

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
ENGENHARIA QUÍMICA**

RONALDO TEIXEIRA XIMENDES

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO PARA O PROJETO
DE HIDROCICLONES NO ADENSAMENTO DO LODO GERADO NAS ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**Bagé
2021**

RONALDO TEIXEIRA XIMENDES

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO PARA O PROJETO
DE HIDROCICLONES NO ADENSAMENTO DO LODO GERADO NAS ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida

**Bagé
2021**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

X6d Ximendes, Ronaldo Teixeira
Desenvolvimento de metodologias de cálculo para o projeto de hidrociclones no adensamento do lodo gerado nas estações de tratamento de água / Ronaldo Teixeira Ximendes.
56 p.
Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA, 2021.
"Orientação: André Ricardo Felkl de Almeida".
1. Consumo da água. 2. Tratamento da água. 3. ETA. 4. Metodologia. 5. Hidrociclones. I. Título.

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa**

RONALDO TEIXEIRA XIMENDES

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO PARA O PROJETO
DE HIDROCICLONES NO ESPESSAMENTO DO LODO GERADO NAS ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 14 de maio de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida
Orientador
UNIPAMPA

Prof^ª. Dr^ª. Tânia Regina de Souza
UNIPAMPA

TAE. Dr^ª. Aline Lemos Arim
UNIPAMPA

Assinado eletronicamente por **ALINE LEMOS ARIM, Técnico de Laboratório Área - SL-BAGE**, em 14/05/2021, às 09:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **TANIA REGINA DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/05/2021, às 09:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **ANDRE RICARDO FELKL DE ALMEIDA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/05/2021, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orga_o_acesso_externo=0, informando o código verificador **0521048** e o código CRC **E8DBABEC**.

“Dedico este trabalho a minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica.”

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

Com o passar dos anos o consumo da água potável no mundo tem aumentado devido ao crescimento populacional, industrial e econômico e a outros fatores naturais que afetam algumas regiões. Quando se trata de consumo da água, é essencial mudar a consciência da população, adotando outros hábitos rotineiros como na hora do banho, evitar deixar o chuveiro aberto mais tempo do que o necessário; ao lavar a louça, não deixar a torneira aberta o tempo todo; evitar o uso de mangueiras para lavar calçadas e carros. O assunto de reaproveitamento da água vem sendo estudado há alguns anos e atualmente está ganhando popularidade pelo momento crítico em que vivemos onde pessoas espalhadas pelo mundo foram afetadas por secas e estiagens. Inserido nesse contexto, de um melhor uso da água visando a sua sustentabilidade, estão as Estações de Tratamento de Água (ETAs), que devem se adequar a essa necessidade. Se tratando dos processos envolvidos em ETAs, sabe-se que nos dias atuais a grande maioria gera grandes quantidades de água nas lavagens de filtros, que são descartadas sem um reaproveitamento adequado. Em plantas convencionais de ETAs ocorrem perdas do volume total da água captadas por rios, barragens, lagos e poços, devido à etapa de retrolavagem dos filtros. Essa água de retrolavagem acaba por se tornar rejeito, visto que as ETAs não possuem um sistema para a sua recuperação. Os destinos encontrados para esse volume de água proveniente da retrolavagem são o descarte direto ou o retorno para a linha de alimentação de água bruta na planta convencional, entretanto isso gera uma alteração de pH , residual de cloro, e aumenta os valores de ferro, alumínio e manganês presentes na água, podendo ocasionar riscos à saúde. Diante do que foi exposto, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia de cálculo para o projeto de hidrociclones no adensamento do lodo gerado nas ETAs. O hidrociclone é destinado à separação sólido-líquido, sendo possível adequá-lo para a recuperação do volume de água que antes era descartado. Por meio de pesquisas em artigos, foi obtido os dados da caracterização física e granulométrica do lodo de ETAs. Com base nesses dados foi possível projetar hidrociclones com o uso das equações propostas por Massarani (2002) para hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*. Foi realizada uma análise de sensibilidade paramétrica para verificar a eficiência de separação dos hidrociclones. Através dessas análises foram alteradas as propriedades físicas do lodo e variáveis de processo para confirmar a eficiência de separação utilizada. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade do uso dos hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley* como alternativa para adensar o lodo de ETAs.

Palavras-Chave: Consumo da água. Tratamento da água. ETA. Metodologia. Hidrociclones.

ABSTRACT

As the years go by, the drinking water consumption in the world has increased due to population, industrial and economic growth and other natural factors that affect some regions. When it comes to water consumption, it is critical to change the population's awareness, adopting other routine habits, such as, at bath time, avoiding leaving the shower longer than necessary; when washing the dishes, not leaving the tap running the entire time; and stop using garden hoses to wash sidewalks and cars. The reutilization of water has been studied and tested for some years now, and is currently gaining popularity due to the critical moment in which we live, where people around the world have been affected by dryness and droughts. In the regard of a better use of water, aiming its sustainability, stand the Water Treatment Stations (WTSs), which must adapt to this need. When it comes to the processes involved in the WTSs, it is known that nowadays the vast majority of them generates large amounts of water in the filters washing, which are dismissed without proper reutilization. In conventional WTS blueprints, there is a loss of the total volume of water captured by rivers, dams, lakes and wells, due to the step of retrowashing the filters. This retrowash water ends up becoming waste, since the WTSs do not have an engine to recover them. The destinations for the retrowash water are the direct disposal of it or the return to the raw water supply line in the conventional blueprint. However, this generates a pH and residual chlorine alteration, and increases the readings of iron, aluminum and manganese present in the water, which can cause health risks. Given the above, this paperwork aimed to develop a calculation methodology for the hydrocyclone project in the densification of the sludge generated in the WTSs. The hydrocyclone is designed for solid-liquid separation, making it possible to adapt it to recover the volume of water that was dismissed before. Through research in articles, data about the physical and granulometric characterization of the sludge from WTSs were collected. Based on these, it was made possible to design hydrocyclones using the equations proposed by Massarani (2002) for Rietema and Bradley hydrocyclones. A parametric sensitivity analysis was performed to verify the hydrocyclones separation efficiency. Through the analyzes, the physical properties of the sludge and some process variables were altered to confirm the separation efficiency of the methodology used. The obtained results confirm the viability of using Rietema and Bradley hydrocyclones as an alternative to densify the sludge from WTSs.

Keywords: Water consumption. Water treatment. WTS. Methodology. Hydrocyclones.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do funcionamento de uma ETA.....	22
Figura 2 – Movimento que o fluido percorre no interior do hidrociclone.....	35
Figura 3 – Dimensões geométricas para um hidrociclone convencional.....	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros microbiológicos estabelecidos.....	30
Quadro 2 – Etapas do tratamento do lodo na ETA.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de amostras da ALF e do lodo de decantadores.....	28
Tabela 2 – Relações geométricas encontradas para algumas famílias clássicas dos hidrociclones.....	36
Tabela 3 – Parâmetros de configuração do hidrociclone e suas condições operacionais aconselhadas.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALF – Águas de lavagem dos filtros

ANA – Agência Nacional de Águas

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

COMUSA – Companhia Municipal de Saneamento de Novo Hamburgo

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETA – Estação de Tratamento de Água

NBR – Norma Brasileira

NMP – Número mais Provável

OD – Oxigênio Dissolvido

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

UFC – Unidade Formadora de Colônias

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

uT – Unidade de Turbidez

VMP – Valores Máximos Permitidos

WWF – *World Wide Fund for Nature*

NOMENCLATURA

Parâmetro	Nome	Dimensão
A	Constante Adimensional	–
B	Constante Adimensional	–
C	Constante Adimensional	–
c_v	Concentração Volumétrica	ML^{-3}
D^*	Diâmetro de Corte	L
D_c	Diâmetro do Cilindro	L
D_i	Diâmetro do Duto de Alimentação	L
D_o	Diâmetro do Duto de <i>Overflow</i>	L
d_p	Diâmetro Médio da Partícula	L
D_u	Diâmetro do Orifício de <i>Underflow</i>	L
$f(R_L)$	Fator que Considera a Concentração Volumétrica dos Sólidos	–
$g(c_v)$	Fator de Correção	–
K	Constante Adimensional	–
L	Comprimento Total	L
l	Comprimento do <i>Vortex Finder</i>	L
L_l	Comprimento as Seção Cilíndrica	L
Q	Vazão	L^3T^{-1}
R_L	Razão de Líquido	–
u_c	Velocidade Média do Fluido na Seção Cilíndrica do ciclone	LT^{-1}

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

Parâmetro	Nome	Dimensão
η	Eficiência Individual de Coleta dos Hidrociclones	–
θ	Ângulo do Tronco de Cone	–
ρ_f	Massa Específica do Fluido	ML^{-3}
ρ_{H_2O}	Massa Específica da Água	ML^{-3}
ρ_s	Massa Específica do Sólido	ML^{-3}
μ	Viscosidade	$ML^{-1}T^{-1}$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Uso Consciente da Água e Aspectos Ambientais	19
3.2 Tratamento de Água.....	21
3.2.1 Etapas do Tratamento de Água.....	21
3.2.2 Geração de Resíduos	24
3.3 Caracterização dos Resíduos	26
3.4 Alternativas para o Tratamento dos Resíduos de ETAs.....	30
3.5 Hidrociclone	34
4 ARTIGO	38
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos mais importantes no contexto atual e é preciso saber utilizar e explorar estes de forma consciente e sustentável, para que as próximas gerações tenham a chance de desfrutar desse bem (BACCI; PATACA, 2008). Através de um estudo feito pela *World Wide Fund for Nature Brazil* (WWF), foi constatado que a água doce para consumo humano é de apenas 1% contida nos mananciais (rios, geleiras, lagoas) e água subterrâneas, o que representa 2,5% da água total disponível no planeta, sendo os outros 97,5% distribuídos entre mares e oceanos (GARCIA, 2011).

Uma das soluções para diminuir o consumo da água seria a realização de campanhas para orientação das pessoas, ensinando-as dentro da sua rotina diária como reduzir o uso da água, deste modo haverá uma redução da produção de esgoto, de desperdício e uma economia na conta. A má utilização da água gera degradação ambiental, pois quando se abre uma torneira além do consumo da água é preciso pensar que a rede de esgoto também está sendo alimentada (SANTOS, 2011).

As Estações de Tratamento de Água (ETA) seguem a Norma Brasileira (NBR) 12.216 da ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), sendo assim responsáveis por atender as exigências de potabilidade. Esta define os requisitos da construção da planta de uma ETA da produtividade da água potável até a distribuição. O funcionamento de uma ETA se divide em etapas sendo elas a captação no manancial, adução, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e armazenamento (BRK AMBIENTAL, 2019).

A água antes de chegar às casas da população passa por um tratamento completo desenvolvido em uma ETA, que visa entregar um produto sem riscos para a saúde pública, respeitando os níveis de concentração definidos para substâncias químicas e microrganismos que podem causar doenças. Da mesma maneira são realizadas análises de cor, odor, sabor, turbidez, sólidos em suspensão, ferro, alumínio e manganês com o intuito de atender os padrões de legislações pertinentes à qualidade da água tratada (CARVALHO; SANTOS, 2008; ACHON, 2008).

Os resíduos produzidos nas ETAs são, em geral, provenientes da descarga dos decantadores e das águas de lavagem de filtros (ALF). De acordo com o seu potencial de risco ambiental estes pertencem à “classe II A” que corresponde a não perigosos e não inertes. É importante ressaltar que os resultados de análises encontrados para um resíduo podem ser

diferentes de um outro resíduo, devido às suas características (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Esses resíduos são caracterizados através de um monitoramento das etapas nas diferentes unidades de tratamento, que devem incluir os dados da qualidade da água coletados durante o ano (DI BERNARDO; PAZ, 2008).

Durante muito tempo os resíduos gerados nas ETAs eram lançados diretamente no curso d'água, sem nenhum tratamento prévio. As consequências geradas por essa prática, levou os órgãos de controle ambiental a se posicionar quanto a esse procedimento limitando ou até mesmo impedindo o despejo desses resíduos diretamente nos mananciais. Deste modo é necessário encontrar métodos alternativos que tenham como prioridade a segurança do meio ambiente, levando em consideração uma diminuição nos gastos (SCALIZE, 2003; DI BERNARDO *et al.*, 2002).

Os hidrociclones surgem como uma alternativa para o tratamento de água residuárias devido a sua praticidade e tamanho, visto que estes não contêm partes móveis e contam com uma fácil execução que demanda apenas bombas centrífugas para a sua alimentação (ANDRADE, 2007). Assim, o presente trabalho teve como foco principal desenvolver metodologias de cálculo para o projeto de hidrociclones no adensamento de lodo gerado nas ETAs.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma metodologia de cálculo para o projeto de hidrociclones no adensamento do lodo gerado nas Estações de Tratamento de Água (ETA).

