



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



Análise dos Processos de Clarificação e Filtração da Água para Consumo Humano Estações de Tratamento de Água do Rio Grande do Sul

Autor: Cálvin Guedes Reis

Orientadora: Mariliz Gutterres Soares

Co-Orientador: Luciano Barros Zini

Porto Alegre, 07 de julho de 16

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha mãe, Marines Guedes Reis que ao longo da minha formação escolar não mediu esforços para me auxiliar a superar as dificuldades impostas.

Agradecimentos

Aos meus familiares, gostaria de agradecer a compreensão, o carinho e o apoio ao longo desses anos que, com a sua ajuda, pude dedicar aos meus estudos.

Aos colegas do programa VIGIAGUA-RS, gostaria de agradecer por disponibilizar as informações utilizadas para fazer esse trabalho e pelo companheirismo ao longo do meu estágio no CEVS/SES/RS.

A minha orientadora Mariliz pelo auxílio na confecção do trabalho.

Ao meu co-orientador Luciano, pelo auxílio neste trabalho e em diversas situações desde o início do meu estágio.

Resumo

Este trabalho é sobre estações de tratamento de água e faz uma análise dos processos de clarificação, compreendidos como a soma das etapas de coagulação, floculação e decantação, e do processo de filtração a partir dos dados da turbidez de entrada e saída de cada processo nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) no Estado do Rio Grande do Sul. São objetivos deste trabalho identificar os comportamentos dos processos de clarificação e filtração de 8 ETAs avaliadas e, através da comparação dessas ETAs, analisar a influência da vazão de água na operação nesse comportamento assim como alertar sobre o risco de contaminação ao qual a população está sujeita e propor ações que diminuam a turbidez de saída do tratamento. O material usado para o trabalho foram cartas de controle operacional das ETAs analisadas, especificamente os dados de médias diárias da turbidez da água bruta, clarificada e tratada. Esse material foi obtido junto à Secretaria estadual de Saúde do Estado do Rio Grande do Sul, em particular tendo como base o programa VIGIAGUA-RS. Para avaliar a influência da vazão nos processos de clarificação e filtração através da comparação entre as ETAs avaliadas criou-se as variáveis razão da vazão de operação média pela vazão de projeto (VO/VP) e razão da vazão de operação média pela soma das áreas de superfície filtrante dos filtros denominada como taxa média de filtração ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$). A maioria das ETAs apresentou aumento da turbidez da água de saída com o aumento da turbidez da água de entrada, tanto no processo de clarificação quanto no processo de filtração. Através da comparação entre as ETAs avaliadas constatou-se que valores elevados da vazão para valores de turbidez de água acima de 30 uT comprometem a eficiência de remoção de turbidez do processo. No médio ou longo prazo, é necessário rever decisões operacionais como os tempos de carreira dos filtros, produtos químicos, avaliar a possibilidade de mudança dos produtos químicos utilizados e investimento em construção de barragens no local de captação da água e/ou construção de novas ETAs onde as existentes operam acima da capacidade.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Decantador horizontal e suas subdivisões	11
Figura 4.1. Turbidez da água decantada em função da turbidez da água da ETA 2	20
Figura 4.2. Concentração de Sulfato de Alumínio adicionado vs matéria orgânica da água bruta na ETA 8.	21
Figura 4.3. Turbidez da água clarificada em função da turbidez da água bruta para as 5 ETAs com turbidez de água acima de 13 uT e suas razões VO/VP.	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.4. Turbidez da água clarificada em função da turbidez da água bruta para as 3 ETAs com turbidez de água abaixo de 15 uT e suas razões VO/VP.	22
Figura 4.5. Amplitude da turbidez da água clarificada em função da turbidez da água bruta para as 5 ETAs que captam água com turbidez acima de 13uT e suas razões VO/VP.	24
Figura 4.6. Amplitude da turbidez da água clarificada em função da turbidez da água bruta para as 3 ETAs que captam água com turbidez abaixo de 15uT e suas razões VO/VP.	24
Figura 4.7. Turbidez da água tratada em função da turbidez da água clarificada da ETA 2	27
Figura 4.8. Turbidez média da água tratada em função da turbidez da água clarificada para as 4 ETAs com turbidez de água clarificada entre 2,0 uT e 6,8 uT e suas razões VO/VP. ...	28
Figura 4.9. Turbidez média da água tratada em função da turbidez da água clarificada para as 4 ETAs com turbidez de água clarificada entre 0,8 uT e 3,8 uT e suas razões VO/VP. ...	29
Figura 4.10. Amplitude da turbidez da água tratada em função da turbidez da água clarificada para as 4 ETAs com turbidez de água clarificada entre 2,0 e 6,2 uT e suas razões VO/VP.	29
Figura 4.11. Amplitude da turbidez da água tratada em função da turbidez da água clarificada para as 4 ETAs com turbidez de água clarificada entre 0,8 uT e 3,8 uT e suas razões VO/VP.	30

Lista de Tabelas

Tabela 3.1.Períodos em que os dados de turbidez da água bruta, clarificada e tratada das ETAs foram avaliados.....	15
Tabela 3.2.Informações usadas na realização procedimento de Regressão no programa Excel para todas as ETAs avaliada.	17
Tabela 3.3.Informações usadas na realização procedimento de Regressão no programa Excel para todas as ETAs avaliadas.....	18
Tabela 4.1.Informações usadas para análise dos comportamentos de clarificação e filtração para todas as ETAs avaliadas.....	19
Tabela 4.Tipos de Floculadores e Decantadores das ETAs avaliadas.....	26

Lista de Abreviaturas e Siglas

CEVS – Centro Estadual de Vigilância em Saúde

ETA – Estação de Tratamento de Água

SES – Secretaria Estadual da Saúde do Rio Grande do Sul

TFM – Taxa Específica de Filtração Média

VO/VP – Razão da Vazão de Operação Média pela Vazão de Projeto

Sumário

Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas	vii
Sumário	viii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Qualidade dos mananciais de água no mundo	3
2.2 Parâmetros básicos de controle de qualidade de água com ênfase na Turbidez	3
2.3 Padrão Nacional de Potabilidade de Água	4
2.4 Estações de Tratamento de Água	5
2.4.1 Coagulação	6
2.4.2 Decantação	10
2.4.3 Filtração	12
2.4.4 Desinfecção	13
3 Materiais e Métodos	14
3.1 Material informativo utilizado	14
3.1.1 Período em que os dados foram analisados	14
3.2 Controle estatístico de processo (CEP)	15
3.2.1 Informações sobre o processo	15
3.2.2 Causas Comuns e Especiais no Controle Estatístico	15
3.2.3 Teorema do Limite Central	16
3.2.4 Causas especiais dentro dos limites de controle	16
3.3 Procedimento utilizado	16
3.3.1 Análise dos dados de clarificação	16
3.3.2 Dados de Filtração	17
4 Resultados e Discussões	19
4.1 Análise dos dados do processo de clarificação	19
4.1.1 Análise das tendências centrais dos comportamentos dos processos de clarificação das ETAs avaliadas.	21
4.1.2 Análise da amplitude das dispersões dos processos de clarificação	23
4.2 Análise dos dados do processo de filtração	27
4.2.1 Análise da tendência central e dispersão dos processos de filtração	27
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	32
6 Referências	34

1 Introdução

A primeira Estação de Tratamento de Água (ETA) foi construída em Londres em 1829 e tinha a função de filtrar a água do rio Tâmis em filtros de areia. No século XIX, não se sabia como se contraíam as doenças, acreditava-se que eram transmitidas pelo ar, pois o volume de ar respirado por dia é muito superior ao volume de água ingerido. Porém, com a descoberta de que doenças letais da época (como a cólera e a febre tifóide) eram transmitidas pela água, técnicas de filtração e a cloração foram mais amplamente estudadas e empregadas (ROCHA, 2004).

Com o passar do tempo, as ETAs passaram a adotar as etapas de coagulação química, floculação e decantação. Estas etapas que antecedem a etapa de filtração também são conhecidas como clarificação da água e tem o objetivo de diminuir a quantidade de impurezas suspensas antes da etapa de filtração. Hoje essa tecnologia é chamada de ciclo completo e é amplamente utilizada.

Há na literatura recente muitos estudos envolvendo novas tecnologias para o tratamento de água para consumo humano, entre elas destacam-se os processos oxidativos avançados. No entanto, essas tecnologias são consideradas onerosas e sua aplicação ainda parece distante da realidade do Estado do Rio Grande do Sul e de muitas regiões do País. Em 2015, 72,35% da população do Estado foi abastecida por estações de tratamento da água (ETAs) por ciclo completo (SISAGUA, 2015). No mesmo ano, foram identificadas inconformidades em várias estações de tratamento de água inspecionadas pela Secretaria estadual de Saúde do Estado do Rio Grande do Sul, muitas dessas não atendem as metas de turbidez da água pós-filtração estabelecidas pela Portaria MS 2914/2011 (legislação vigente). Várias dessas ETAs tratam a água com a vazão de operação acima da vazão de projeto e com taxas específicas de filtração acima do recomendado pela norma NBR 12216.

A turbidez é um dos parâmetros básicos de qualidade da água para consumo humano adotado pelo Ministério da Saúde. Em Estações de Tratamento de Água busca-se a remoção da turbidez, isto é remoção de partículas suspensas na água como forma de prevenção de contaminações biológicas. O valor de 1,0 uT para filtração rápida é considerado satisfatório para a eliminação dos microrganismos como protozoários, helmintos e bactérias. Para turbidez abaixo de 0,5 uT há eliminação de cistos *Giardia* e abaixo de 0,3 uT de oocistos de *Cryptosporidium*. A preocupação com estes microrganismos justifica-se pelo fato destes serem resistentes ao cloro e, portanto, não serem eliminados na desinfecção (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006). Além disso, acredita-se que os agrotóxicos associados ao transporte por sedimentos podem ser parcialmente removidos na etapa de filtração, ao se reduzir a turbidez da água bruta, conforme sugerem metodologias de avaliação de riscos de agrotóxicos na água para consumo humano implementadas por ZINI (2016).

