Água: Método e tecnologias de tratamento**. São Paulo: Editora Blucher, 2009. Disponível em: http://plataforma.redesan.ufrgs.br/biblioteca/pdf_bib.php?COD_ARQUIVO=18072. Acesso em: 12 de agosto de 2020.

SANEP. **Tratamento de Água.** 2020. Disponível em: <https://portal.sanep.com.br/agua/tratamento-agua>. Acesso em: 23 de outubro de 2020.

SILVA, A. F.; DE LIMA, F. G.; GREIFF, M. B.; REGUEIRO, R. A. M.; ANTUNES, R. W.; TEODORO, W. F. A.; MORENO, A. *Estudo de redução do residual de alumínio na água tratada da cidade de Mogi das Cruzes.* **Revista Científica UMC**, Mogi das Cruzes, v. 2, n. 2, p. 1-12, ago. 2017. Disponível em: <http://seer.umc.br/index.php/revistaumc/article/view/153/159>. Acesso em: 24 de outubro de 2020.

SUDRÉ, Lu. *Há dez anos, ONU declarava acesso a água e saneamento como direito humano.* **Brasil de Fato.** 2020. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2020/07/28/ha-dez-anos-onu-declarava-acesso-a-agua-e-saneamento-como-direito-humano>. Acesso em 12 de agosto de 2020.

TRATAMENTO de água e esgoto. 2017. Disponível em: <https://app.planejativo.com/q/14050/quimica-1/tratamento-da-agua-e-do-esgoto>. Acesso em: 23 de outubro de 2020.

UNICAMP. **Módulo de Saneamento Ambiental.** 2001. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~bdta/coagulacao.htm>. Acesso em 23 de agosto de 2020.

UNICEF. **1 em cada 3 pessoas no mundo não tem acesso a água potável, dizem o UNICEF e a OMS.** UNICEF, 2019. Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/comunicados-de-imprensa/1-em-cada-3-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-agua-potavel-dizem-unicef-oms>. Acesso em: 23 de outubro de 2020.