2.2 Objetivos Específicos

Confecção de um artigo científico contendo todo o desenvolvimento da metodologia de cálculo, juntamente com o projeto relacionado aos hidrociclones para o adensamento do lodo gerado em ETAs e a verificação de sua eficiência de separação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica destaca em um primeiro momento, sobre o uso consciente da água e os aspectos ambientais, mantendo o foco no adensamento do lodo produzido nas ETAs, mostrando um panorama geral sobre os métodos para tratamento de resíduos gerados por uma estação de tratamento de água e dando uma opção viável para o tratamento dos resíduos gerados pelos filtros de uma ETA. Após, são definidos os meios para caracterizar e tratar os resíduos gerados pela retrolavagem.

3.1 Uso Consciente da Água e Aspectos Ambientais

A água é um recurso vital a todos os seres humanos. Segundo Bacci e Pataca (2008), sua exploração deve ser realizada com consciência e sustentabilidade, de maneira com que as próximas gerações possam usufruir deste bem. Garcia (2011), que analisou um estudo feito pela *World Wide Fund for Nature Brazil* (WWF), diz que a quantidade própria para consumo da população representa 1% da “água doce” contida em rios, lagos, geleiras e águas subterrâneas, o que corresponde apenas à 2,5% contida no planeta. Os outros 97,5% dizem respeito ao volume dos mares e oceanos.

Lawrence, Carvalho e Scarpelini (2017), explicam que restringindo-se ao Brasil, os mananciais estão sofrendo frequentes alterações, devido a mudanças no meio ambiente, como o descarte de rejeitos e a escassez de chuva em algumas regiões.

Rubituci (2015), diz que com o passar do tempo, as reservas de recursos hídricos vêm diminuindo de forma acelerada devido à má conscientização da população. Mesmo em tempos difíceis, pouco é feito para reduzir os danos causados a estes recursos.

Para Devanir Garcia dos Santos, gerente de Conservação de Água e Solos da Agência Nacional de Águas - ANA (SANTOS, 2011), o uso consciente deve ser implementado através de campanhas que orientem a população para reduzir o consumo em sua rotina diária, diminuindo, assim, a produção de esgoto, o desperdício e gerando economia na conta. Diz, também, que o consumo exagerado gera degradação ambiental, pois ao se abrir uma torneira, não estamos apenas consumindo água, mas também alimentando toda a rede de esgoto.

No mesmo sentido, Braga *et al.* (2003), alertam/ao que faz-se necessária a educação em relação ao meio ambiente, principalmente em relação à água, que é uma questão de extrema importância, o que se faz possível apenas a partir de ações de sensibilização e conscientização

das pessoas, que devem assumir o papel de cidadãos que participam da construção de uma nova sociedade.

Segundo Cancio (2017), o Brasil, sozinho, abrange 12% da água doce da superfície do planeta, e cerca de 53% do manancial disponível na América do Sul. A poluição, o desperdício e a escassez configuram três grandes ameaças à água potável. A poluição é caracterizada pela degradação através de substâncias químicas, físicas e biológicas, que são geradas, normalmente, pelo ser humano nas indústrias e em locais com grande população e sem serviço de saneamento básico. O desperdício é o gasto excessivo do bem devido à falta de educação sanitária. Por fim, a escassez é a extenuação das reservas naturais, que como nos itens já mencionados, é causada pelo homem, com o aumento populacional desenfreado e a industrialização.

Sobre a poluição, Nahra (2019), acrescenta que 85% desta vem de dejetos domésticos e os 15% restantes provém das indústrias, e estes excrementos deveriam ser tratados antes de serem lançados à água. Assim sendo, os principais agentes poluidores consistem no lixo sólido, os agrotóxicos, os esgotos carentes de tratamento e outras fontes de despejo que prejudicam a vida aquática.

Minayo e Gualhano (2016), relatam a inadequação histórica das políticas implementadas para prover saneamento, para preservar rios e nascentes e para diminuir os efeitos das secas e inundações. Ainda falam da fragilidade dos sistemas de controle e monitoramento ambiental e até mesmo, da incapacidade do poder público frente à necessidade de atuar, de reparar e de minorar os danos sobre a saúde humana e dos ecossistemas. Segundo os autores, em todos esses casos as populações materialmente mais desfavorecidas são as mais afetadas.

A COMUSA (COMPANHIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO DE NOVO HAMBURGO, 2017), ressalta que as ETAs têm por objetivo transformar a água sem tratamento (água bruta) em água adequada para consumo. Nessa etapa, a qualidade da água da fonte abastecedora atua diretamente nos tipos de tratamentos a serem realizados pelas ETAs, sendo eles físico, químico, físico-químico e microbiológico, para que esteja apropriada aos padrões de potabilidade.

3.2 Tratamento de Água

Carvalho e Santos (2016), comentam que a água potável corresponde àquela que pode ser consumida sem causar danos à saúde da população. Normalmente, as águas dos mananciais são impróprias para consumo e precisam de tratamento, sabendo que esses cursos de água estão constantemente expostos à poluição. As diferentes etapas do processo de tratamento de água têm como objetivo entregar um produto esteticamente considerável sem risco para a saúde pública, respeitando os níveis de concentrações estabelecidos para substâncias químicas e microrganismos causadores de doenças, mantendo o nível da cor dentro da escala, assim como as demais análises de turbidez, sólidos em suspensão, sabor e odor, ferro, alumínio e manganês.

Achon (2008), menciona que para efetuar o tratamento completo da água, é preciso passar por alguns processos, onde primeiramente, dá-se o transporte dos mananciais, sendo indispensável a busca dos mesmos mais afastados, exigindo um consumo de energia maior e a infraestrutura para adução, bombeamento, entre outros. Já no decorrer do tratamento, ocorre o gasto com produtos químicos, o controle de operação, a perda de água, o consumo de energia elétrica e o desenvolvimento de resíduos. Por último, analisa-se a condição da água tratada, estuda-se os resíduos gerados e sua rota final. As análises que visam a qualidade no processo garantem à ETA atender aos padrões requeridos pelas legislações pertinentes.

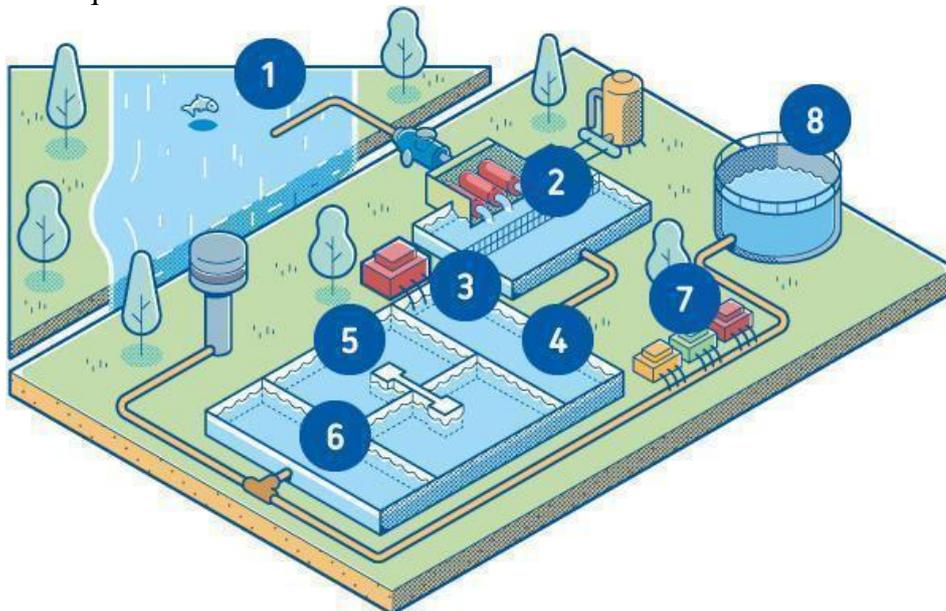
Botero *et al.* (2009), cita que o processo convencional de água utiliza a sedimentação com a aplicação de coagulantes, sendo ela entendida pelas operações unitárias de coagulação, de floculação, de decantação e de filtração para a clarificação da água e subsequente da correção do *pH*, desinfecção e fluoretação.

3.2.1 Etapas do Tratamento de Água

A Norma Brasileira (NBR) 12.216 da ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), dispõe que as ETAs são unidades responsáveis a ajustar as particularidades da água às exigências de potabilidade. Este regulamento define as condições exigíveis na construção de planta de ETA atribuída à produtividade da água potável para o fornecimento à população.

A Figura 1 ilustra as etapas do funcionamento de uma ETA desde a captação no manancial até o produto final, sendo 1 a captação, 2 a adução, 3 a coagulação, 4 a floculação, 5 a decantação, 6 a filtragem, 7 a desinfecção e 8 a armazenamento.

Figura 1 – Esquema do funcionamento de uma ETA



Fonte: Dacol (2019)

De acordo com Abreu (2017), a água bruta é proveniente de mananciais, que são reservatórios naturais utilizados para o fornecimento de água. As fontes de água se dividem em superficiais (rios, lagos e barragens) ou subterrâneas (poços profundos e lençóis freáticos). Neste estágio, a água é conduzida a um gradeamento (sistema de grades) que inibe o acesso de impurezas sólidas contidas na água (como por exemplo folhas, galhos e troncos) para as ETAs. Após o gradeamento, a água passa pela desarenação, que consiste em remover a areia por sedimentação, aprimorando o progresso do pré-tratamento da água. Com essas etapas vencidas, a água é então encaminhada para os processos subsequentes que são descritos nos itens que se seguem.

Coagulação e Floculação

Segundo a COMUSA (COMPANHIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO DE NOVO HAMBURGO, 2017), a coagulação é uma operação unitária que compreende a formação de coágulos, mediante a reação de um agente coagulante, proporcionando a condição de equilíbrio eletrostaticamente instável das substâncias no centro do volume líquido. Os agentes coagulantes mais utilizados no decurso da coagulação são os sais de metais (alumínio ou ferro),

tendo como exemplos o sulfato de alumínio, cloreto férrico e sulfato férrico. Na coagulação é necessário atender algumas condições de temperatura, *pH*, alcalinidade, cor, turbidez, sólidos totais dissolvidos, força iônica do meio, tamanho das partículas, entre outros procedimentos.

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005a), a floculação é um método físico que sucede a coagulação, e que fundamenta-se no momento de colisões entre as partículas geradas antes, visando a produção de flocos maiores, com o aumento de volume e densidade. Para o acontecimento das colisões entre as partículas, é fundamental que exista agitação na água, causada pelos gradientes de floculação. Estes necessitam ser restritos para que não extrapolem as propriedades de resistência do cisalhamento das partículas e não eliminem os flocos formados antes.

Decantação

Conforme Hammer e Hammer (1996), a fase de decantação (ou clarificação, sedimentação) consiste na extração, por meio da gravidade, das substâncias em suspensão e dos flocos constituídos no estágio anterior da floculação.

Richter e Netto (1991), explicam que a decantação é um procedimento de separação de misturas heterogêneas podendo ser de dois tipos: líquido/sólido ou líquidos imiscíveis. Esse processo físico baseia-se na diferença de densidade que existe entre seus componentes. Essa mistura sofre a ação da gravidade, ocorrendo a separação das partículas com maior densidade. As partículas mais leves que a água ou de tamanho muito menor não sofrem decantação e devem ser removidas na etapa seguinte do tratamento.

Andreoli (2001), diz que é nesta seção que se forma o lodo, composto pelo conteúdo que foi decantado, que é acomodado na parte inferior do tanque de decantação. Este lodo é basicamente constituído por partículas de solo, matéria orgânica e subprodutos formados pela adição de substâncias químicas na água.

Filtração

Nossol *et al.* (2007), expõe que nesta etapa, a água percorre por diversas camadas filtrantes, constituídas por areia de granulometria mista, onde se dá a permanência dos flocos menores oriundos da decantação.

Richter e Netto (1991), descrevem que a origem do tratamento de água teve início na Escócia, com a construção do primeiro filtro lento por John Gibb. Quanto ao filtro rápido, seu marco inicial ocorreu no Brasil, no Rio de Janeiro, na cidade de Campos, em 1880. Di Bernardo *et al.* (1999), comenta que o filtro lento atua com uma quantidade baixa de filtração e emprega um meio filtrante de granulometria fina. Na metodologia de filtração lenta, não há demanda de utilização de coagulantes. Macêdo (2001), observa que o filtro rápido é composto de um revestimento de areia, podendo dispor de um outro que possui um meio permeável mais espesso e menos denso, como, por exemplo, o antracito que é posto acima da areia, o que possibilita maior nível de filtração.