Em face da importância do parâmetro turbidez e da população que as Estações de Tratamento de Água do Estado do Rio Grande do Sul abastecem, esse trabalho se propõe a avaliar os processos de clarificação e filtração de 8 ETAs através da análise das relações entre médias diárias de turbidez da água bruta, água clarificada e água tratada. Como algumas ETAs operam acima da vazão de projeto ou com filtros com taxas específicas de filtração acima do recomendado buscou-se avaliar a influência da vazão nos processos de clarificação e filtração através das variáveis criadas VO/VP (razão da vazão de operação

média por vazão de projeto) e TFM (taxa específica de filtração média) obtida através da razão da vazão de operação média pela área de superfície filtrante de cada filtro utilizado pela ETA ponderado pelo número de camadas do mesmo.

Os principais objetivos do trabalho são identificar os comportamentos dos processos de clarificação e filtração das 8 ETAs avaliadas relacionando a turbidez de entrada e saída em cada processo, analisar a influência da vazão nesse comportamento e propor ações que diminuam a turbidez de saída do tratamento das ETAs, minimizando os riscos de saúde pública.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo visa apresentar conceitos importantes para o entendimento do trabalho. A primeira parte do capítulo trata da qualidade da água e de sua importância para a saúde e legislação específica a respeito. Já a segunda parte descreve os principais processos das estações de tratamento de água (ETAs) com foco nos processos analisados neste trabalho.

2.1 Qualidade dos mananciais de água no mundo

Antes de ser abordado o tratamento da água é essencial escrever sobre os mananciais de água, pois quanto pior for a qualidade da água captada do manancial mais eficiente terá de ser o tratamento dessa água para que atenda o padrão de potabilidade para consumo humano.

Segundo CARVALHO *et al.* (1998), no Brasil se verifica um perfil epidemiológico heterogêneo e complexo com doenças crônico-degenerativas causadas pelo desenvolvimento industrial e urbanização e a manutenção de doenças infecciosas e parasitárias nas zonas rurais. No caso da água para o consumo humano, a principal preocupação nas regiões urbanas e industriais que captam água de mananciais superficiais é a remoção de concentrações de compostos químicos oriundos da atividade industrial e o lançamento de esgoto sem tratamento. Já na zona rural a preocupação continua sendo a contaminação biológica, portanto existe a necessidade da inclusão da etapa de cloração nas formas de abastecimento coletivo de fervura da água ou a adição de hipoclorito de sódio 2,5% fornecido pelo Ministério da Saúde.

CARVALHO (2006), alerta que a qualidade dos mananciais utilizados para abastecimento humano já precarizada por despejos industriais, resíduos agrícolas e esgotos urbanos ainda sofre com a possibilidade de uma potencial contaminação biológica oriunda de atividades de lazer. A resolução CONAMA 357 (2005) estaria contribuindo para essa contaminação na medida em que permite que águas oriundas de mananciais enquadrados nas classes I e II podem ser utilizadas para fins recreativos, além de abastecimento humano após tratamento.

O aumento da atividade industrial também está contribuindo para a degradação da qualidade dos mananciais e conseqüentemente da qualidade da água para consumo humano em várias partes do mundo. Em revisão de artigos e dissertações no período entre 2003 e 2013 sobre metais pesados em água para consumo humano na Malásia, HAFIZA *et al.* (2015) encontraram resultados de análises em água tratada com presença de metais pesados na ordem de $\mu\text{g/L}$, valores ainda abaixo dos limites admissíveis. Porém, em resultados de análises em água tratada no Paquistão, KHAN *et al.* (2013) encontraram concentrações de Cromo, Cádmio, Chumbo e Níquel acima dos limites admissíveis pela OMS.

2.2 Parâmetros básicos de controle de qualidade de água com ênfase na Turbidez

Os parâmetros básicos para o controle da qualidade são os coliformes totais, *Escherichia coli*, concentração de cloro residual livre e a turbidez. A turbidez também é um dos principais parâmetros de seleção de tecnologia de tratamento e de controle operacional de processos de tratamento.

A turbidez é definida como uma característica da água devido à presença de partículas em estado coloidal, em suspensão, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, plâncton e organismos microscópicos. Ela expressa a interferência à passagem de luz através do líquido, que mede transparência ou translucidez da água (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

A turbidez da água bruta, isto é a água que chega nas estações de tratamento de água para ser tratada, apresenta variações sazonais relacionadas com períodos de estiagem e de chuva. O valor de 1,0 uT para filtração rápida é considerado satisfatório para a eliminação dos microrganismos como protozoários, helmintos e bactérias (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

Considera-se que para turbidez abaixo de 0,5 uT há eliminação de cistos *Giardia* e abaixo de 0,3 uT de oocistos de *Cryptosporidium*. A preocupação com estes microrganismos justifica-se pelo fato destes serem resistentes ao cloro e, portanto não serem eliminados na desinfecção. Se detectada a presença desses microrganismos na água bruta ocorre a parada do abastecimento de água (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

A Portaria MS 2914/2011 estabelece que, a partir de dezembro de 2015, apenas 5% das amostras de água estejam entre 0,5 a 1,0 uT e o restante das amostras abaixo de 0,5 uT claramente visando a eliminação de cistos de *Giardia*, acredita-se que na próxima revisão da portaria o Ministério da Saúde será estabelecido o valor de 0,3 uT como meta para a saída de cada unidade filtrante (BRASIL, 2011).

Há vários trabalhos que buscam correlacionar a turbidez da água a outros parâmetros. Lessels (2013) correlacionou à turbidez à concentração de fósforo na água. Pinto (2014), considerando a variação da turbidez da água afluyente às estações de tratamento de água, correlacionou a turbidez com a pluviosidade, tendo encontrado correlação linear com R^2 de 0,5124. Já Yao (2014) correlacionou a turbidez da água com a concentração de partículas suspensas na água avaliando a concentração de partículas com diâmetro inferior e superior a 5 μ m, tendo encontrado aumento da concentração de partículas com diâmetros acima de 5 μ m na medida em que a turbidez aumenta.

2.3 Padrão Nacional de Potabilidade de Água

A Portaria MS 2914/2011 dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, conforme Art. 1º. Sua aplicação restringe-se aos sistemas de abastecimento de água e soluções alternativas, conforme o Art. 2º que segue transcrito:

“Art. 2º Esta Portaria se aplica à água destinada ao consumo humano proveniente de sistema e solução alternativa de abastecimento de água” (BRASIL, 2011).

Para o melhor entendimento dos termos usados, os itens III, VI e VII definem padrão de potabilidade, sistema de abastecimento de água e solução alternativa de abastecimento, respectivamente:

“III - padrão de potabilidade: conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano, conforme definido nesta Portaria” (BRASIL, 2011);

VI - sistema de abastecimento de água para consumo humano: instalação composta por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, desde a zona de captação até as ligações prediais, destinada à produção e ao fornecimento coletivo de água potável, por meio de rede de distribuição;

VII - solução alternativa coletiva de abastecimento de água para consumo humano: modalidade de abastecimento coletivo destinada a fornecer água potável, com captação subterrânea ou superficial, com ou sem canalização e sem rede de distribuição;

Conforme indica o Inciso III do Art. 2º da mesma Portaria, existem valores máximos permitidos para parâmetros analisados em água. Há parâmetros relacionados a doenças crônicas-degenerativas, como metais pesados e outros inorgânicos, orgânicos, agrotóxicos e produtos secundários de desinfecção. Porém os parâmetros básicos, como coliformes totais, *Escherichia coli* e turbidez, estão associados a doenças infecciosas-parasitárias. O parâmetro é destacado no Art. 30º da mesma portaria:

Art. 30. Para a garantia da qualidade microbiológica da água, em complementação às exigências relativas aos indicadores microbiológicos, deve ser atendido o padrão de turbidez expresso no Anexo II e devem ser observadas as demais exigências contidas nesta Portaria.

§ 1º Entre os 5% (cinco por cento) dos valores permitidos de turbidez superiores ao VMP estabelecido no Anexo II a esta Portaria, para água subterrânea com desinfecção, o limite máximo para qualquer amostra pontual deve ser de 5,0 uT, assegurado, simultaneamente, o atendimento ao VMP de 5,0 uT em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede).

§ 2º O valor máximo permitido de 0,5 uT para água filtrada por filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta), assim como o valor máximo permitido de 1,0 uT para água filtrada por filtração lenta, estabelecidos no Anexo II desta Portaria, deverão ser atingidos conforme as metas progressivas definidas no Anexo III a esta Portaria.

§ 3º O atendimento do percentual de aceitação do limite de turbidez, expresso no Anexo II a esta Portaria, deve ser verificado mensalmente com base em amostras, preferencialmente no efluente individual de cada unidade de filtração, no mínimo diariamente para desinfecção ou filtração lenta e no mínimo a cada duas horas para filtração rápida.

A Portaria ainda definiu metas progressivas de redução de turbidez na saída do tratamento de água. Segundo o Anexo II, ao final do 4º ano de vigência da Portaria apenas 5% das amostras de água (coletadas de 2 em 2 horas) podem apresentar valores de 0,5 a 1,0 uT, os outros 95% igual ou abaixo de 0,5 uT. Em 2015, o percentual de amostras de água que podiam apresentar valores entre 0,5 e 1,0 uT foi de 25%.