Desinfecção, Fluoretação e Correção de pH

De acordo com o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (2006), mais conhecido como SAAE, a desinfecção é o extermínio de substâncias patogênicas que podem causar enfermidades ou outros organismos inoportunos. Para realizar a desinfecção de águas de fornecimento, é empregado um agente físico-químico, o cloro, e por isso a palavra desinfecção é frequentemente alterada por cloração. Além do cloro, há a alternativa de aplicação de outros agentes desinfectantes, como o ozônio, a luz ultravioleta e os íons de prata.

Ramires e Buzalaf (2007), explicam que a fluoretação ocorre para a prevenção de cáries dentárias. A incorporação desse produto é vista como uma questão de saúde pública sendo listada na Portaria nº 635, de 26 de dezembro de 1975, que expressa as normas e padrões a serem seguidas (BRASIL, 1975). Se não houver mais a utilização do flúor na água para consumo, a população sofrerá as consequências da carência do fornecimento desse componente para a prevenção de doenças bucais.

Segundo a Biblioteca Didática de Tecnologias Ambientais (RUTKOWSKI, 2015), para a correção do *pH* utiliza-se, na água tratada, cal tratada, carbonato de cálcio ou hidróxido de sódio. Estes produtos retiram o gás carbônico livre e estabelecem um revestimento superficial de carbonato no interior das canalizações para que não ocorra a corrosão ou avarias.

3.2.2 Geração de Resíduos

Os resíduos que são gerados em ETAs, resultam, principalmente, da limpeza dos decantadores, lavagem dos filtros, floculadores e tanques de preparação e armazenamento de

produtos químicos. Nos tanques de preparos de soluções, é utilizada a solução de cal; quanto aos produtos químicos usados em tanques de armazenamento, é empregado o cloreto férrico, sulfato de alumínio e flúor (SCALIZE, 2003).

Em geral a limpeza manual para decantadores e floculadores é executada entre 3 e 12 vezes por ano (DI BERNARDO, DANTAS, 2005b), enquanto os filtros são lavados em um período de 24 a 72h (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2002).

Di Bernardo, Dantas e Voltan *et al.* (2012), dissertam que as ETAs geram prejuízos ao meio ambiente, tendo como exemplo uma considerável produção de resíduos oriundos da descarga dos decantadores e das águas de lavagem de filtros (ALF).

Pereira *et al.* (2016), comenta a relevância do tratamento dos resíduos resultantes da ALF, que viabiliza o reaproveitamento conveniente. As águas de lavagem de filtros e a descarga de lodo dos decantadores configuram comumente entre 1 a 10% do consumo operacional da ETA.

Olinger (2002), expõe que, quanto mais ampla for a conexão entre a concentração de sólidos presentes na água bruta e a dosagem de coagulantes, ocasionará uma concentração de sólidos menor nos resíduos e a massa de resíduos formada será maior.

De acordo com Souza e Cordeiro (2004), a geração de resíduos em uma ETA é atividade das propriedades da água bruta dos mananciais, da porção e qualidade dos produtos químicos utilizados, da capacidade do procedimento do tratamento e do sistema de exclusão dos resíduos.

Grandin, Alem e Garcia (1993), expressam que os resíduos são inorgânicos e orgânicos resultantes da água bruta, como algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areia, argila, siltes, além de compostos de cálcio, magnésio, ferro, manganês, entre outros.

Barroso (2009), diz que as estações de tratamento convencionais de ciclo completo proporcionam a limpeza da água através da retirada de partículas em suspensão e dissolvidas. No decurso do procedimento, são adicionados produtos químicos para que ocorra a desestabilização das partículas e a composição de flocos. A extração dos flocos maiores é efetuada nos decantadores, e o restante é removido com a ajuda dos filtros. Portanto, as ETAs tratam a água para o uso humano e produzem resíduos no estado de lodo no decantador e água de lavagem do filtro.

3.3 Caracterização dos Resíduos

De acordo com a Norma Brasileira (NBR) 10.004 da ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), considera-se os resíduos conforme os seus potenciais riscos ambientais em classe I - perigosos, classe II A - não perigosos e não inertes, e classe II B - não perigosos e inertes. Em relação aos resíduos originados em ETAs, os mesmos pertencem à classe II A. É pertinente destacar que os resultados de análises encontrados para um resíduo podem ser diferentes de um outro, devido às suas características.

Segundo Barroso (2009), os resíduos da ETA são constituídos por componentes na fase líquida. Assim, as propriedades do lodo influenciam na eliminação da parte líquida, que é a principal fase para definição de mecanismos de retenção de volume e emprego adequado.

Di Bernardo e Dantas (2005a), explicam que em ETAs de ciclos completos, os resíduos volumétricos, pertencem às águas de lavagem de filtros, e os mássicos são provenientes do lodo dos decantadores.

Para Di Bernardo e Paz (2008), a caracterização dos resíduos existentes em uma ETA necessita ter um monitoramento das etapas das diferentes unidades de tratamento. Este monitoramento deve conter os dados da qualidade da água bruta durante todo o ano. Caso não se tenha os registros de operação da ETA, pode ser feita uma verificação do funcionamento para todas as unidades de tratamento (decantadores ou flotores e filtros) e associar a quantidade de sólidos suspensos totais retidos através do balanço de massa e confrontar os resultados obtidos com equações empíricas. Em ETA em fase de projeto, a parcela de sólidos pode ser estimada utilizando equações. No entanto, existe uma dificuldade muito grande em estimar a qualidade dos resíduos sem ter dados confiáveis da qualidade da água bruta a ser tratada e das particularidades dos produtos químicos a serem usados.

A *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), esclarece que a produção de água de lavagem dos filtros (ALF) é um resíduo da operação de uma ETA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2002). Usualmente, os filtros são retrolavados com água tratada. A demanda faz-se suficiente para ampliar o leito filtrante e liberar o material sólido bloqueado na camada filtrante e, então, é preciso a utilização de vazão acima da vazão de operação da ETA, conduzindo a produção de massa de água residuária em um curto espaço de tempo.

Conforme Molina e Santos (2010), a utilização do sulfato de alumínio para que seja feita a purificação da água, aumenta a afluência de alumínio obtida do resíduo do filtro, e também acresce às concentrações de ferro. Segundo Braga *et al.* (2007), a água de lavagem dos filtros tem um consumo entre 2 e 10% do volume total da água gerada na ETA, sendo que a composição da ALF apresenta resíduos dos coagulantes utilizados, oriundos do sulfato de alumínio ou do ferro (Richter, 2001). De acordo com Vigneswaran, Boonthanonb e Prasanthia (1996), o volume da ALF representa de 2 a 5% da água tratada em uma ETA e sua concentração de sólidos suspensos normalmente varia entre 100 a 500 mg/L.

Di Bernardo e Paz (2008), comentam que as características dos resíduos de ALF encontrados em uma ETA, se tratando de sua quantidade e qualidade, necessitam atender a algumas condições, as quais são as características da coagulação, o tipo e a dosagem de coagulante e de alcalinizante ou de acidificante; a utilização, a característica e a dosagem do auxiliar de coagulação (floculação/filtração); a qualidade da água bruta e tratamento; o procedimento de lavagem dos filtros; o método de limpeza dos decantadores (ou flotadores); a utilização de oxidante e adsorvente (carvão ativado pulverizado); a capacidade dos operadores; a automação de processos e operações da ETA; e a reutilização da água restaurada no sistema de tratamento.

Scalize (1997), expressa que a caracterização da ALF envolve a análise de parâmetros analíticos do tipo demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, sólidos sedimentáveis, *pH*, temperatura, turbidez, cor aparente, metais, condutividade elétrica, nitrogênio, fosfatos, coliformes e análise parasitológica.

Cordeiro e Souza (2002) *apud* Zipf (2010), diz que os resíduos resultantes das ETAs convencionais são conhecidos por ter um alto teor de umidade, tendo em média 95% de concentração total do lodo em forma líquida, sendo que a maior quantidade de resíduo é oriunda da ALF e, em teor de massa de sólidos, as maiores quantidades são produzidas nos decantadores.

Grandin, Alem e Garcia (1993), explicam que o lodo gerado nas ETAs é composto de argila, siltes, areia fina, material húmico (mistura complexa e heterogênea de vários compostos orgânicos) e microrganismos, bem como de produtos oriundos da etapa de coagulação.

Cordeiro (1999), expõe que as características dos lodos processados nos decantadores de uma ETA de ciclo completo podem ser diferentes de acordo com o estado apresentado da

água bruta, dosagens e produtos químicos empregados, método de limpeza dos decantadores, entre outros fatores.

Silva, Bidone e Marques (2000), salientam que a composição do lodo presente no decantador é formado de hidróxido de alumínio, vindo em boa parte da adição de produtos químicos, que podem ser tratados com a utilização de polímeros.

A Tabela 1 exhibe as propriedades (faixa de valores) das amostras da ALF e do lodo de decantadores convencionais com o uso do sulfato de alumínio, sendo estas recolhidas no decorrer da limpeza manual (DI BERNARDO; DANTAS, 2005b).

Tabela 1 – Características de amostras da ALF e do lodo de decantadores

PARÂMETROS	ALF	LODO
Turbidez (uT)	120 – 340	3.378 – 32.928
Sólidos Totais (mg/L)	490	4.954
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	157 – 428	3.920 – 22.005
Sólidos Suspensos Totais Fixos (mg/L)	110 – 340	3.200 – 17.980
Sólidos Suspensos Totais Voláteis (mg/L)	26 – 88	580 – 4.025
Sólidos Sedimentáveis em 2 horas (mL/L)	19 – 33	190
Demanda química de oxigênio (mg/L)	35 – 67	250 – 816
Ferro (mg/L)	10,00 – 27,00	290,00 – 940,00
Manganês (mg/L)	0,15 – 0,60	5,20 – 10,00
Alumínio (mg/L)	42,90	169,80

Fonte: Adaptado de Di Bernardo; Dantas (2005b)

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005b), ao olhar público que recebe a água tratada, se esta possuir características estéticas alteradas, como a cor, odor e sabor diferentes, terão a visão de uma água poluída. Estes dados nem sempre serão indícios de poluição e visando a aceitação da população, alguns parâmetros são controlados. Os autores ainda afirmam que as características físicas não têm grande importância sanitária, porém são decisivas no procedimento de tratamento da água. Entretanto, a escolha pela água de melhor aparência não assegura a qualidade adequada ao consumo (TELLES; COSTA, 2007).

Scalize (2003), revela que os fatores que abrangem os parâmetros físicos são a turbidez, a cor, a concentração de sólidos, a resistência específica, a sedimentabilidade, o tamanho e a distribuição de partículas, a massa específica e a viscosidade.

Cornwell *et al.* (1987), separam as características físicas dos resíduos da seguinte forma, as macropropriedades e as micropropriedades. As macropropriedades são a resistência específica, a sedimentabilidade, a compressibilidade e a concentração de sólidos. Já as micropropriedades são o tamanho e distribuição de partículas, a massa específica e a viscosidade. Os testes determinados como macropropriedades podem ajudar na escolha do tipo de desidratação podendo ela ser natural ou mecânica, e assim definir as dosagens adequadas de condicionantes químicos, ao passo que as micropropriedades auxiliam na hora de designar o processo que será usado para a desidratação.

Silva (2015), explica que as análises químicas da água indicam o modo mais preciso e explícito sobre as características da água. A partir de algumas dessas análises é permitido avaliar o grau de poluição. Exemplo disso, são as características encontradas na cor da água, que pode alterar de acordo com a matéria orgânica ou metais existentes na mesma. Outras características são estabelecidas através de análises de cloro e flúor, seguindo os procedimentos adequados e padronizados. Os parâmetros químicos se dividem em alcalinidade, *pH*, acidez, dureza, cloretos, sulfatos e sólidos totais, oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Esses parâmetros também podem ser utilizados para identificar se existe metais pesados na água (TELLES; COSTA, 2007).

Outro tipo importante de caracterização, são as bacteriológicas. Para esses casos, Von Sperling (2005) e Branco (2010), declaram que as bactérias do grupo coliforme são vistas como os principais indicadores de contaminação fecal, podendo identificar o grau de contaminação e a possibilidade de transmissão de doenças.

A Portaria nº 5, de setembro de 2017 (BRASIL, 2017), cita que a legislação estabelece os processos e responsabilidades pertinentes ao controle e vigilância do padrão de potabilidade e qualidade da água para consumo humano, normalizando que toda água potável determinada ao consumo humano deverá satisfazer os valores do padrão de potabilidade, estando as amostras de água livre da presença de coliformes termotolerantes (*Escherichia coli* - *E. coli*).

Richter e Netto (1991), comentam que entre as impurezas contidas na água podem estar incluídas as de origem orgânica. Os organismos presentes na água se dividem em vírus, protozoários e bactérias que podem causar doenças. Essas impurezas orgânicas contidas na água pertencem a origem animal e vegetal. Os coliformes são bactérias provenientes do

intestino de animais. A presença destes coliformes pode indicar a chance de contaminação da água. Os coliformes totais pertencem a um grupo de bactérias que utilizam a lactose como nutrientes e produzem gás. Já os coliformes fecais ou termotolerantes são bactérias de um subgrupo de coliformes totais. A diferença entre as bactérias é que a primeira fermenta entre 24 e 48 h e a segunda em 24 h (ALVES; ATAIDE; SILVA, 2018).

Conforme a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) o número mais provável (NMP) é um parâmetro usado para a análise da eficiência dos métodos de tratamento de águas e águas residuárias domésticas ou industriais, avaliação e controle da qualidade de mananciais que provêm a ETA, avaliação e controle de qualidade bacteriológica de águas destinadas ao consumo humano (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2018).

Von Sperling (2005), esclarece que com o objetivo de estabelecer um padrão de potabilidade das águas, foram criadas legislações de qualidade e potabilidade da água. Elas têm a responsabilidade de apresentar os parâmetros e seus valores de referências, em relação às características físicas, químicas e biológicas da água.

Os padrões de potabilidade da água são representados através de valores mínimos e/ou máximos consentidos pelos parâmetros determinados, sendo assim a água deve ser distribuída mantendo esses padrões (BRASIL, 2017).

Segundo a Agência Nacional de Vigilância sanitária (ANVISA) é necessário estipular parâmetros microbiológicos que indiquem os valores máximos permitidos (VMP) para coliformes totais, *Escherichia coli* e bactérias heterotróficas, conforme descrito no Quadro 1 (BRASIL, 2017).

Quadro 1 – Parâmetros Microbiológicos estabelecidos

Parâmetros	Valor Máximo Permitido
Coliformes Totais	Ausência em 100 ml em 95% das amostras examinadas no mês
<i>Escherichia coli</i>	Ausência em 100 ml
Bactérias Heterotróficas	500 UFC/mL

Fonte: Brasil (2017)

3.4 Alternativas para o Tratamento dos Resíduos de ETAs

No decorrer dos anos os resíduos líquidos produzidos nas ETAs são lançados diretamente nos cursos d'água, sem ter passado por nenhum tratamento (DI BERNARDO *et al.*, 2002). Em consequências dos impactos ambientais gerados por esse procedimento, os órgãos de controle ambiental estão se posicionando no sentido de limitar ou impedir o despejo de resíduos líquidos e lodo de ETAs diretamente nos mananciais, cujos princípios estão dispostos na Lei nº 6.938/1981 - Política Nacional de Meio Ambiente (BRASIL, 1981) e na Lei nº 9.605/1998 - Crimes Ambientais (BRASIL, 1998), que prevê multas e reclusão em regime fechado. Sendo assim, o tratamento desses resíduos precisa fazer parte de um sistema de tratamento de água (DI BERNARDO *et al.*, 2002).

Embora existam vários meios para tratamento e disposição dos resíduos produzidos em ETAs, é necessário encontrar procedimentos alternativos, tendo como objetivo a segurança do meio ambiente e menores despesas envolvidas nos métodos e operações unitárias. A forma de tratamento e disposição dos resíduos é escolhida explorando alternativas e soluções, objetivando conceitos como volume, as propriedades dos resíduos, disponibilidade de área, peculiaridades dos mananciais perto das ETAs e gastos envolvidos nas viáveis soluções. Um resultado obtido para determinado resíduo não necessariamente deve ser aplicado em outro resíduo devido às suas características, pois variam muito entre ETAs (SCALIZE, 2003).

Cornwell *et al.* (1987), apresenta que o lodo produzido em ETAs apresenta um valor elevado de água na faixa de 97% a 99,9% e a maior parte desse lodo precisa passar por alguma forma de tratamento antes de ser determinado o destino final. Um dos tratamentos que resulta no aumento da concentração de sólidos no lodo é por meio de adensamento e desidratação. Segundo Reali (1999) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), os meios para diminuir o volume de lodo nas estações de tratamento se dividem em dois, podendo eles serem naturais ou mecânicos, sendo os naturais divididos em leito de secagem e lagoas de lodo e quanto aos mecânicos podemos ter centrífugas, hidrociclones, filtro-prensa e filtro à vácuo.

O tratamento do lodo de ETA é realizado para diminuir cada vez mais o teor de umidade, com objetivo de reduzir ao máximo o volume possível de resíduos para disposição final. Seguindo esse sequenciamento do lodo, o Quadro 2 relata as principais etapas para o tratamento do lodo segundo Lustosa *et al.* (2016).

Quadro 2 – Etapas do tratamento do lodo na ETA

Etapa	Função
Adensamento	Redução de volume
Condicionamento	Preparação para a desidratação, como a adição de polímeros
Desaguamento, desidratação, secagem ou incineração	Redução do Volume
Disposição final	Lançamento em lagoas, descarga em curso d'água, solo, aterros ou recirculação da água

Fonte: Adaptado de Lustosa *et al.* (2016); Rubim (2013)

De acordo com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), o chamado “adensamento” é um procedimento de aumento da taxa de sólidos do lodo e a diminuição do seu volume, pode acrescer o teor de sólidos no lodo de 1% para 5% (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2015). Reali (1999), apresenta que as formas de adensadores mais habituais são por flotação e por gravidade. A utilização por gravidade é mais comum no tratamento de resíduos de ETA, visto que neste o lodo pode ser alimentado por batelada ou continuamente. No caso da flotação é utilizado um sistema por ar dissolvido que funciona a partir de um método onde microbolhas são produzidas na câmara de saturação, de modo que essas bolhas reúnam-se no interior dos flocos. Esses flocos e microbolhas tem uma densidade aparente menor que a do meio onde estão, o que garante, através do empuxo, a sua flotação até a superfície do flotor, onde são removidas (VALCORTE; HEDLUND; CARISSIMI, 2017).

A fase de condicionamento consiste na separação sólido-líquido e, para isso, é necessária a adição de polímero que auxilia na separação das impurezas (YUZHU, 1996). O condicionamento pode ser químico ou físico e a forma escolhida vai depender das características do lodo e também do local devido às particularidades de cada região. No condicionamento químico é efetuada a adição de polímeros podendo eles serem naturais ou artificiais e, o uso de cada um vai estar ligado às características dos resíduos produzidos. Já no condicionamento físico a sua realização é possível pela prática de congelamento-degelo vista em países com um clima mais frio. Este meio gera mudanças físicas no lodo, fazendo com que ocorra a remoção da água e também destruindo a sua estrutura coloidal (SCALIZE, 2003).

Conforme a SABESP (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2015), a fase de desaguamento, que seria escoar a água, baseia-se na diminuição da umidade do resíduo. Esta desidratação acontece quando coloca-se a água do lodo sob alta pressão. Os principais benefícios deste procedimento é o aumento das concentrações de sólidos de 1% para até 3% por meio da remoção de água livre e a alta captura de sólidos. Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), falam que cada método de desaguamento tem suas vantagens e desvantagens. Para escolher a melhor alternativa, a realização de ensaios preliminares é necessária. Os sistemas mecânicos têm um grande custo para aquisição e manutenção, e consomem energia e produtos químicos. No que tange aos sistemas naturais, estes necessitam de amplas áreas e dependem de determinadas circunstâncias climáticas para seu funcionamento.

A desidratação tem por objetivo a redução do volume do lodo e pode ser realizada de forma natural ou mecânica. No processo de desidratação natural a remoção da água é feita por evaporação natural e drenagem através de gravidade ou induzida. Devido a razões econômicas e operacionais, as ETAs que produzem um baixo volume de lodo utilizam a desidratação natural (CORNWELL; KOPPERS, 1990). A desidratação mecânica é recomendada para ETAs que tenham uma disponibilidade de área menor (SCALIZE, 2003). Souza (2012), ressalta que o procedimento de desidratação mecânica, que é o mais comumente usado pelas ETAs, pode produzir lodos com teores de sólidos de 20% a 30%, podendo variar de acordo com as particularidades do lodo, como também da tecnologia de desidratação escolhida.

Di Bernardo, Dantas e Voltan *et al.* (2012), explica que o método de secagem do lodo desaguado tem como finalidade a diminuição do volume de resíduo que será queimado, ou que será reusado, ou posto em locais próprios. Quanto maior a taxa de sólidos suspensos totais, ou menor a umidade do lodo, menor quantidade de energia gasta para secar a substância. No procedimento de secagem, é comum atingir um teor de sólidos entre 40% e 80%, entretanto, depende muito da tecnologia adotada na secagem.

Para Rubim (2013), a incineração é aconselhada como opção de tratamento e destino no caso de grandes quantidades de resíduos, com volumes superiores a 2.250 toneladas ao ano. A incineração efetua a estabilização e diminuição de volume, e recuperação de energia do lodo. Propicia uma maior redução no volume do resíduo para disposição final futura.

Na disposição final ocorre o lançamento do resíduo líquido integralmente ou, depois de um tratamento, da parte clarificada e o lodo produzido. No passado, era mais utilizado o lançamento nos cursos d'água ou em lagoas de lodo, estes eram os meios mais usados para

disposição final dos resíduos de ETAs. Atualmente existem alguns meios alternativos, como por exemplo, recirculação da água, disposição no solo, em aterros sanitários e lançamento nas estações de tratamento de esgoto (MURRAY; DILLON, 1994).

Além de todos os métodos citados, existem ainda os hidrociclones que participam de um conjunto de equipamentos que são destinados à separação sólido-líquido e líquido-líquido, por meio de um campo centrífugo (CHINÉ; CONCHA, 2000). A utilização de hidrociclones em ETAs é devido a sua praticidade e tamanho, sendo eles equipamentos sem partes móveis, de fácil execução e que necessitam somente de bombas centrífugas para sua alimentação (ANDRADE, 2007).

3.5 Hidrociclone

Os procedimentos de separação são indispensáveis na etapa produtiva das indústrias. Sendo difícil apontar um processo em larga escala que não tenha a necessidade da separação sólido-líquido. Isso se dá pela necessidade de pureza dos produtos em algumas etapas, tendo grande relevância em indústrias químicas, petroquímicas, entre outros segmentos (SILVA, 2014; ALMEIDA, 2008).

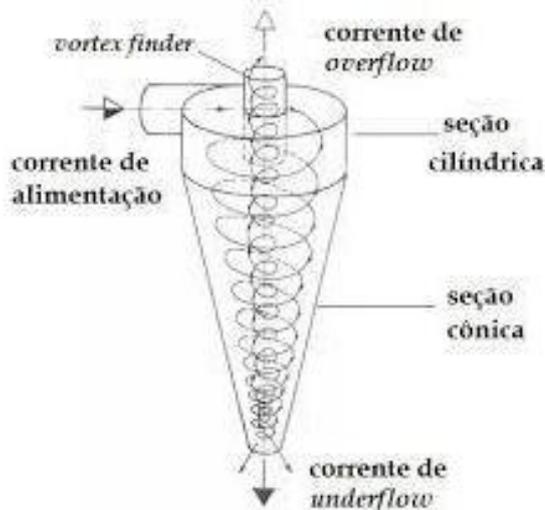
O hidrociclone, conhecido como cone de separação ou separador centrífugo, é utilizado sobretudo para separação de suspensões sólido-líquido, mas também pode ser usado na separação líquido-líquido e gás-líquido (SOCCOL, 2003).

Os equipamentos ciclônicos sejam eles ciclones ou hidrociclones não contêm partes móveis. Em comparação com as centrífugas, estes dispositivos são mais simples e o custo de investimento é menor, tanto para operação e manutenção, entretanto, opera com campos centrífugos de menor intensidade (FREITAS, 2009).

Svarovsky (2000), diz que cada uso do hidrociclone têm funções diferentes e necessitam de um projeto e operação do separador exclusivamente para adequar-se a cada função. Já Silva (2014), acrescenta mais algumas vantagens que o hidrociclone proporciona, como a sua versatilidade, a fácil preparação e também suas pequenas dimensões em relação à instalação. Sampaio, Oliveira e Silva (2004), comentam que o hidrociclone pode ser usado para classificar sólidos por tamanho, retirar sólidos suspensos em fluido, separar líquidos imiscíveis de diferentes densidades, retirar a água de suspensões para fornecer um produto mais concentrado, classificar líquidos, separar dispersões líquido-líquido e líquido-gás, remover gases dissolvidos em líquidos, na deslamagem de minérios para flotação e em espessamento de lamas.