2.4 Estações de Tratamento de Água

O tratamento de água visa adequar a água bruta aos padrões de potabilidade da água para consumo humano, buscando ser feito com o menor custo possível.

As principais tecnologias de tratamento de água, segundo Di Bernardo e Paz(2010) empregam:

- Filtração em múltiplas etapas (FIME);

- Filtração direta ascendente (FDA);
- Filtração direta descendente (FDD);
- Dupla filtração (DF);
- Floto-filtração (FF);
- Ciclo Completo (CC).

O critério de escolha para a tecnologia de tratamento leva em consideração, além dos aspectos econômicos, a resolução CONAMA 357 e a norma NBR 12216. No Estado do Rio Grande do Sul, as ETAs são de ciclo completo, comumente chamadas de estações de tratamento convencional.

As ETAs de ciclo completo são definidas como ETAs cujo processo realiza as seguintes etapas:

- Pré-tratamento;
- Coagulação;
- Floculação;
- Decantação;
- Filtração;
- Desinfecção.

2.4.1 Coagulação

A coagulação de partículas coloidais, substâncias húmicas, microrganismos e outros contaminantes presentes na água bruta resulta da adição de um agente coagulante, geralmente sal de ferro ou alumínio, e a consequente reação química entre o coagulante com a água formando espécies hidrolisadas e posterior transporte destas espécies, permitindo o contato entre essas impurezas da água (Di Bernardo e Dantas, 2005).

A coagulação depende das características da água bruta, é função do pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, temperatura, potencial zeta, condutividade elétrica, tamanho e distribuição dos tamanhos das partículas suspensas e em estado coloidal.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), quando a coagulação química é necessária, o desempenho da tecnologia de tratamento de água depende fundamentalmente dessa etapa. Se o processo de clarificação (entende-se como clarificação a soma dos processos de coagulação, floculação e decantação) for deficiente, alguns tipos de impurezas que deveriam ser removidos nessa etapa do processo passam para a etapa de filtração onde não serão retidas nos meios granulares da filtração rápida. O estudo de Gabarrón (2016), apontou que o processo de clarificação foi responsável pela maior fração de remoção dos 49 poluentes emergentes avaliados.

Para a remoção de partículas coloidais, substâncias húmicas e microrganismos da água é necessário alterar a força iônica do meio, pois essas substâncias possuem carga negativa mantendo-se dispersas da água. Conforme Di Bernardo e Dantas (2005), o fenômeno de coagulação é resultado individual ou combinado de quatro mecanismos:

- Compressão da camada dupla;
- Adsorção e Neutralização;

- Varredura;
- Adsorção e formação de pontes.

A adsorção e a neutralização estão ligadas às interações coagulante-coloide, coagulante-solvente e coloide-solvente e provocam a desestabilização das cargas. No caso de sais hidrolisados de alumínio e ferro, normalmente ocorre adsorção específica causada pela interação coagulante-coloide. Como as partículas coloidais presentes na água possuem baixa viscosidade é necessária a adição de coagulantes químicos para a redução do material suspenso antes da etapa de filtração. O excesso de coagulante pode reestabilizar os coloides (reversão de carga) e deve ser evitado.

O mecanismo de varredura é o principal mecanismo usado nas estações de tratamento da água em ETAs de ciclo completo, pois prevê a formação de flocos capazes de sedimentarem justificando as etapas de floculação e decantação entre a coagulação e a filtração rápida. Esse mecanismo é usado quando é necessário que haja a redução do material suspenso antes da etapa de filtração, caso das partículas coloidais que possuem baixa viscosidade. Em comparação com o mecanismo de adsorção e neutralização, o mecanismo de varredura requer maior dosagem de agente coagulante. Para determinadas concentrações de coagulante e pH, o mecanismo de coagulação é considerado como combinação dos mecanismos de varredura e de adsorção e neutralização.

A adsorção com formação de pontes é um mecanismo que envolve uso de polímeros de grandes cadeia molecular que servem de pontes, pois aderem diferentes partículas ao longo da cadeia. Esse mecanismo será explicado na seção sobre polieletrólitos.

A mistura rápida ocorre logo após a adição do coagulante na água. Durante esta etapa ocorrem reações químicas entre a água e o agente coagulante que resultam em formas hidrolisadas do último. Estas formas hidrolisadas reagem com as impurezas existentes na água, sendo que para uma coagulação eficiente, este processo deve ocorrer sob agitação intensa.

A floculação é o processo de formação de flocos entre as impurezas desestabilizadas e o precipitado de metal formado ou as formas hidrolisadas de coagulante. Durante este processo a agitação deve ser inferior à da mistura rápida, estabelecendo um compromisso entre a formação dos flocos e a sua manutenção (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

O gradiente de velocidade pode ser entendido como a diferença de velocidade ao longo de uma direção. Ele expressa o grau de agitação da água. Na mistura rápida ele deve ser da ordem de 1000 s^{-1} já na floculação ele deve estar entre 20 s^{-1} a 70 s^{-1} .

O tempo de mistura, na etapa de mistura rápida, deve ser de 1 a 3 s, dependendo da vazão. E o tempo de detenção hidráulica, também conhecido como tempo de floculação, deve ser entre 20 a 40 min (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

Segundo Yao (2014), o tempo de mistura de detenção de 5 a 10 min reduz o número de moléculas compostas de 1 a 3 carbonos por unidade de volume, enquanto que valores acima de 20 min reduzem o número de moléculas maiores.

Coagulante: Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio comercial é o agente coagulante mais utilizado nas ETAs do Estado do Rio Grande do Sul e pode ser representado pela fórmula hidratada $Al_2(SO_4)_3 \cdot n \cdot H_2O$ em que n varia de 14,3 a 18 (Di Bernardo & Dantas, 2005).

A proporção entre as diferentes espécies hidrolisadas formadas pelo sulfato de alumínio ao entrar em contato com a água é uma função da temperatura, já que esta determina as constantes de solubilidade das espécies hidrolisadas. Estudo de Scalize (2012), apontou que a eficiência de remoção da turbidez aumenta à medida que a temperatura se eleva. Abaixo seguem as equações das espécies hidrolisadas bem como suas constantes de solubilidade (K) a 25° C:

Equações de hidrólise das espécies	log K	
$Al^{3+} + H_2O \leftrightarrow Al(OH)^{2+} + H^+$	-5,02	Eq.1
$2Al^{3+} + 2H_2O \leftrightarrow Al(OH)_2^{4+} + 2H^+$	-6,27	Eq.2
$6Al^{3+} + 15H_2O \leftrightarrow Al_6(OH)_{15}^{3+} + 15H^+$	-47,00	Eq.3
$8Al^{3+} + 20H_2O \leftrightarrow Al_8(OH)_{20}^{4+} + 20H^+$	-68,7	Eq.4
$Al(OH)_{3(p)} \leftrightarrow Al^{3+} + OH^-$	-32,64	Eq.5
$Al^{3+} + 4H_2O \leftrightarrow Al(OH)_4^- + 4H^+$	-23,57	Eq.6

As concentrações das espécies hidrolisadas também são função do pH, uma vez que apresentam quedas logarítmicas a diferentes taxas com o aumento do pH, a exceção é a espécie $Al(OH)_4^-$ que apresenta crescimento nas mesmas condições.

pH, alcalinidade e acidez

A alcalinidade representa a capacidade de neutralizar ácidos. Corretores de pH costumam ser adicionados na água bruta, geralmente cal, com o objetivo de garantir o pH ótimo para a coagulação, considerando que a adição de coagulante acidifica o meio (PINTO, 2014).

Eventualmente é necessário corrigir o pH da água tratada para que esta não esteja muito ácida, o que poderia acarretar corrosão da tubulação da rede de distribuição (Di Bernardo e Paz, 2010).

Teste de Jarros

A dosagem ótima de coagulante, bem como o pH utilizado na coagulação possui uma complexa relação com outras variáveis como a qualidade da água bruta, alcalinizantes, temperatura, etc. Por isso, na prática é necessário encontrar esse conjunto de parâmetros que renda a maior eficiência de remoção de turbidez pelo menor custo com

produtos químicos. Para simular a coagulação química em escala de bancada é feito o teste de jarros com a água bruta de cada ETA.

Em um trabalho desenvolvido por Amirtharajah e Mills (1982), realizando testes em diferentes condições de mistura rápida e com pH e dosagem de coagulante que caracterizam diferentes mecanismos de coagulação chegou-se, entre outras, às seguintes conclusões:

- Para regiões com o predomínio do mecanismo de varredura e na combinação por neutralização de carga com varredura houve pouca influência do gradiente de velocidade (entre 300 s^{-1} a 16000 s^{-1}).
- A remoção de turbidez por coagulação pelo mecanismo de varredura é consideravelmente maior que nos demais mecanismos.

Polieletrólitos

Os polímeros tem auxiliado a remoção de impurezas em várias etapas de processo desde a coagulação até floculação e filtração. Os polímeros sintéticos apresentam sítios ionizáveis, sendo que sua carga iônica identifica cada classe. Podem ter carga positiva, negativa ou ambas, sendo classificados como catiônicos, aniônicos e anfóteros, respectivamente. Na etapa de coagulação são usados polímeros catiônicos que permitem redução significativa de consumo de agente coagulante quando esses são sais de ferro e alumínio. Na etapa de floculação, esses mesmos polímeros tem a função de aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos. Na etapa de filtração, o uso de polieletrólito também dificulta o transpasse da matéria orgânica em taxas de filtração acima das recomendadas (Di Bernardo e Dantas, 2005).