A Figura 2 ilustra a trajetória do fluido dentro do hidrociclone, bem como as partes que o compõe e menciona todas entradas e saídas do equipamento (Svarovsky, 1984).

Figura 2 - Movimento que o fluido percorre no interior do hidrociclone



Fonte: Svarovsky (1984)

Conforme a Figura 2, o hidrociclone é composto por duas partes, sendo elas a seção cilíndrica e uma parte cônica. Possui uma corrente de entrada denominada de alimentação e duas correntes de saída, uma no topo chamada de *overflow* e outra no fundo conhecida como *underflow*. A alimentação é feita a partir de um tubo que entra tangencialmente pelo topo da seção cilíndrica. A solução faz um movimento rotacional percorrendo o equipamento, sendo este conhecido por vórtice primário. Durante o trajeto esse movimento provoca acelerações centrífugas nas partículas e estas rumam para a parede da parte cônica do hidrociclone. As partículas que acertam a parede têm os diâmetros maiores ou são mais densas e as com diâmetros menores ou menos densas são orientadas ao centro do equipamento (SILVA, 2014). Na parte central do hidrociclone ocorre um vórtice que tende a mover-se para cima, denominado de vórtice secundário. Isso acontece devido ao fato do escoamento ser invertido na região inferior do equipamento, pois é nesta área que ocorre o estrangulamento no *apex* do hidrociclone (outra saída). Esse faz com que o fluxo que está englobando as partículas menores e menos densas sejam conduzidas pelo vórtice secundário enviadas para o orifício superior, chamado de *vortex finder*. Já a solução que foi diluída sairá pela corrente *overflow*. A abertura do *apex* tem um diâmetro menor e com isso somente uma pequena parte do líquido passará junto às partículas mais densas e maiores pela corrente *underflow*, sendo ela a solução concentrada (SOCCOL, 2003).

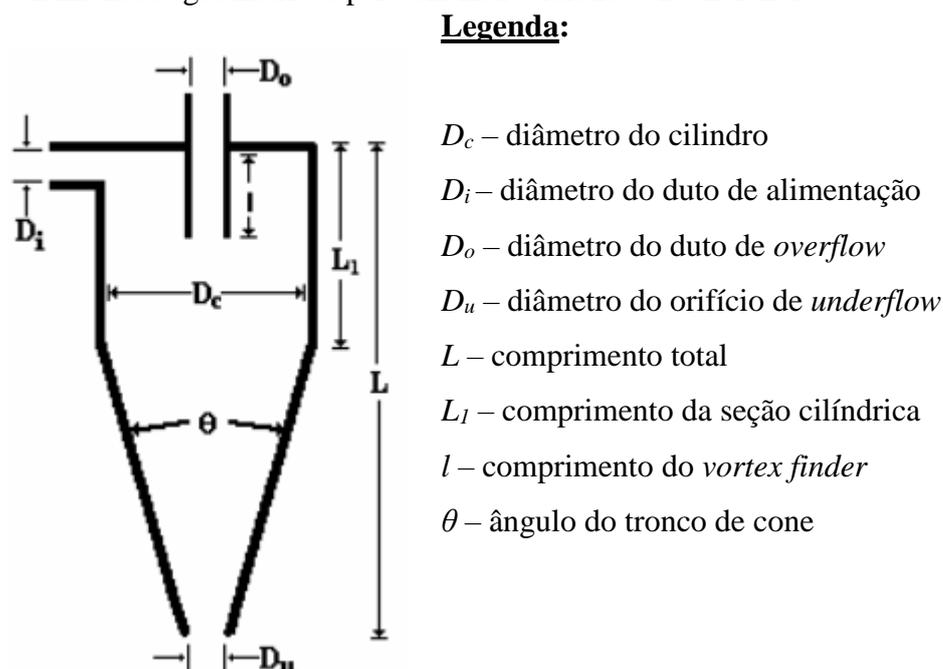
De acordo com Vieira (2006), os hidrociclones são categorizados em famílias, e cada uma delas determina um grupo específico de dimensões com o objetivo de que os separadores estejam o mais próximos possível entre si, independentemente da diferença de tamanho. Assim, determinou-se uma concordância exclusiva e estável em suas dimensões geométricas essenciais, como diâmetro da parte cilíndrica e outras medidas do dispositivo. Segundo Cremasco (2012), dentre as famílias clássicas pode-se evidenciar as mais usadas, como, por exemplo, a de *Bradley* e *Rietema*. As principais dimensões geométricas relacionadas a essas famílias podem ser vistas na Tabela 2. Também na Figura 3 são mostradas as dimensões geométricas para um hidrociclone convencional.

Tabela 2 – Relações geométricas encontradas para algumas famílias clássicas dos hidrociclones

FAMÍLIAS	D_c [m]	D_i/D_c	D_o/D_c	l/D_c	L/D_c	ÂNGULO
<i>Rietema</i>	0,075	0,280	0,340	0,400	5,00	20°
<i>Bradley</i>	0,038	0,133	0,200	0,330	-	9°

Fonte: Adaptado de Cremasco (2012); Vieira (2006)

Figura 3 – Dimensões geométricas para um hidrociclone convencional



Fonte: Adaptado de Andrade (2007)

Ressalta-se aqui, que para a obtenção de todas as dimensões mostradas na Tabela 2 e na Figura 3, é necessário que se determine o diâmetro de corte do hidrociclone (D^*). De acordo

com Massarani (2001), o D^* pode ser determinado como o diâmetro das partículas que são coletadas com uma eficiência de 50% no dispositivo de separação. Conforme a Equação 1,

$$\frac{D^*}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho_f)} \right]^{1/2} f(R_L) g(c_v) \quad (1)$$

onde D_c é o diâmetro da parte cilíndrica do ciclone, K é um parâmetro que depende da configuração, μ é a viscosidade do fluido, Q é a vazão de fluido, ρ_s é a massa específica da fase sólida, ρ_f é a massa específica da fase fluida, $f(R_L)$ é um fator de correção que considera o fato de que uma fração das partículas sólidas é coletada no "underflow" sem a ação do campo centrífugo (efeito "T") e $g(c_v)$ é um fator que leva em consideração a concentração volumétrica de sólidos na alimentação. Para a determinação do $f(R_L)$ e do $g(c_v)$ são utilizadas as Equações de 2 a 4:

$$f(R_L) = 1 + AR_L \quad (2)$$

$$R_L = B \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^C \quad (3)$$

$$g(c_v) = 1 / [4,8(1 - c_v)^2 - 3,8(1 - c_v)]^{0,5} \quad (4)$$

onde os parâmetros A , B , e C são pertinentes à configuração do ciclone. Segundo Massarani (2002), os valores dos parâmetros de A , B , C e K estão reunidos na Tabela 3, das quais a validade está limitada às condições operacionais apontadas na mesma Tabela.

Tabela 3 – Parâmetros de configuração do hidrociclone e suas condições operacionais aconselhadas

FAMÍLIAS	K	A	B	C	Re^*	D_u/D_c
<i>Rietema</i>	0,039	1,73	145	4,75	5×10^3 a 5×10^4	0,1 - 0,3
<i>Bradley</i>	0,016	1,73	55,3	2,63	3×10^3 a 2×10^4	0,07 – 0,15

Fonte: Adaptado de Massarani (2002)

4 ARTIGO

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO PARA O PROJETO DE HIDROCICLONES NO ADENSAMENTO DO LODO GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Ronaldo Teixeira Ximendes¹
André Ricardo Felkl de Almeida²

RESUMO

Os Hidrociclones têm aplicação em diversos ramos como processos de separação sólido-líquido, sendo utilizados em indústrias, contudo quando se trata de Estações de Tratamento de Água (ETAs) a sua utilização é considerada uma inovação. O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia de cálculo para projeto de hidrociclones no adensamento do lodo gerado nas ETAs. Através de pesquisas em diversos artigos científicos foi obtido os dados sobre o lodo de ETAs. A partir desses dados foi possível projetar hidrociclones com a utilização das equações propostas por Massarani (2002) para hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*. A análise de sensibilidade paramétrica foi efetuada para avaliar os hidrociclones projetados quanto a sua eficiência de separação. Por meio desta análise foram alteradas propriedades físicas do lodo e variáveis de processos para constatar a eficiência de separação da metodologia realizada. Os resultados encontrados confirmam que os dois tipos de hidrociclones projetados nesse estudo são capazes de ser utilizados como uma alternativa viável para o adensamento de lodo nas ETAs.

Palavras-chaves: Hidrociclones. Estações de Tratamento de Água. Metodologia.

1 INTRODUÇÃO

A água tem importância fundamental para a vida dos seres vivos e seu uso é imprescindível para as atividades humanas, tal como, o abastecimento público e industrial, a irrigação agrícola, a produção de energia elétrica, as atividades de lazer, assim como a conservação do bioma marinho (ABREU, 2009). O aumento da demanda populacional e industrial e a qualidade da água proveniente de mananciais são fatores que influenciam de modo direto nos processos de tratamento, assim como a tecnologia a ser empregada, que varia de acordo com a destinação da água, requerendo cautela por parte dos encarregados pelos sistemas de abastecimento (ARAÚJO; DUARTE; TERTO, 2018).

Ao longo dos anos os resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) eram descartados diretamente no curso d'água, sem qualquer tratamento prévio. Os efeitos gerados por esse processo, fez com que os órgãos de controle ambiental se posicionassem

¹ Graduando em Engenharia Química - Universidade Federal do Pampa.
E-mail: txronaldo@hotmail.com

² Orientador e professor do Curso de Engenharia Química - Universidade Federal do Pampa.
E-mail: andrealmeida@unipampa.edu.br

quanto a esse procedimento, limitando ou até mesmo detendo o despejo desses resíduos diretamente nos mananciais (SCALIZE, 2003; DI BERNARDO *et al.*, 2002).

Sendo assim, torna-se necessário encontrar métodos alternativos de tratamento desses resíduos que priorizem a segurança do meio ambiente, e também agregando uma diminuição nos gastos (SCALIZE, 2003; DI BERNARDO *et al.*, 2002). Pereira *et al.* (2016), expressa a relevância do tratamento dos resíduos resultantes da água de lavagem dos filtros (ALF), e que o seu reaproveitamento seria viável. A descarga de lodo dos decantadores e a ALF, equivalem entre 1 a 10% do escoamento operacional da ETA. Di Bernardo e Dantas (2005a), revelam que em ETAs de ciclos completos, os resíduos volumétricos, estão relacionados às ALF, e os mássicos são oriundos do lodo dos decantadores. Já Grandin, Alem e Garcia (1993), explicam que o lodo gerado nas ETAs é composto de argila, siltes, areia fina, uma mistura de vários compostos orgânicos e microrganismos, como também de produtos oriundos da etapa de coagulação.

Os hidrociclones, são conhecidos como cone de separação ou separador centrífugo e são empregados sobretudo para separação de suspensões sólido-líquido (S-L), como também pode ser utilizado na separação líquido-líquido (L-L) e gás-líquido (G-L) (SOCCOL, 2003). Os equipamentos ciclônicos não contêm partes móveis em sua estrutura, independente de ser ciclones ou hidrociclones. Em comparação com as centrífugas, os hidrociclones são mais simples e o custo de investimento é menor, em consideração a operação e manutenção, no entanto, opera com campos centrífugos de menor intensidade (FREITAS, 2009).

Svarovsky (2000), fala que a utilização dos hidrociclones têm funções diferentes e carecem de um projeto e operação do separador exclusivamente para adequar-se a cada função. Silva (2014) expõe algumas vantagens que o hidrociclone apresenta, como a sua versatilidade, a fácil preparação e suas pequenas dimensões em relação à instalação.

Sampaio, Oliveira e Silva (2004), comentam a aplicabilidade de como os hidrociclones podem ser usados, como por exemplo, para classificar sólidos por tamanho, retirar sólidos suspensos em fluido, separar líquidos imiscíveis de diferentes densidades, retirar a água de suspensões para fornecer um produto mais concentrado, classificar líquidos, separar dispersões líquido-líquido e líquido-gás, remover gases dissolvidos em líquidos, na deslamagem de minérios para flotação e em adensamento de lamas.