As interações das moléculas de polímeros com a partícula podem ser de quatro tipos:

- Adsorção inicial na qual o polímero se liga à partícula e a desestabiliza;
- Formação de floco, quando diferentes polímero-partículas se unem;
- Adsorção secundária de polímero, quando o mesmo polímero é novamente adsorvido pela partícula, a envolvendo;
- Adsorção inicial com excesso de polímero, na qual vários polímeros se adsorvem em uma partícula tornando-a estável e sem sítios livres.

As principais vantagens na utilização de polímeros em estações de tratamento da água de ciclo completo são:

- Melhora na qualidade das águas decantadas e filtradas (com a diminuição do transpasse da matéria orgânica na filtração);
- Redução de consumo de coagulante primário (sais de ferro e alumínio) e consequente redução dos gastos com reagentes, tendo em vista que os gastos com o polímero são muito menores que os gastos com o coagulante primário;

Com melhora na qualidade da água filtrada há um aumento da eficiência de desinfecção, aumento do tempo entre as lavagens dos filtros e aumento da taxa de filtração na qual a ETA pode operar.

2.4.2 Decantação

A decantação é um fenômeno físico que consiste na separação de uma mistura heterogênea pela sedimentação do componente mais denso. Em uma ETA são as partículas suspensas na água que, em movimento descendente, propiciam a separação das fases.

Nas leis básicas da sedimentação, a velocidade de sedimentação depende da forma das partículas e de sua massa específica. No tratamento da água em ciclo completo, os flocos obtidos apresentam grande variação de tamanho. Tal fato é explicado pela variação da turbidez da água bruta, diferentes agentes coagulantes usados bem como auxiliares de floculação diferentes, além dos mecanismos de coagulação e floculação. Também devem ser consideradas as interferências no escoamento decorrentes dessas variações na água bruta (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Em estudo, verificou-se que partículas com diâmetro acima de 5 mm são formadas em maior concentração quando a turbidez está elevada e que a concentração de partículas com menor diâmetro varia de maneira inversamente proporcional à turbidez (Yao, 2014).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a remoção de turbidez da água que ocorre no processo de decantação pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Rg = 1 - Cro + \int_0^{Cro} \frac{vs}{vso} \cdot dCr \quad \text{Eq.7}$$

Em que:

- Rg é a fração de turbidez removida;
- vso é a velocidade de sedimentação necessária para a partícula ser removida, dada as dimensões do decantador e condições operacionais;
- Cro é a fração de turbidez remanescente de velocidade de sedimentação vso ;
- vs é uma velocidade de sedimentação de partícula definida em um ponto qualquer.
- Cr é a fração remanescente de turbidez em uma velocidade de sedimentação de partícula definida em um ponto qualquer.

A integração apresentada na equação anterior é a fração de turbidez removida por partículas abaixo da lâmina da água.

Embora não fique explícito na equação acima, a remoção da turbidez no decantador também é função da velocidade longitudinal da água no decantador, isto é, a velocidade com que a lâmina da água se desloca no decantador em direção aos filtros. Segundo a NBR 12216 (1992), para fluxo com número de Reynolds acima de 15.000, a velocidade longitudinal máxima deve ser 18 vezes a velocidade de sedimentação.

Decantadores

Essencialmente, o decantador horizontal pode ser subdividido em quatro zonas distintas (BERNARDO e PAZ, 2010):

- Zona de turbilhonamento, composta pelo canal de água floculada e a cortina de distribuição, responsáveis pela distribuição igualitária por toda seção do decantador, evitando zonas mortas e fluxos preferenciais;
- Zona de decantação, região com condições – velocidade de escoamento (V_0) e taxa de aplicação superficial (TAS) - que propiciam a sedimentação dos flocos;
- Zona de ascensão, que também é composta por duas unidades: as calhas de coleta de água decantada e o canal de água decantada;
- Zona de repouso, situa-se logo abaixo da zona de sedimentação e tem por objetivo a acumulação de todas as partículas sedimentadas.

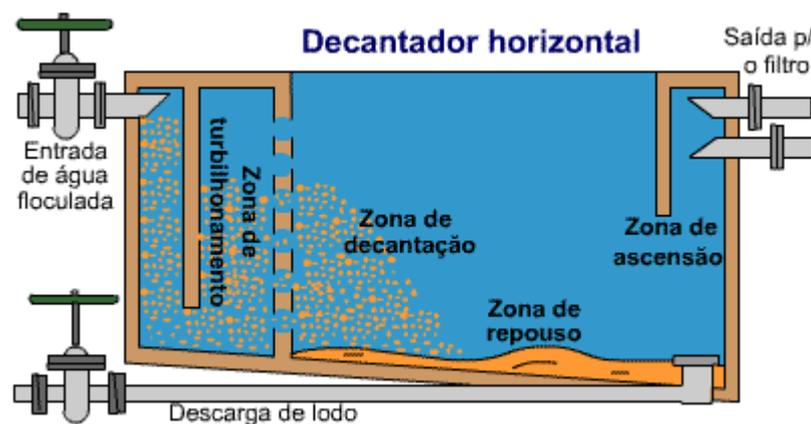


Figura 2.1. Decantador horizontal e suas subdivisões

Para o projeto de decantadores convencionais de escoamento horizontal, é necessário saber a profundidade útil que se deseja obter (parâmetro fixado em função dos filtros) e a vazão afluyente ao decantador, definida em função da demanda de consumo de água, sendo que o número mínimo de decantadores desejável é de 2, para não inviabilizar o tratamento em caso de paralisação de um equipamento. Assim, o tempo de detenção é um resultado obtido em função dos demais parâmetros.

Os decantadores convencionais de escoamento ascendente podem ser providos de equipamentos para extração de lodo. Quando a sua entrada está na zona de lodo ele é denominado de decantador de manto de lodo e as taxas de escoamento superficial são maiores que as taxas empregadas para decantadores de escoamento horizontal. O inconveniente desse decantador é que necessita de turbidez da água bruta sempre superior a 50 uT para a formação e manutenção de lodo que garanta a sua eficiência.

Em trabalhos de Hazen (1904) e Camp (1946, 1953) foram realizadas tentativas para aumentar a taxa de escoamento superficial de decantadores chamados decantadores de altas taxas, a partir da adoção de lajes intermediárias paralelas ao fundo (decantador de fundos múltiplos). Este decantador apresenta maior remoção de turbidez que os decantadores convencionais para uma mesma vazão, entretanto, torna mais difícil o

armazenamento e a extração do lodo devido a sua maior complexidade (Di Bernard & Dantas, 2005).

2.4.3 Filtração

A etapa de filtração é a última etapa de remoção de partículas suspensas e coloidais de uma estação de tratamento da água tradicional, portanto trata-se da mais importante delas, visto que a qualidade da água distribuída está diretamente ligada a água que resulta desta operação.

Os filtros devem ser lavados para liberar as impurezas, o procedimento adotado é a retrolavagem e consiste em introduzir água no sentido contrário ao operacional, que pode ser ascendente ou descendente, promovendo a fluidização das impurezas. Eventualmente, é necessário repor leito filtrante, pois uma parte é perdida no processo. O tempo entre cada lavagem é conhecido como carreira de filtração.

A descrição quantitativa da filtração envolve formulações matemáticas dos mecanismos responsáveis pela retenção de partículas no meio filtrante. Tais modelos têm sido aplicados com pouco sucesso na previsão do comportamento da filtração (Di Bernardo, 2005), sendo necessário recorrer aos resultados de pesquisas para projetar filtros de estações de tratamento da água.

Mecanismos, Transporte, Aderência e Transpasse

A filtração ocorre por dois mecanismos distintos. O primeiro mecanismo é denominado filtração com ação superficial que é quando a partícula fica retida por ter granulometria superior ao tamanho do poro na superfície do leito filtrante, ou seja, a partícula fica retida por impedimento físico. Evidenciado quando há remoção de turbidez, à medida que a água percorre o filtro. Essa ação pode ser expressa como resultado de uma sucessão de estágios ligados a colmatação das subcamadas que compõe o meio filtrante.

A teoria da colmatação das subcamadas prevê que o leito filtrante é composto de várias subcamadas e que cada uma delas retém as partículas de impurezas até que as forças de cisalhamento resultantes do escoamento do líquido superem as forças que mantêm as partículas aderidas. A primeira subcamada retém as partículas até a sua saturação, quando a segunda subcamada passa pelo mesmo processo que ocorre sucessivamente, mas com a subcamada seguinte retendo menos partículas que a subcamada anterior.

Os mecanismos de transporte são responsáveis pela condução das partículas suspensas até os coletores, quando tais forças superam a força de aderência do meio filtrante ocorre o desprendimento da impureza. Os mecanismos de transportes mais importantes para filtros de ETAs são: a sedimentação quando os poros dos filtros tem diâmetro inferior à partícula e a difusão quando a remoção está associada ao movimento aleatório das partículas. E os mecanismos de aderência são interações químicas como ligações de Van Der Waals e ligações de hidrogênio.

Considerando uma taxa de filtração constante (vazão por área de leito filtrante), a velocidade de escoamento dos poros (denominada intersticial) aumenta em função do número de partículas retidas até ocorrer o fenômeno conhecido como transpasse.

Quando há transpasse, significa que foi ultrapassada a capacidade do meio filtrante de reter impurezas e, por consequência, aumenta a turbidez da água efluente. Tal fenômeno pode comprometer a desinfecção final devido ao aumento no número de organismos a combater e ao aumento de partículas dissolvidas, que dificultam a ação desinfetante.

No início da carreira de filtração, a produção de água com qualidade insatisfatória tem sido creditada principalmente à lavagem. A lavagem causa picos na turbidez da água filtrada, pois durante a mesma ocorrem depósitos de água de lavagem no meio filtrante e acima dele (Di Bernardo & Dantas, 2005).