Diante dos usos dos hidrociclones mencionados, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia de cálculo para o projeto de hidrociclones no adensamento do lodo gerado e realizar a sua análise de sensibilidade, visando uma alternativa viável para o tratamento do lodo produzido em ETAs.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERÍSTICAS DO LODO

O material utilizado para o desenvolvimento do presente estudo foi obtido através de pesquisas em diversos artigos científicos sobre o lodo de ETAs e os dados coletados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização do lodo em ETAs

(continua)						
<i>ETAs</i>	<i>Q (m³/s)</i>	<i>ρ_s (Kg/m³)</i>	<i>d_p(m)</i>	<i>C_v</i>	<i>Autores</i>	<i>Ano</i>
Anápolis - GO	0,86	-	-	-	Oliveira C.A.; Barcelo W.F.; Colares C.J.G.	2012

Tabela 1 – Caracterização do lodo em ETAs

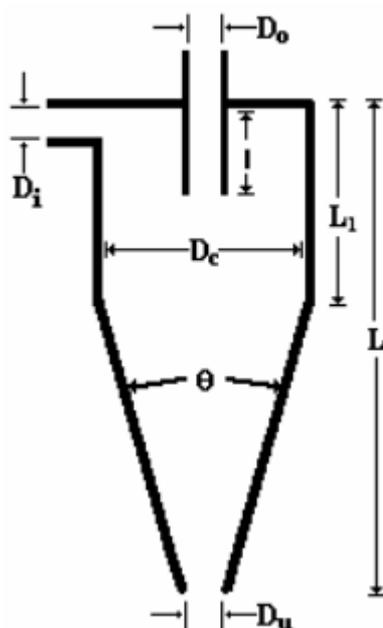
					(conclusão)	
Passaúna - PR	1,2	1002-1500	-	-	Fernandez, L. P.; Mikowski, P. C. B.	2016
Formiga - MG	0,20	1160	-	-	Amâncio D.V <i>et al.</i>	2017
Franca - SP	0,84	-	$1,20 \times 10^{-6}$	0,03	Katayama V. T	2012
Cubatão - SC	1,65	1780	$3,80 \times 10^{-5}$ a $5,10 \times 10^{-5}$	0,52	Margem J.I, Katayama V. T	2008/ 2012
Presidente Prudente - SP	0,70	-	-	0,08	Katayama V. T	2012

Fonte: Autores (2021)

2.2 DIMENSIONAMENTO DO HIDROCICLONE

Os hidrociclones, de acordo com a Figura 1, são constituídos por uma parte cilíndrica superior, relacionada com a capacidade de processamento, e uma parte cônica, que fica encarregada pela eficiência da coleta de sólidos. O diâmetro da parte cilíndrica é representado por D_c , o diâmetro de alimentação D_i , os diâmetros de *overflow* D_o e *underflow* D_u , o ângulo θ da parte cônica, a altura da parte cilíndrica L_1 , altura total L , e altura da secção de *overflow*, denominada *vortex finder* (MOURA, 2015).

Figura 1 – Dimensões do hidrociclone



Fonte: Adaptado de Andrade (2007)

Na entrada do hidrociclone a solução realiza um movimento rotacional que percorre até a base, sendo este movimento o vórtice primário, enquanto aos sólidos se dirigem a parede do equipamento. As partículas que acertam a parede têm os diâmetros maiores ou são mais densas e as com diâmetros menores ou menos densas são direcionadas para o centro do equipamento.

Na parte central do hidrociclone dá-se um vórtice que tende a deslocar-se para cima, este é conhecido por ser o vórtice secundário. Isso ocorre em função do escoamento ser invertido na região inferior do equipamento, portanto é nesta área que acontece o estrangulamento no *apex* do hidrociclone. Esse faz com que o fluxo que está abrangendo as partículas menores e menos densas sejam guiadas pelo vórtice secundário e encaminhadas para o orifício superior, denominado de *vortex finder*. Já a solução que foi diluída sairá pela corrente *overflow*. A abertura do *apex* tem um diâmetro menor e desse modo somente uma pequena parte do líquido passará junto às partículas mais densas e maiores pela corrente *underflow*, sendo esta a solução concentrada (SOCCOL, 2003; CREMASCO, 2012 e SILVA, 2014). Segundo Cremasco (2012), os parâmetros geométricos dos hidrociclones dependem da família na qual ele faz parte. Sobre as famílias clássicas é possível apontar como as mais utilizadas *Bradley* e *Rietema*.

A eficiência individual de coleta (η) dos hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*, relativa ao diâmetro médio das partículas (d_p) e do diâmetro de corte (D^*) foi obtida conforme a Equação 1 (Massarani, 2002):

$$\eta \left(\frac{d_p}{D^*} \right) = \frac{\exp\left(5\frac{d_p}{D^*}\right) - 1}{\exp\left(5\frac{d_p}{D^*}\right) + 146} \quad (1)$$

Na qual ao fixar um valor para η e tendo o conhecimento de d_p é obtido valor de D^* . Com o valor de D^* , determina-se o diâmetro da parte cilíndrica dos hidrociclones (D_c) a partir das equações 2,3,4 e 5 (Massarani, 2002).

$$\frac{D^*}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho_F)} \right]^{1/2} f(R_L) g(c_v) \quad (2)$$

$$f(R_L) = 1 + AR_L \quad (3)$$

$$R_L = B \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^C \quad (4)$$

$$g(c_v) = 1/[4,8(1 - c_v)^2 - 3,8(1 - c_v)]^{0,5} \quad (5)$$

Na Equação 2, Q é a vazão de fluido, ρ_s é a massa específica da fase sólida, ρ_F é a massa específica da fase fluida, $f(R_L)$, obtido pela Equação 3, é um fator de correção que considera o fato de que uma fração das partículas sólidas é coletada no "*underflow*" sem a ação do campo centrífugo (efeito "T") e $g(c_v)$ e um fator que leva em consideração a concentração volumétrica de sólidos na alimentação. Para a determinação do $f(R_L)$ e do $g(c_v)$ são utilizadas as Equações de 3 a 5. Os parâmetros K , A , B e C visto das equações 2,3 e 4 são tabelados para cada família de hidrociclones, onde os valores estão dispostos na Tabela 2 (Massarani, 2002).

Tabela 4 – Relações geométricas para *Rietema* e *Bradley*

FAMÍLIAS	D_i/D_c	D_o/D_c	l/D_c	L_1/D_c	L/D_c	ÂNGULO
<i>Rietema</i>	0,28	0,34	0,40	-	5	10° - 20°
<i>Bradley</i>	1/7	1/5	1/3	1/2	-	9°

Fonte: Massarani (2002)

2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

Com os dados de projeto dos hidrociclones, foi realizado uma análise de sensibilidade paramétrica. Nessa análise, os parâmetros observados foram a eficiência individual de coleta dos hidrociclones frente a variações na Q , ρ_s , C_v e d_p . Também se verificou a queda de pressão em função da variação de alimentação do efluente. Para essa última foi utilizado também as Equações 6 e 7 (Massarani, 2002), onde u_c é a velocidade média na seção cilíndrica.

$$-\Delta P = \beta \frac{\rho_F u_c^2}{2} \quad (6)$$

$$u_c = \frac{Q}{\pi D_c^2 / 4} \quad (7)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 é apresentado os valores adotados para a caracterização física e granulométrica do lodo de ETAs.

Tabela 3 – Valores empregados na caracterização física e granulométrica do lodo de ETAs

ρ (Kg/m ³)	ρ_s (Kg/m ³)	d_p (m)	C_V (%)
998,2	1008	$3,80 \times 10^{-5}$	3,00

Fonte: Margem J.I (2008); Katayama V. T(2012) ; Oliveira C.A.; Barcelo W.F. e Colares C.J.G.(2012)

O valor utilizado para ρ_s foi de 1008 Kg/m³, segundo Richter (2001), a massa específica do lodo pode variar entre 1002 a 1500 Kg/m³ após a etapa de desaguamento, em caso de sólidos secos e possível adotar até 1800 Kg/m³. Richter (2001) ainda comenta que o lodo com concentração entre 0 a 5% apresenta uma fase líquida e, desse modo, o C_V empregado é referente a ETA de Franca - SP que corresponde a 3%. Para d_p foi adotado 38 μ m, apresentado por Margem (2008). Esse autor, ressalta ainda que entre 30% a 40% das partículas do lodo da ETA de Cubatão – SC estão acima de 20 μ m.

A Tabela 4 exibe os valores para R_L , $f(R_L)$, $g(C_V)$, calculados para hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*, aplicando uma vazão de alimentação (Q) de 0,86 m³/s, dado esse referente a ETA de Anápolis – GO (OLIVEIRA; BARCELO E COLARES, 2012).

Tabela 4 – Valores obtidos de R_L , $f(R_L)$, $g(C_V)$, para hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*

<i>Rietema</i>			<i>Bradley</i>		
R_L	$f(R_L)$	$g(C_V)$	R_L	$f(R_L)$	$g(C_V)$
0,069	1,120	1,097	0,167	1,288	1,097

Fonte: Autores (2021)

Percebe-se na Tabela 4 que a razão de líquido R_L não são iguais para os dois tipos de hidrociclone. De acordo com Massarani (2001), quanto menor for o valor encontrado para R_L menor será a quantidade de líquido saindo no *underflow*. O hidrociclone do tipo *Rietema* dispõe de uma capacidade maior para o adensamento do lodo em comparação ao hidrociclone *Bradley*.

Na Tabela 5 é exposto os valores encontrados para as dimensões características para hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*, levando em consideração os valores calculados da Tabela 4 e com uma eficiência de coleta (η) de 90%.

Tabela 5 – Dimensões características para hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*

<i>Família</i>	D_c (cm)	D_i (cm)	D_o (cm)	L (cm)	L_I (cm)	l (cm)
<i>Rietema</i>	13,68	3,83	4,56	68,42	-	5,47
<i>Bradley</i>	22,58	3,23	4,52	-	11,29	7,53

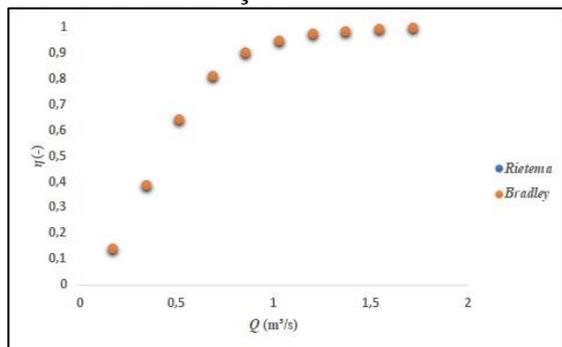
Fonte: Autores (2021)

A Tabela 5 indica as diferenças existentes entre as dimensões características em um comparativo entre os dos hidrociclones. O valor de D_c tem a maior das diferenças entre as dimensões e, nesse caso, o hidrociclone do tipo *Bradley* é aproximadamente 9cm maior que o valor obtido para o hidrociclone do tipo *Rietema*. Segundo Gonçalves (2016), os hidrociclones do tipo *Rietema* tem a extensão da parte cilíndrica maior que o corpo do cone, e é conhecido

por exibir uma alta capacidade, isto é, um baixo gasto energético. Já o hidrociclone do tipo *Bradley* apresenta um corpo de cone maior e um ângulo menor, sendo que este tipo de hidrociclone é classificado como de alta eficiência, contudo tem um maior gasto energético.

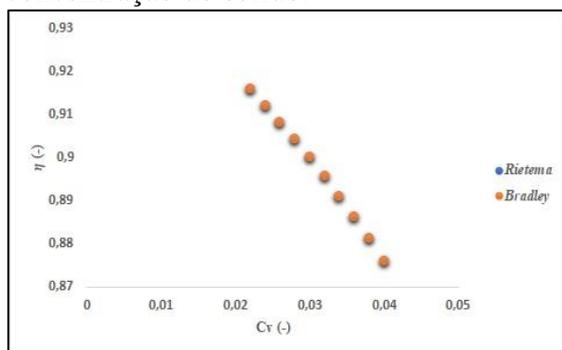
Nas Figuras 2 a 5 é exibido os resultados da análise de sensibilidade paramétrica para os hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*.

Figura 2 – Desempenho da eficiência de coleta relacionada a uma variação em sua vazão de alimentação.



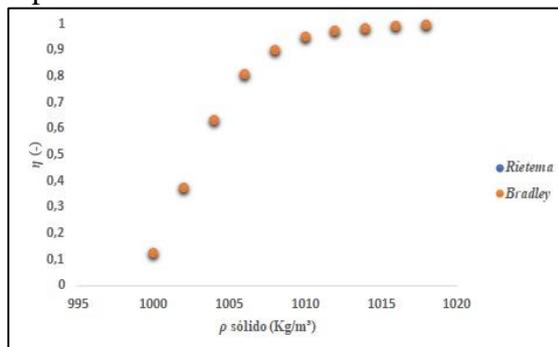
Fonte: Autores (2021)

Figura 4 – Desempenho da eficiência de coleta relacionada a uma variação na concentração do sólido.