A taxa específica de filtração é expressa como a vazão de líquido por unidade de área de meio filtrante. Segundo a norma NBR 12216 (1992), para filtros rápidos a taxa máxima de filtração recomendada é de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para meio filtrante de camada simples e $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ quando é camada dupla.

2.4.4 Desinfecção

A desinfecção é um processo adotado após a filtração que visa eliminar organismos patogênicos presentes na água via adição de produtos químicos. A eliminação dos microrganismos ocorre por destruição da estrutura molecular, interferência ou inativação de enzimas e ainda interferência na biossíntese e crescimento celular (Di Bernardo e Dantas, 2005). Ressalta-se que a desinfecção não elimina alguns tipos de microrganismos, tais como *Toxoplasma Gondii*, *Giardia* e *Cryptosporidium*, estes só podem ser eliminados na etapa de filtração.

Para ser usado como agente desinfetante em estações de tratamento de água é necessário que o produto químico:

- Destrua os microrganismos em tempo mínimo e quantidade razoável.
- Não seja tóxico ao ser humano e animais de estimação.
- Seja disponível e barato.
- Seja aplicável em água de forma simples e confiável.
- Deixe residual persistente como precaução para a possibilidade de contaminação em reservatório, na rede de distribuição ou caixa d'água.

Dentre os oxidantes utilizados, o cloro preenche todos os requisitos exigidos. Outros oxidantes são: dióxido de cloro (de aplicação difícil, mais caro e residual instável) e o ozônio (sem residual e mais caro) (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

Para escolha do agente desinfetante ou combinação entre eles, é necessário considerar a qualidade da água bruta e, principalmente, se é adotada a pré-desinfecção. A desinfecção final deve garantir a produção de água isenta de organismos patogênicos e bactérias heterotróficas.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão explicados os procedimentos adotados para consultar o material informativo utilizado, que se constituiu de cartas de médias diárias das ETAs avaliadas, e para transpor os valores para gráficos que apresentam os comportamentos dos processos de clarificação e filtração.

3.1 Material informativo utilizado

O material usado para o trabalho foram as cartas de controle diário de 8 ETAs analisadas. Essas cartas foram obtidas junto à Secretaria estadual de Saúde do Estado do Rio Grande do Sul, mais especificamente através do programa VIGIAGUA-RS. O programa VIGIAGUA-RS dispõe destas informações para fiscalizar a qualidade da água fornecida pelas ETAs do Estado. Optou-se pelas cartas de médias diárias, pois estas permitem uma análise da capacidade operacional das ETAs em longos períodos.

As cartas de controle oferecem as médias diárias de parâmetros de processo para tratamento das águas como pH (da água bruta, floculada e tratada) e dosagem de produtos químicos (sulfato de alumínio, polieletrólito, entre outros). Elas também oferecem as seguintes informações referentes à qualidade da água em cada etapa: turbidez (água bruta, água floculada, água pós-decantada, água filtrada em cada filtro e água tratada), matéria orgânica (água bruta, água filtrada e água tratada) e cor (água bruta e tratada).

As ETAs avaliadas tiveram o comportamento de seus processos de clarificação (sequência das operações coagulação, floculação e decantação) e filtração descritos. Para avaliar o processo de clarificação, foi analisado como a turbidez da água pós-decantada (variável de saída no processo) varia com a turbidez da água bruta (variável de entrada no processo) e comparando as diferentes ETAs pela vazão média de operação. Para descrever o processo de filtração foi analisado como a turbidez da água tratada (variável de saída no processo) varia com a turbidez da água pós-decantada (variável de entrada no processo) e comparando as diferentes ETAs pela vazão média de operação. Para fazer essas análises foram usadas as médias diárias de turbidez da água bruta, clarificada e tratada. Ressalta-se que são 12 resultados de análises realizadas a cada 2 horas que compõe as médias diárias de turbidez.

Embora o parâmetro cor seja relevante na escolha da tecnologia empregada para o tratamento de água, ele não foi analisado no trabalho. As dosagens de produtos químicos destinados ao tratamento também não foram enfocadas no trabalho, pois a sua relação com a turbidez da água clarificada não apresentou correlação significativa. A dosagens de produtos químicos bem como outros parâmetros não controlados (como vazão e temperatura) serão vistas apenas como fontes da variabilidade do processo.

3.1.1 Período em que os dados foram analisados

Na tabela 3.1 são informados os períodos em que os dados das ETAs foram avaliadas:

Tabela 3.1. Períodos em que os dados de turbidez da água bruta, clarificada e tratada das ETAs foram avaliados.

ETA	Período	Observação
1	01/01/2015 – 31/08/2015	
2	01/01/2015 – 31/08/2015	
3	01/01/2015 – 30/09/2015	
4	01/11/2014 – 31/10/2015	Não foram avaliados os dados de dezembro de 2014.
5	01/11/2014 – 31/10/2015	Não foram avaliados os meses de dezembro e maio.
6	01/11/2014 – 31/10/2015	
7	01/11/2014 – 31/10/2015	
8	01/12/2014 – 30/11/2015	

As ETAs 1,2 e 3 foram avaliadas em uma série de dados mais curta, pois os dados solicitados pela vigilância à época foram apenas dos meses de 2015 antes da inspeção sanitária na ETA. As demais ETAs tiveram seus dados avaliados no intervalo de um ano, mas devido a problemas na compreensão dos resultados transcritos nos controles, o mês de dezembro de 2014 das ETAs 4 e 5 e o mês de maio da ETA 5 não foram avaliados.

3.2 Controle estatístico de processo (CEP)

O método de controle estatístico de processo foi usado no trabalho. Esse método identifica a oscilação natural da variável de saída dada a variabilidade do processo. Tal procedimento tem como objetivo verificar a presença de causas especiais que prejudicam a qualidade do produto, identificar suas causas e corrigi-las. Neste trabalho, ele foi usado para identificar e retirar esses pontos fora da variação natural do processo.

3.2.1 Informações sobre o processo

As informações sobre o desempenho de um processo qualquer passa por:

- Identificação da qualidade do produto final;
- Identificação da qualidade do produto em etapas intermediárias;
- Ajuste dos parâmetros de processo.

A coleta de dados permite as seguintes ações para prevenir futuros problemas no processo:

- Controle das matérias primas;
- Ajuste dos parâmetros de processo;
- Treinamento dos operadores.

No caso das ETAs avaliadas, o controle da matéria-prima não é possível devido à variação sazonal da turbidez da água bruta, descrita no capítulo anterior. A identificação da qualidade do produto (água tratada) e produto intermediário (água pós-decantada) são o foco do trabalho.

3.2.2 Causas Comuns e Especiais no Controle Estatístico

São causas comuns aquelas que geram variação de forma aleatória ao processo, produto de pequenas fontes de variabilidades que ocorrem em processos controlados. Quando o processo está sob controle, admite-se que ocorram variações no produto apenas por causas naturais. A busca pela correção das causas comuns é de competência gerencial e deve-se justificar economicamente.

São causas especiais aquelas que apresentam variações grandes que geram um produto fora dos limites de controle do processo ou que não seguem padrão aleatório. São causadas por problemas nos equipamentos, mudança na matéria prima, falhas de operação entre outras causas. As causas especiais devem ser corrigidas pelo operador e, em alguns casos, pela gerência. Normalmente requerem uma ação local.

3.2.3 Teorema do Limite Central

O teorema do limite central é o teorema que valida o uso da distribuição normal como forma de controle do processo, bem como fixa limites de controle. Esse teorema diz que a média da soma das probabilidades de variáveis independentes segue o modelo normal, independente da distribuição das variáveis individuais. Logo, uma distribuição acumulativa dos valores de uma variável de saída (um produto), em um processo controlado, tende a normal.

Podem-se definir limites de controle baseados em um intervalo de significância. O intervalo de significância comumente adotado é o “3 sigma” que admite o processo controlado no intervalo $(x - 3s, x + 3s)$.

Em que:

x é o valor médio da variável de saída;
 s é o desvio padrão da variável de saída.

Como consequência da adoção do intervalo 3 sigma admite-se um erro associado ao intervalo assumido de 0,27%. Ou seja, em 0,27% das vezes há um resultado acima dos limites de controle gerado por uma causa normal, mas será analisado como causa especial.

3.2.4 Causas especiais dentro dos limites de controle

Também se admite que há presença de uma causa especial quando se tem uma sequência de sete eventos seguidos dentro dos limites de controle que não demonstram um comportamento aleatório.

Para este estudo, as causas especiais dentro dos limites de controle não foram analisadas, pois o foco do trabalho não foi identificar causas especiais, mas identificar a tendência central e os limites inferior e superior do comportamento dos processos de clarificação e filtração.

3.3 Procedimento utilizado

O trabalho iniciou com a transcrição dos dados das médias diárias de turbidez da água bruta, decantada e tratada das cartas de controle de cada uma das 8 ETAs avaliadas para planilhas do programa Excel.

3.3.1 Análise dos dados de clarificação

Para avaliar a influência da mudança da matéria-prima, isto é, a sazonalidade da turbidez na água bruta e o quanto isto afeta a turbidez da água clarificada, foram plotados gráficos de dispersão no programa Excel, relacionando estas variáveis. Avaliando

o comportamento das dispersões encontradas optou-se por submetê-las a regressões logarítmica e linear. A função que melhor ajustou os dados de cada ETA foi usada para traçar o comportamento do processo de clarificação da mesma.

3.3.2 *Dados de Filtração*

Após a determinação das regressões usadas para descrever o comportamento dos processos de clarificação e filtração, as dispersões foram submetidas à ferramenta Regressão do programa Excel (disponível em Dados → Análise de Dados), inserindo-se os dados conforme a Tabela 3.2 abaixo:

Tabela 3.2. Informações usadas na realização procedimento de Regressão no programa Excel para todas as ETAs avaliada.

Função	Processo de clarificação	Processo de filtração
Dados de entrada	Turbidez da Água Bruta	Turbidez da Água Clarificada
Dados de saída	Turbidez da Água Clarificada	Turbidez da Água Tratada
Nível de Confiança	95%	95%
Resíduos	Opção selecionada	Opção selecionada
Resíduos Padronizados	Opção selecionada	Opção selecionada

Os resíduos padronizados permitem a eliminação das causas especiais, ou seja, a retirada dos pontos fora dos limites de controle do processo, já que seu valor indica, em desvios padrões, o quão distante o valor da variável de saída está do comportamento médio para a variável de entrada. O procedimento de eliminação das causas especiais é um processo iterativo que se baseia em identificar os dias com resíduo padrão acima de 3δ ou abaixo de -3δ e eliminar suas médias diárias da sequência de dados. Após a eliminação dos pontos, submeteu-se o restante da sequência de dados a nova Regressão e repetiu-se o procedimento até que nenhuma média diária estivesse fora dos limites de controle do processo.

Neste momento, foram coletadas as informações fornecidas pela Regressão que serão apresentadas no próximo capítulo. Essas equações são: 95% inferior, 95% superior e tendência central. A equação de 95% inferior fornece a equação em que há 95% de chance que os valores de turbidez estejam abaixo daquele valor (limite superior). A equação de 95% superior fornece a equação em que há 95% de chance que os valores de turbidez estejam acima daquele valor (limite inferior). E a equação de tendência central é aquela que apresenta o comportamento médio da variável de saída em função da variável de entrada.

Análise do comportamento do processo de Clarificação

Para comparar os comportamentos das ETAs, as mesmas foram separadas conforme a turbidez da água bruta, dados das ETAs que recebem água com turbidez na mesma faixa foram plotadas em mesmo gráfico. Para verificar se o comportamento do processo de clarificação é influenciado pela vazão de operação, criou-se a variável VO/VP, relacionando a vazão média de operação (VO) no período analisado com a vazão de projeto (VP) para cada ETA. Os comportamentos dado pelas tendências centrais de cada ETA foram usados para a comparação da variável VO/VP de cada ETA.

Os dados serviram para verificar se o comportamento do processo de clarificação é influenciado pelos equipamentos instalados nas etapas de floculação e decantação utilizados em cada ETAs.

Análise de Dados de Filtração

De forma análoga ao realizado no processo de clarificação, no processo de filtração, as ETAs foram separadas conforme a turbidez da água clarificada e os comportamentos daquelas que recebem água com turbidez na mesma faixa foram plotadas em mesmo gráfico.

Para verificar se o comportamento do processo de filtração é influenciado pela vazão de operação, criou-se a variável taxa específica de filtração média (TFM), relacionando a vazão média de operação no período analisado com a área total de filtração. Os comportamentos dados pelas tendências centrais de cada ETA foram usados para a comparação da variável taxa específica de filtração média de cada ETA.

Para criar a variável TFM da ETA, foi necessário criar primeiro a variável Área total equivalente, como sendo a somatória das áreas de todos os filtros da ETA ponderada pelo número de camadas do filtro. Tal operação foi baseada na NBR 12216, que prevê um valor dobrado de taxa específica de filtração para filtros de camada dupla em relação aos filtros que possuem camada simples.

Informações usadas para análise

Na Tabela 3.3 são informados os dados das ETAs usados para a criação as variáveis VO/VP e TFM foram avaliadas:

Tabela 3.3. Informações usadas na realização procedimento de Regressão no programa Excel para todas as ETAs avaliadas.

ETA	Vazão de Operação média (L.s ⁻¹)	Vazão de Projeto (L.s ⁻¹)	Área Total de Filtração (m ²)
1	470	330	108
2	100	150	89,6
3	150	150	58,8
4	245	150	97,4
5	320	550	198
6	275	190	123
7	180	250	206
8	848	700	363

4 Resultados e Discussões

Inicialmente serão apresentadas as variáveis que compõe a análise das ETAs. Para avaliar os processos de clarificação, a variável influente utilizada foi a razão da vazão de operação média pela vazão de projeto, abreviada como VO/VP. Para avaliar os processos de filtração das diferentes ETAs, a variável utilizada foi a razão da vazão de operação média pela soma das áreas de superfície filtrante dos filtros, denominada como taxa média de filtração ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). Os motivos que levaram à escolha das variáveis serão explicados na sequência do capítulo. A Tabela 4.1 apresenta as ETAs analisadas e as variáveis analisadas.

Tabela 4.1. Informações usadas para análise dos comportamentos de clarificação e filtração para todas as ETAs avaliadas

ETA	Razão entre a vazão média de operação e vazão de projeto (VO/VP)	Taxa específica média de filtração (TFM) [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$]	Subgrupo
1	1,424	376	Turbidez Alta
2	0,667	96,4	Turbidez Alta
3	1,000	220	Turbidez Alta
4	1,633	217	Turbidez Baixa
5	0,582	140	Turbidez Alta e Baixa
6	0,691	194	Turbidez Baixa
7	0,720	75,6	Turbidez Baixa
8	1,211	202	Turbidez Alta

Conforme apresentado na Tabela 4.1, as ETAs foram divididas em dois subgrupos para discussão de seus comportamentos. As ETAs que recebem água bruta com turbidez entre 1,5 uT e 15 uT, pois captam água de lagoas, denominadas de ETAs de turbidez baixa e aquelas que recebem água bruta com turbidez acima de 13 uT, pois captam de rios, denominadas de ETAs de turbidez alta. Essa divisão foi feita para que ETAs os comportamentos dos processos de clarificação e filtração possam ser apresentados de forma mais organizada e também porque os diferentes subgrupos apresentaram resultados diferentes, conforme será explicado na sequência do capítulo.

A ETA 5 capta água bruta acima de 13 uT, mas como será visto na sequência do capítulo, a turbidez resultante do processo de clarificação, turbidez da água clarificada, desta ETA está entre 0,8 uT e 3,8 uT, que é a mesma faixa de valores de turbidez das ETAs que captam água com turbidez baixa. As demais ETAs que captam água com turbidez alta tem valores de turbidez de água clarificada entre 2,0 uT e 6,2 uT. Ou seja, a ETA 5 terá o comportamento de seu processo de clarificação descrito com as ETAs 1,2,3 e ETA 8 e o seu processo de filtração descrito com as ETAs 4,6 e 7.

4.1 Análise dos dados do processo de clarificação

Para avaliar o processo de clarificação, foram plotados os gráficos das médias diárias de turbidez da água bruta versus médias diárias de turbidez da água clarificada de cada ETA e aplicada a linha de tendência. O procedimento descrito é exemplificado pelo gráfico obtido para a ETA 2 na Figura 4.1.

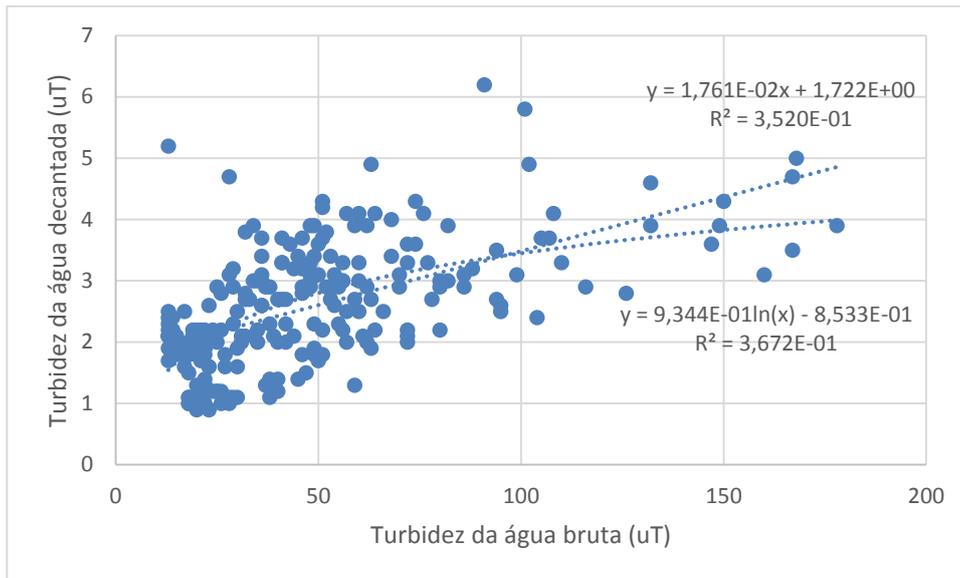


Figura 4.1. Turbidez da água decantada em função da turbidez da água bruta da ETA 2

O comportamento da Figura 4.1 pode ser explicado pelo estudo de Yao (2014), que verificou um aumento na concentração de flocos maiores no processo de floculação quando a turbidez da água bruta foi mais elevada. Flocos maiores implicam em velocidades de sedimentação mais elevadas e, conseqüentemente, maior remoção relativa, o que pode ser observado através da diminuição da inclinação da curva com o crescente de valores de turbidez da água bruta. Embora haja aumento da eficiência de remoção da turbidez com o aumento da turbidez para ETA 2, há uma relação diretamente proporcional entre as variáveis relacionadas o que pode dificultar o processo de filtração quando a turbidez da água bruta for mais elevada.