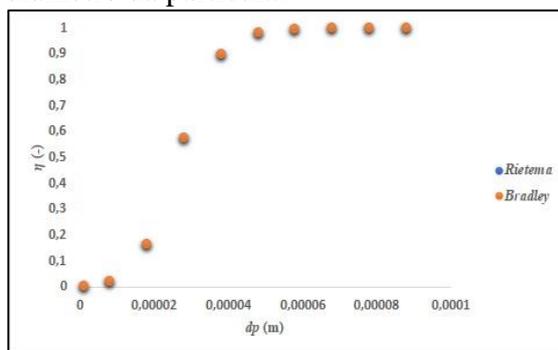
Fonte: Autores (2021)

Figura 3 – Desempenho da eficiência de coleta relacionada a uma variação na massa específica do sólido.



Fonte: Autores (2021)

Figura 5 – Desempenho da eficiência de coleta relacionada a uma variação do diâmetro da partícula.



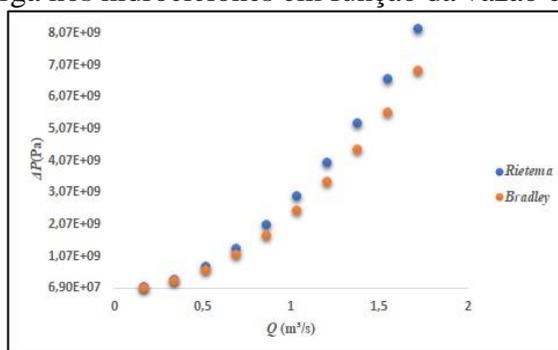
Fonte: Autores (2021)

Na Figura 2, é observado em ambos os tipos de hidrociclone que a eficiência aumenta conforme o aumento de vazão. Marques (2012) comenta que este resultado é o esperado visto que a eficiência de coleta é uma função relacionada diretamente proporcional a vazão e consequentemente se houver um aumento progressivo da vazão ocorrerá um aumento na eficiência de coleta do dispositivo. Em relação a Figura 3, é visto um aumento na eficiência para os dois hidrociclones conforme a massa específica das partículas (ρ_s) aumenta. Tal acontecimento se dá pela diferença entre as massas específicas do fluido e do sólido, sendo que é esta variação possibilita a separação, o que se amplia aos poucos com a massa específica do sólido, para o fluido determinado (MARQUES, 2012). O gráfico presente na Figura 4 indica que ao aumentar a concentração de sólidos (C_V) na alimentação dos hidrociclones, ocorre uma diminuição na eficiência de coleta. Massarani (2002) expressa que isso acontece por causa da velocidade terminal da partícula que sofre uma diminuição em função da presença de outras partículas, deste modo a concentração de partículas influencia consideravelmente na velocidade de uma partícula, ocasionando uma redução de eficiência no dispositivo. A Figura

5 mostra que com o aumento do diâmetro da partícula (d_p) os hidrociclones tem uma eficiência de coleta maior. Este comportamento é esperado, devido a eficiência ser uma função diretamente proporcional ao diâmetro da partícula, como nos mostra a Equação 1 proposta por Massarani (2002). Percebe-se também que as partículas com diâmetro maior que $3,8 \times 10^{-5}$ possuem uma eficiência de coleta igual ou superior a 90%.

A Figura 6 apresenta a análise de perda de carga nos Hidrociclones (Δp) do tipo *Rietema* e *Bradley* variando a vazão do efluente (Q).

Figura 6 – Perda de carga nos hidrociclones em função da vazão do efluente.



Fonte: Autores (2021)

Nota-se pela Figura 6 que a perda de carga teve um aumento frente a mudança de vazão para os hidrociclones *Rietema* e *Bradley*. Essa ocorrência ligando ao fato da eficiência de coleta em função da alimentação mostrada na Figura 2, nos diz que ao aumentar a vazão haverá também um aumento de eficiência e com isso a queda de pressão sofrera um aumento significativo. Outro dado importante visto na curva da Figura 6 é que o hidrociclone do tipo *Rietema* teve uma queda de pressão em função da vazão mais acentuada. O D_c do hidrociclone *Rietema* conforme a Tabela 5 é menor que o do hidrociclone do tipo *Bradley* e quanto maior o D_c menor é a sua perda de carga no escoamento (MOURA, 2015).

4 CONCLUSÃO

Buscando uma alternativa viável para o tratamento de resíduos em Estações de Tratamento de Água e também como uma forma de reduzir os impactos gerados ao meio ambiente, o presente trabalho mostra que o uso dos hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley* gera resultados com uma boa eficiência quando se trata de desidratação do lodo de Estações de Tratamento de Água. Nesse sentido, apesar dos dois hidrociclones serem eficientes, o hidrociclone do tipo *Rietema* se mostra mais apropriado para o adensamento do lodo gerado em Estações de Tratamento de Água devido a sua razão de líquido (R_L) ser menor, o que influencia na quantidade que sairá pela corrente *underflow* do hidroclone.

5 REFERÊNCIAS

ABREU, S. B. **Comportamento de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento mediante o emprego de polímeros como auxiliares de filtração**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-09092009-141154/publico/Tese_Doutorado_Final.pdf. Acesso em: 02 abr. 2021.

AMÂNCIO, D. V. *et al.* Caracterização do lodo gerado numa estação de tratamento de água. **Sustentare**, Três Corações, v. 1, n. 1, p. 29-44, 2017. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2020/04/caracterizacao-lodo-estacao-tratamento-agua.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2021.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados**. São Paulo: Edgard Blucher, 2012.

DI BERNARDO, L. *et al.* **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estacoes de tratamento de água**. São Carlos: RiMa Editora, 2002.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed., São Carlos: RiMa, 2005a. v. 1.

FERNANDEZ, L. P.; MIKOWSKI, P. C. B. **Avaliação da viabilidade da utilização de lodo de estação de tratamento de água em peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2016. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8067/1/CT_COECI_2016_2_20.pdf. Acessado em: 07 abr. 2021.

FREITAS, A. G. B. **Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclones**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, São Cristóvão, 2009. Disponível em: https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/5058/1/ANDREA_GONCALVES_BUENO_FREITAS.pdf. Acessado em 05 abr. 2021.

GONÇALVES, S.M. **Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais no desempenho de um hidrociclone concentrador**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17803/1/EfeitoConcentra%C3%A7%C3%A3oSolidos.pdf>. Acessado em 05 abr. 2021.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JÚNIOR, A. D. Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de Água. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 17., 1993, Natal. **Anais** [...]. Natal: ABES, 1993. p. 324-341. Acesso em: 25 mar. 2021.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica, São Paulo, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-19072013-161144/publico/Dissertacao_Victor_FINAL_CORRIGIDO.pdf. Acessado em 05 abr. 2021.

MARGEM, J. I. **Caracterização e incorporação de lodo de decantação de estação de tratamento de água (E.T.A) em cerâmica vermelha**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF. Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Campo dos Goytacazes, 2008. Disponível em: http://www.uenf.br/Uenf/Downloads/PosMateriais_4042_1236260779.pdf. Acessado em 05 abr. 2021.

MARQUES, L. F. **Análise e projeto de hidrociclones para espessar os resíduos oriundos do abate de aves**. 2012. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2012.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 3. ed., Rio de Janeiro: e-papers, 2002.

MOURA, A. D. D. **Análise e projeto de hidrociclones para o espessamento do lodo gerado no tratamento de efluentes de indústrias têxteis**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa. Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia, Bagé, 2015. Disponível em: http://dspace.unipampa.edu.br:8080/bitstream/riiu/1257/1/dissertacao_artur_mestrado_engenharia.pdf. Acessado em 05 abr. 2021.

OLIVEIRA, C.A.; BARCELO, W. F.; COLARES, C. J. G. Estudo do reaproveitamento da água de lavagem de filtros na ETA Anápolis/GO. *In*: III CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2012, Anápolis. **Anais** [...]. Anápolis: IBEAS, 2012. p. 1-15. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2012/IX-012.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

PEREIRA, J. O. *et al.* Impacto do consumo descontrolado de água na produção de resíduos em estação de tratamento de água. Estudo de caso: ETA-Itacolomi, Ouro Preto (MG). **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** (Online), [S.l.], n. 39, p. 2-13, 2016. Disponível em: http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/155. Acesso em: 28 mar. 2021.

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. **Ensaio de classificação em hidrociclone**. Brasília, DF: CETEM/MCT, 2004. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1035/1/Cap%207%20Hidrociclone.pdf>. Acessado em: 06 abr. 2021.

SCALIZE, P. S. **Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto**. 2003. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-17062016-152931/publico/Tese_Scalize_PauloS.pdf. Acesso em: 02 abr. 2021.

SILVA, N. K. G. **Estudo de otimização da configuração do hidrociclone filtrante**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Uberlândia, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15226>. Acesso em: 06 abr. 2021.

SOCCOL, O. J. **Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação**. 2003. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-07042003-160009/publico/olivio.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2021.

SVAROVSKY, L. **Solid-liquid separation**. 4. ed. Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

TERTO, R. S.; ARAUJO, A.L.C.; DUARTE, M.A.C. **Caracterização dos resíduos da água de lavagem de filtros em ETA de filtração direta**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Apodi, 2018. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/1652/Raissa%20Salviano%20Terto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 abr. 2021.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Trabalho de Conclusão de Curso procurou encontrar uma alternativa viável para o adensamento de resíduos em Estações de Tratamento de Água, mantendo em mente que esta alternativa deve levar em consideração a redução dos impactos gerados ao meio ambiente. Os resultados obtidos através da metodologia de cálculo mostram que a utilização dos hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley* fornecem uma alternativa que tem uma eficiência efetiva quando se trata de desidratação do lodo de Estações de Tratamento de Água. Embora os dois hidrociclones tenham uma boa eficiência, o hidrociclone do tipo *Rietema* se mostra mais adequado para o adensamento do lodo gerado em Estações de Tratamento de Água, em virtude da sua razão de líquido (R_L) ser menor, o que influencia na quantidade que sairá pela corrente *underflow* do hidrociclone. O fato dos hidrociclones se mostrarem compactos, e por ter um baixo custo de implementação torna a escolha por estes viável para qualquer empresa que tenha uma ETA.

Fica como uma sugestão para trabalhos futuros, projetar hidrociclones para a ETA da cidade de Bagé /RS, coletar todos os dados do lodo gerado e determinar qual seria o hidrociclone ideal para esta.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004** - Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216** - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ABREU, N. **Da captação à distribuição, o caminho que a água faz até nossas casas**. Rio de Janeiro: Autossustentável, 2017. Disponível em: <https://autossustentavel.com/2017/03/estacao-tratamento-agua-eta.html>. Acesso em: 10 jun. 2020.

ACHON, C. L. **Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água a luz dos conceitos da ISO 14.001**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-08012009-172718/publico/AchonCL_2008.pdf. Acesso em: 22 ago. 2020.

ALMEIDA, C. A. K. **Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15110/1/Celso.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2020.

ALVES, S. G. S., ATAIDE, C. D. G.; SILVA, J. X. Microbiológica de coliformes totais e termotolerantes em água de bebedouros de um parque público de Brasília, Distrito Federal. **Revista de Divulgação Científica Sena Aires**, Valparaíso de Goiás, v. 7, n. 1, 2018. Disponível em: <http://revistafacesa.senaaires.com.br/index.php/revisa/article/view/298>. Acesso em: 07 jun. 2020.

ANDRADE, V. T. **Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para tratamento de água residuária**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, Campinas, 2007. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/255478/1/Andrade_VivianTavaresde_M.pdf. Acesso em: 25 nov. 2020.

ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2001.

BACCI, D. C.; PATACA, E. M. Educação para a água. **Estudos Avançados** [online], São Paulo, v. 22, n. 63, p. 211-226, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142008000200014&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 18 jun. 2020.

BARROSO, M. M. **Gerenciamento de resíduos gerados no tratamento de água**. Porto Velho: Universidade Federal de Rondônia, 2009.

BOTERO, W. G. *et al.* Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 8, p. 2018-2022, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000800007. Acesso em: 05 jun. 2020.

BRAGA, A. R. *et al.* **Educação ambiental para gestão de recursos hídricos**. Americana, SP: Consórcio PCJ, 2003.

BRAGA, M. D. *et al.* Caracterização microbiológica da água de lavagem de filtros e avaliação de diferentes cenários de recirculação. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica**, Cidade do México, v. 1, n. 3, 2007. Disponível em: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14421/13757>. Acesso em: 23 jul. 2020.