A Figura 4.2 mostra as dosagens de sulfato de alumínio diárias versus a carga orgânica da água bruta média do dia para a ETA 8. Segundo os técnicos da companhia responsável, a carga orgânica da água é o parâmetro utilizado para definir a dosagem do agente coagulante. No entanto, analisando os dados de uma ETA foi possível verificar que há dispersão de dosagem de produtos químicos para mesma carga orgânica de água bruta. Especula-se que a dispersão aconteça por dificuldades operacionais em adequar a dosagem de produtos químicos a aumentos drásticos da matéria orgânica da água bruta, além da diferença entre os operadores, devido ao processo ser manual. Como a variação na qualidade da água bruta pode ser da ordem de 1000 uT em poucos minutos, não há tempo para o operador realizar um teste de jarros para testar a nova dosagem, tendo que agir empiricamente, dosando a concentração dos produtos químicos baseado em resultados anteriores obtidos em situações semelhantes. Paralelamente, em períodos de estiagem, essa dispersão também pode ser causada por mudanças na qualidade da água, o que implica em alterações das dosagens de produtos químicos na busca da eficiência ótima de remoção da turbidez por meio de testes de jarros. Ressalta-se que, embora Yao (2014) tenha encontrado relação entre o diâmetro das partículas suspensas na água com a sua turbidez, essa relação não se mantém constante, ou seja, a concentração das partículas de determinada granulometria variam sazonalmente.

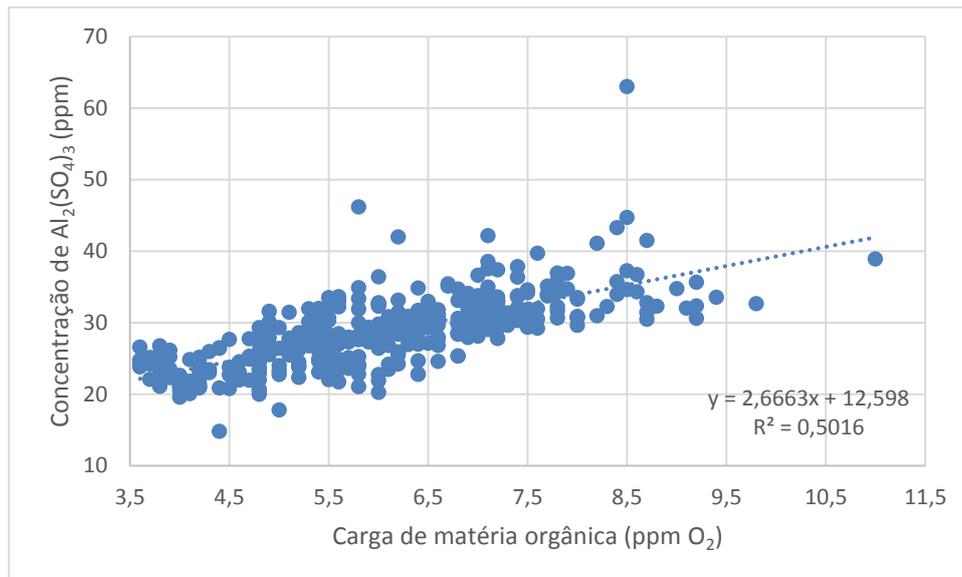


Figura 4.2. Concentração de Sulfato de Alumínio adicionado em função da matéria orgânica da água bruta na ETA 8.

4.1.1 *Análise das tendências centrais dos comportamentos dos processos de clarificação das ETAs avaliadas*

A tendência central do comportamento do processo de clarificação para as ETAs de turbidez alta e das ETAs de turbidez baixa estão nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente. Conforme referido no início do capítulo, as ETAs tiveram seus comportamentos do processo de clarificação plotados em gráficos separados para tornar a apresentação dos resultados mais organizada, na medida em que as ETAs recebem água bruta com valores de turbidez em duas faixas distintas. Para avaliar o efeito da vazão sobre o comportamento do processo de clarificação, considerando as diferenças existentes entre as ETAs avaliadas, criou-se a variável VO/VP (razão entre a vazão de operação média pela vazão de projeto) informada na legenda das Figuras 4.3 e 4.4. Cabe salientar que algumas linhas dos gráficos não estão completas por falta de valores disponíveis de turbidez de água bruta da ETA na faixa analisada no entanto, evitou-se reduzir a faixa, pois a redução não permitiria apresentar os resultados das outras ETAs.

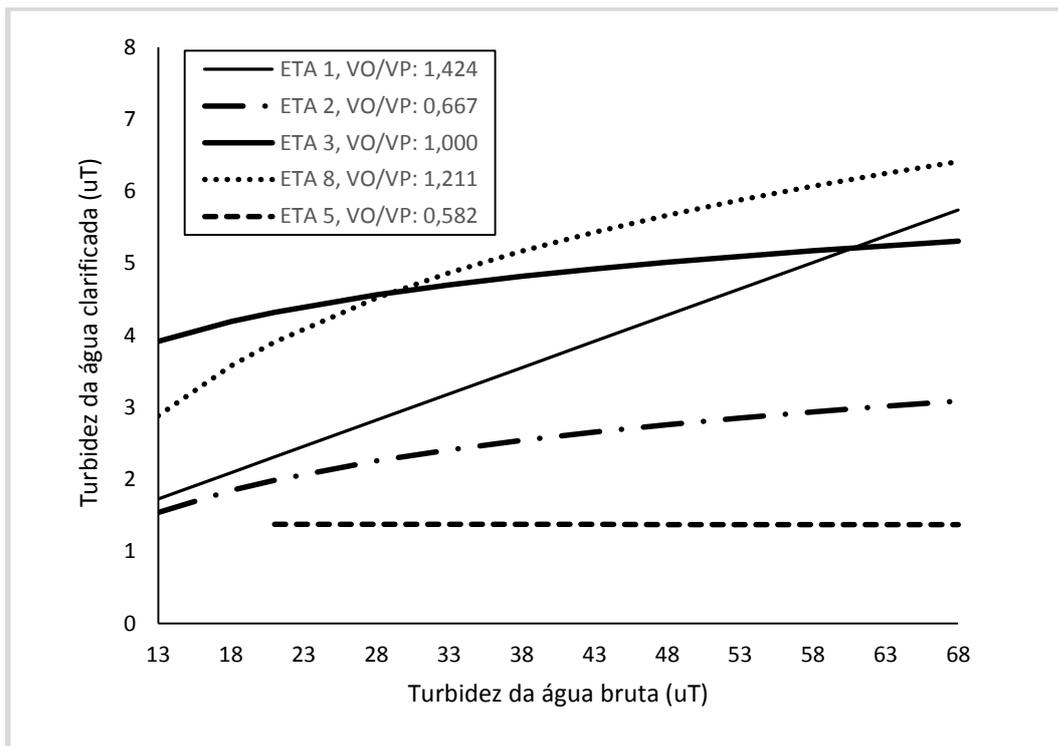


Figura 4.3. Turbidez da água clarificada em função da turbidez da água bruta para as 5 ETAs com turbidez de água acima de 13 uT e suas razões VO/VP

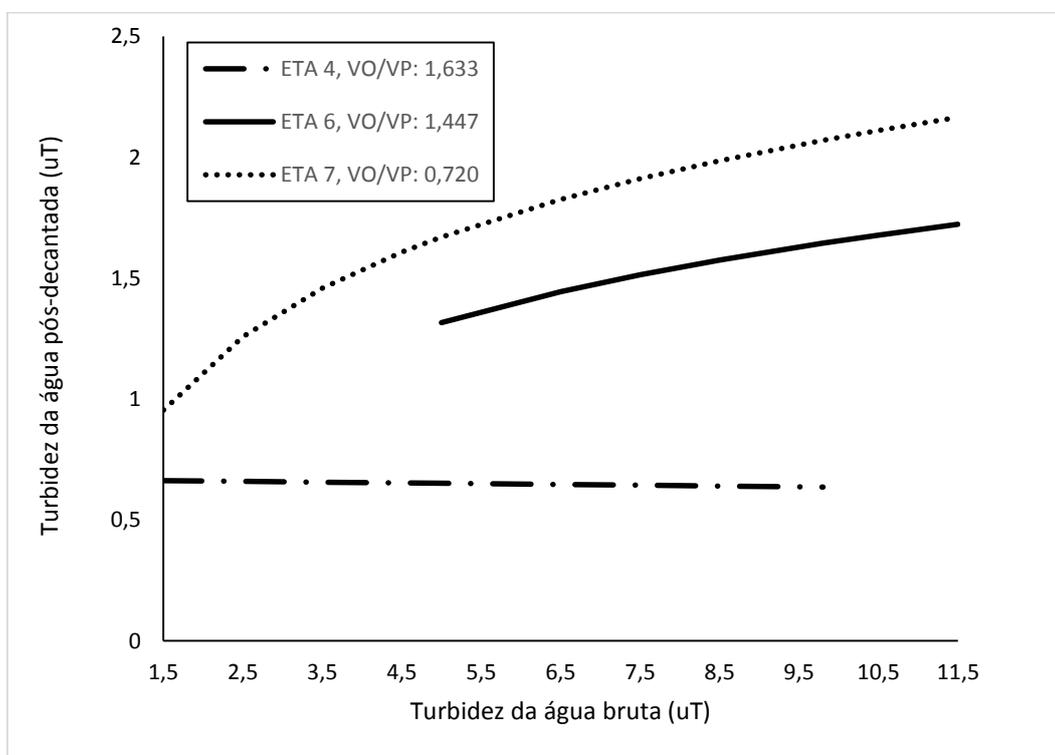


Figura 4.4. Turbidez da água clarificada em função da turbidez da água bruta para as 3 ETAs com turbidez de água abaixo de 15 uT e suas razões VO/VP

Analisando as Figuras 4.3 e 4.4, percebe-se diferenças significativas na turbidez da água clarificada decorrente do processo de clarificação das ETAs na medida em que se

varia a água bruta. É possível identificar na Figura 4.3 que as ETAs 1,3 e ETA 8, que possuem valores da variável VO/VP acima de 1, tem valores médios de turbidez da água clarificada maiores que os das ETAs 2 e 5, que possuem valores da variável VO/VP abaixo de 1, para mesma turbidez de água bruta. Para essas ETAs a vazão se mostrou uma variável que altera significativamente o comportamento do processo de clarificação.