BRANCO, S. M. **Água: origem, uso e preservação**. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2010.

BRASIL. Decreto-lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, p. 16509, 02 set. 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 15 jun. 2020.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, p. 1, 13 fev. 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: 20 jun. 2020.

BRASIL. Portaria nº 5, 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, n. 190-suplemento, 03 out. 2017. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html. Acesso em: 01 mar. 2021.

BRASIL. Portaria nº 635, de 26 dezembro de 1975. Aprova normas e padrões sobre fluoretação da água dos sistemas públicos de abastecimento, destinada ao consumo humano. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, 03 jan. 1976. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/MatrizesConsolidacao/comum/249408.html>. Acesso em: 06 mar. 2021.

BRK AMBIENTAL. **Conheça as etapas do processo de tratamento de água**. São Paulo: BRK, 2019. Disponível em: <https://blog.brkambiental.com.br/etapas-tratamento-de-agua/>. Acesso em: 10 jun. 2020.

CANCIO, A. **Problemas ambientais que afetam o planeta: água**. Teresina: Jus, 2017. Disponível em: <https://jus.com.br/artigos/62702/problemas-ambientais-que-afetam-o-planeta-agua>. Acesso em: 15 nov. 2020.

CARVALHO, C. C. G.; SANTOS, M. F. **Manual de operação e manutenção de estação de tratamento de água**. Cuiabá: Alcon Química, 2016. Disponível em: <http://saaeguacui.com.br/downloads/MANUAL%20DO%20OPERADOR%20DE%20ETA.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2020.

CHINÉ, B.; CONCHA. Flow patterns in conical and cylindrical hydrocyclones. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 80, n. 1-3, p. 267-273, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/244361871_Flow_Patterns_in_Conical_and_Cylindrical_Hydrocyclone. Acesso em: 10 jun. 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica L5.202**: Coliformes totais e fecais - determinação pela técnica de tubos múltiplos. São Paulo: CETESB, 1993. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/01/Para-enviar-ao-PCSM_-NTC-L5.202_5%C2%AAed-_dez.-2018.pdf. Acesso em: 24 ago. 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **O que fazemos\tratamento de esgoto**. São Paulo: SABESP, 2015. Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/CalandraWeb/CalandraRedirect/?temp=2&proj=sabesp&pub=T&nome=TratamentoDeEsgoto&db;=>. Acesso em: 10 nov. 2020.

COMPANHIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO DE NOVO HAMBURGO. **Tratamento de água**. 2017. Disponível em: <https://www.comusa.rs.gov.br/index.php/saneamento/tratamentoagua>. Acesso em: 16 nov. 2020.

CORDEIRO, J. S. **Remoção natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CORNWELL, D. A. *et al.* **Handbook of practice water treatment plant waste management**. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 1987.

CORNWELL, D. A.; KOPPERS, H. M. N. **Slib, schlamm, sludge**. Denver: American Water Works Association, Research Foundation, 1990.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados**. São Paulo: Edgard Blucher, 2012.

DACOL, K. A. **Etapas de tratamento da água**. São Paulo: BRK, 2019. Disponível em: <https://blog.brkambiental.com.br/etapas-tratamento-de-agua/>. Acesso em: 10 jun. 2020.

DI BERNARDO, L. *et al.* **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMa Editora, 2002.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed., São Carlos: RiMa, 2005a. v. 1.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed., São Carlos: RiMa, 2005b. v. 2.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2012.

DI BERNARDO, L. *et al.* **Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2011.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed., São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2008.

FREITAS, A. G. B. **Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclones**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, São Cristóvão, 2009. Disponível em: https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/5058/1/ANDREA_GONCALVES_BUENO_FREITAS.pdf. Acessado em 27 nov. 2020.

GARCIA, N. **Uso racional da água é a solução para a preservação desse recurso**. Distrito Federal, DF: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias-antigas/uso-racional-da-agua-a-c-a-soluassapso-para-a.2019-03-15.1643221791>. Acesso em: 15 nov. 2020.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JÚNIOR, A. D. Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de Água. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 17., 1993, Natal. **Anais [...]**. Natal: ABES, 1993. p. 324-341. Disponível em: http://dedalus.usp.br/F/5PRJMI8QX7YF3SAU4RBBYE5SPCQKN5H69J2UA73MF7QT8T4GSL-00997?func=full-set-set&set_number=010513&set_entry=000001&format=999 Acesso em: 27 out. 2020.

HAMMER, M. J.; HAMMER JÚNIOR, M. J. **Water and wastewater technology**. 3. ed., New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

LAWRENCE, D.; CARVALHO, M. H.; SCARPELINI, L. M. Potabilização de água utilizada na retrolavagem de filtros convencionais de ETAs por meio de ultrafiltração (estudo piloto). *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 36., São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABES, 2017. p. 1-7. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2018/03/I-066.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2020.

LUSTOSA, J. B. *et al.* Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água. **Revista DAE**, São Paulo, n. 206, 2016. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_206_n_1671.pdf. Acesso em: 07 nov. 2020.

- MACÊDO, J. A. B. **Introdução à química ambiental**. Juiz de Fora: Jorge Macedo, 2001.
- MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 3. ed., Rio de Janeiro: e-papers, 2002.
- MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed., Rio de Janeiro: e-papers, 2001.
- MINAYO, M. C. S.; GUALHANO, L. Questões ambientais relacionadas à água e seus efeitos sobre a saúde. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext_pr&pid=S1413-81232016010400001. Acesso em: 15 nov. 2020.
- MOLINA, T.; SANTOS, H. R. Caracterização e tratamento de água de lavagem de filtros de ETA, com o uso de polímeros sintéticos e amido de batata. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 2, n. 3, p. 28-44, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/30483>. Acesso em: 19 ago. 2020.
- MURRAY, K.; DILLON, G. **Waterworks residuals management**: a comparasion of US and UK practices. *In*: The management of water and wastewater solids for the 21st. Century, Washington, D.C.: WEF, 1994.
- NAHRA, S. **Principais problemas ambientais**. São José dos Campos: Quero Educação, 2019. Disponível em: <https://querobolsa.com.br/enem/quimica/principais-problemas-ambientais>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- NOSSOL, T. *et al.* Como reaproveitar os resíduos resultantes do processo de tratamento de água. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO, 20., Ponta Grossa. **Anais** [...]. Ponta Grossa: UEPG, 2007. 1 CD-ROM. Disponível em: http://ri.uepg.br/riuepg/bitstream/handle/123456789/759/EVENTO_Como%20reaproveitar%20os%20res%20C3%ADduos%20resultantes%20do%20processo%20de%20tratamento.pdf?sequence=1. Acesso em: 22 ago. 2020.
- OLINGER, C. **Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtro rápido de uma estação de água**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/83820>. Acesso em: 17 out 2020.
- PEREIRA, J. O. *et al.* Impacto do consumo descontrolado de água na produção de resíduos em estação de tratamento de água. Estudo de caso: ETA-Itacolomi, Ouro Preto (MG). **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** (Online), [S.l.], n. 39, p. 2-13, 2016. Disponível em: http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/155. Acesso em: 03 out. 2020.

RAMIRES, I.; BUZALAF, M. A. R. A fluoretação da água de abastecimento público e seus benefícios no controle da cárie dentária – cinquenta anos no Brasil. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232007000400027. Acesso em: 08 ago. 2020.

REALI, M. A. P. **Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs**. *In*: Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água, Rio de Janeiro: ABES, 1999. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001193781>. Acesso em: 05 jul. 2020.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A. **Tratamento de água** – tecnologia atualizada. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

RUBIM, C. Os desafios do tratamento de lodo. **Revista Técnica de Tratamento de Água e Efluentes**, São Paulo, n. 14, 2013. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/550/os-desafios-do-tratamento-de-lodo>. Acesso em: 20 nov. 2020.

RUBITUCI, M. A. **Proposta de alternativas de tratamento e destinação do lodo da ETA do município de Brusque/SC**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2015. Disponível em: <http://siaibib01.univali.br/pdf/Mylena%20Abelino%20Rubituci.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2020.

RUTKOWSKI, E. Módulo Saneamento Ambiental: correção de pH. **Biblioteca Didática de Tecnologias Ambientais**, Campinas, 2015. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~bdta/pH.html>. Acesso em: 16 jun. 2020.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO. **Sistemas de tratamento de água**. Aracruz: SAAE, 2006. Disponível em: https://www.saaeara.com.br/arquivos/outros/Tratamento_de_Agua.pdf. Acesso em: 01 ago. 2020.

SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. **Ensaio de classificação em hidrociclone**. Brasília, DF: CETEM/MCT, 2004. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1035/1/Cap%207%20Hidrociclone.pdf>. Acessado em: 22 nov. 2020.

SANTOS, D. G. **Uso racional da água é a solução para a preservação desse recurso**. Distrito Federal, DF: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias-antigas/uso-racional-da-agua-a-c-a-soluassapso-para-a.2019-03-15.1643221791>. Acesso em: 15 nov. 2020.

SCALIZE, P. S. **Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água que utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário.** 1997. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/204261505_Caracterizacao_e_clarificacao_por_sedimentacao_da_agua_de_lavagem_de_filtros_rapidos_de_estacoes_de_tratamento_de_agua_que_utilizam_sulfato_de_aluminio_como_coagulante_primario. Acesso em: 04 set. 2020.

SCALIZE, P. S. **Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto.** 2003. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-17062016-152931/publico/Tese_Scalize_PauloS.pdf. Acesso em: 20 set. 2020.

SILVA, J. B. **Estudo da situação atual da qualidade da água do açude de São Gonçalo – PB.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Campina Grande, Cajazeiras, 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/7480/1/JULIANA%20BATISTA%20DA%20SILVA.%20TCC.%20LICENCIATURA%20EM%20GEOGRAFIA.%202015.pdf>. Acesso em: 05 out. 2020.

SILVA, N. K. G. **Estudo de otimização da configuração do hidrociclone filtrante.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Uberlândia, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15226>. Acesso em: 26 nov. 2020.

SILVA, A. P.; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L. M. Avaliação da lixiviação de alumínio e da produção de ácidos graxos voláteis em reatores anaeróbios utilizados para estudar a disposição final de lodos de ETAs em aterros sanitários. *In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: AIDIS, 2000. 1 CD-ROM.

SOCOL, O. J. **Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação.** 2003. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-07042003-160009/publico/olivio.pdf>. Acesso em: 25 out. 2020.

SOUZA, F. G. C.; CORDEIRO, J. S. Resíduos gerados em estação de tratamento de água com descargas diárias. *In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL*, 29., 2004, San Juan. **Anais [...]**. San Juan: AIDIS, 2004. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/glaucio.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2020.

SOUZA, W. G. **Pós-secagem natural de lodos de estações de tratamento de água e esgoto sanitários.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-04072013-170307/pt-br.php>. Acesso em: 17 nov. 2020.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclone**. Eastbourne, UK: Holt, Rinehart & Winston, 1984.
SVAROVSKY, L. **Solid-liquid separation**. 4. ed. Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

TELLES, D. D.; COSTA, R. H. P. G. **Reuso da água: conceitos, teorias e práticas**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. USEPA. Filter backwash recycling rule. **Technical guidance manual**. Washington, DC: USEPA, Office of Ground Water and Drinking Water, 2002. Disponível em : <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/200025V5.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP A&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&Toc Restrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQ FieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C 00thru05%5CTxt%5C00000005%5C200025V5.txt&User=ANONYMOUS&Password=anon ymous&SortMethod=h%7C&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75 g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Ba ck=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x &ZyPURL>. Acessado em: 1 jun. 2020.

VALCORTE, P. W.; HEDLUND, K. F. S.; CARISSIMI, E. Lodo de ETA: é possível adensá-lo através de flotação por ar dissolvido? **Hydro**, São Paulo, v. 11, n. 127, 2017. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/revista/hydro/materia/2017/06/22/lodo_de_ETA.html. Acesso em: 12 nov. 2020.

VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Uberlândia, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15053/1/LGMVieira1TESPRT.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2020.

VIGNESWARAN, S., BOONTHANONB, S., PRASANTHIA, H. Filter backwash water recycling using crossflow microfiltration. **Desalination**, Amsterdam, v. 103, n. 1-3, p. 31-38, 1996. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916496000896>. Acesso em: 10 nov. 2020.

YUZHU, W. **Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo do caso**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000746383>. Acesso em: 10 out. 2020.

ZIPF, M. S. **Caracterização e estudo de reuso da água de lavagem dos filtros de uma estação de tratamento de água (ETA) de uma indústria têxtil de Blumenau-SC**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/124463>. Acesso em: 09 nov. 2020.