Tal fenômeno também pode ser entendido pelo que é descrito na literatura, pois quanto maior for a vazão, maior será a velocidade longitudinal nos decantadores e consequentemente menor será a fração de flocos menores a serem removidos, pois diminui o tempo de detenção hidráulica.

Na Figura 4.4, a ETA 4, que possui maior relação VO/VP apresenta melhor clarificação que as ETAs 6 e 7. Entende-se que a variável VO/VP para ETAs que captam água com turbidez de água bruta baixa não sofrem tanta influência da vazão no processo de clarificação. Acredita-se que a qualidade da água bruta e questões operacionais, como frequência de lavagem do decantador e dosagem de produtos químicos possam ter causado a diferença de comportamento das ETAs citadas.

Segundo técnicos da companhia responsável pelas ETAs, foram instalados calhas coletoras na região final dos decantadores das ETAs que operam com vazão acima da vazão de projeto para garantir que não houvesse arrastes dos flocos não sedimentados. Especula-se que a medida adotada seja responsável por manter a tendência central da turbidez da água clarificada das ETAs 1 e 8 abaixo da ETA 3 até turbidez de 28 e 60 uT, respectivamente, conforme Figura 4.3.

4.1.2 Análise da amplitude das dispersões dos processos de clarificação

As amplitudes de média diária de turbidez da água clarificada para mesma turbidez média de água bruta podem ser visualizadas entre as linhas superiores 95% e inferiores 95% de cada ETA identificadas nas Figuras 4.5 e 4.6 para ETAs com turbidez alta e baixa, respectivamente. Essas linhas foram obtidas através da ferramenta Regressão do programa Excel conforme explicado no capítulo anterior.

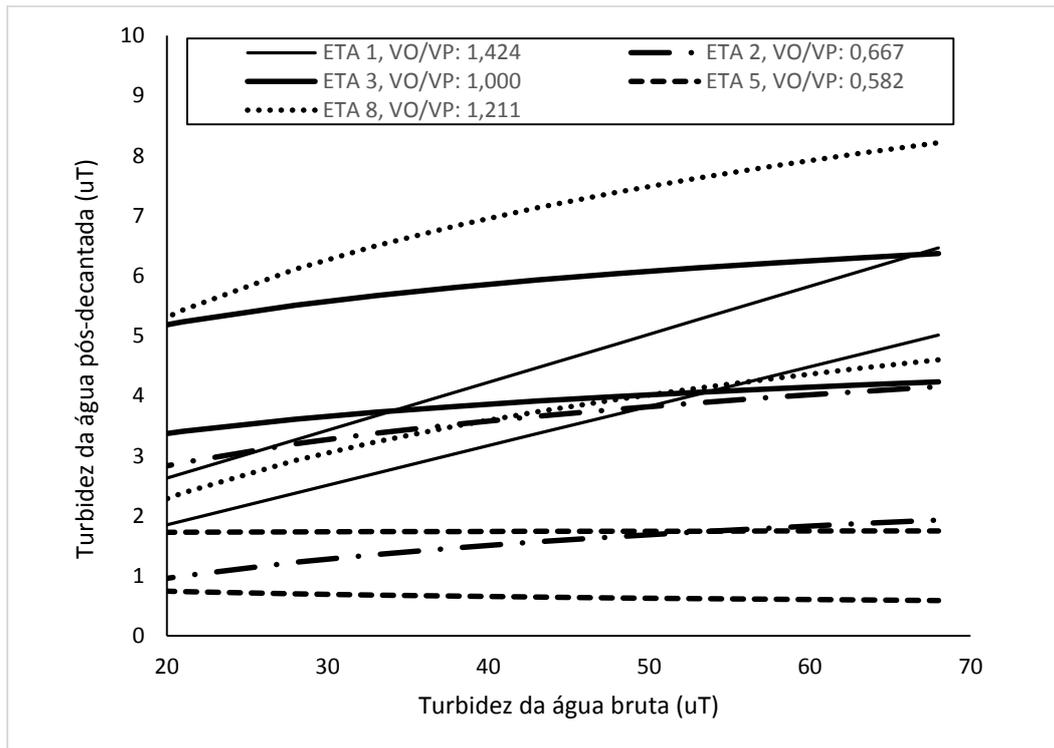


Figura 4.5. Amplitude da turbidez da água clarificada em função da turbidez da água bruta para as 5 ETAs que captam água com turbidez acima de 13uT e suas razões VO/VP

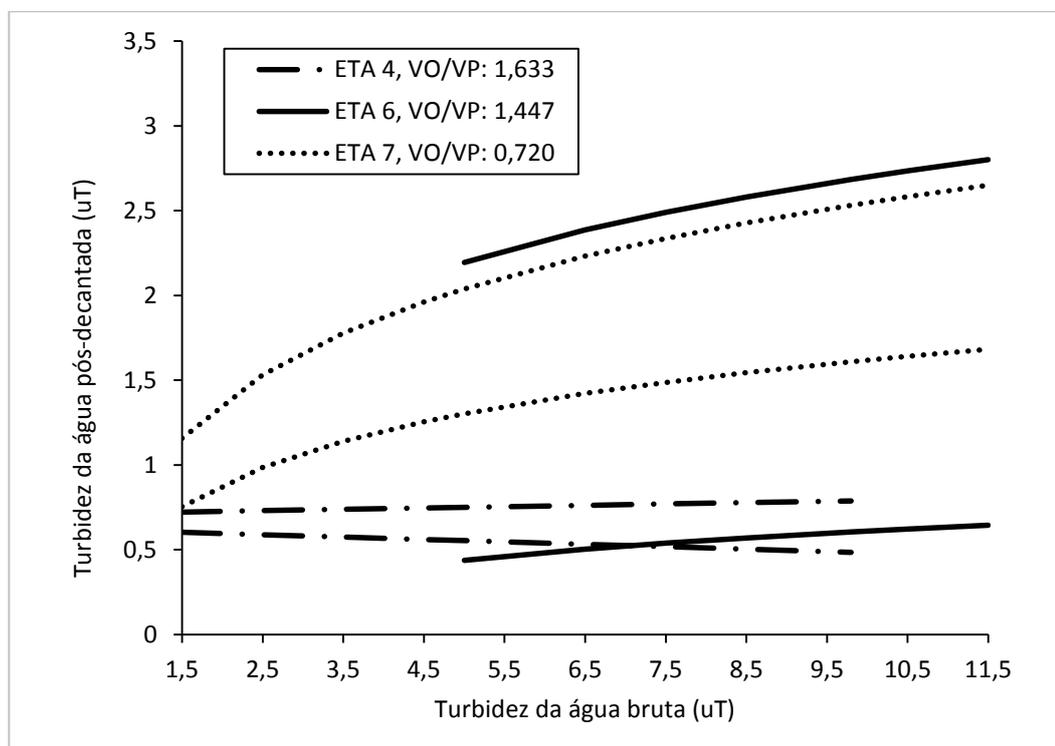


Figura 4.6. Amplitude da turbidez da água clarificada em função da turbidez da água bruta para as 3 ETAs que captam água com turbidez abaixo de 15uT e suas razões VO/VP

A amplitude de valores de turbidez da água clarificada para um valor de turbidez da água bruta está associada ao controle do processo, considerando que a turbidez da água clarificada não deveria depender da turbidez da água bruta, cuja variação é um distúrbio do processo. Nesse sentido, uma curva com pequena inclinação indicaria um processo em

que o distúrbio da turbidez da água bruta foi compensado e, se somada a uma baixa amplitude de dispersão, caracteriza um processo bem controlado. Nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 é possível visualizar que as ETAs 4 e 5 seriam as ETAs com o melhor controle de processo entre as ETAs avaliadas. Comparando as ETAs avaliadas de forma geral ou dentro do subgrupo ao qual foram divididas nas Figuras 4.5 e 4.6, chega-se também a outras observações:

- A amplitude da dispersão de dados de médias da turbidez da água clarificada ao variar a turbidez da água bruta se mantém aproximadamente constante para as ETAs, com exceção da ETA 5 que apresenta aumento de dispersão na medida que a turbidez da água bruta aumenta, mas o valor desse aumento é pouco significativo na ordem de grandeza analisada.
- Entre as ETAs que recebem água com baixa turbidez, destaca-se que a ETA 4 tem a menor amplitude de dispersão de dados e a ETA 7 tem a maior dispersão. Entre as ETAs que recebem água com turbidez mais elevada, destaca-se que as ETAs 2 e 3 tem uma amplitude de dispersão semelhante, mas essas dispersões são distanciadas. Acredita-se que o fato da ETA 2 ter valor de VO/VP menor que a ETA 3 seja a única diferença significativa entre os processos e que causa a diferença da tendência central dos comportamentos das duas ETAs.
- A ETA 1 apresenta baixa dispersão, porém a variação da turbidez da água bruta com relação à turbidez da água decantada é alta. Acredita-se que seja por ter elevada relação VO/VP.
- Embora a variável VO/VP das ETAs com turbidez alta avaliadas possa ser utilizada para descrever o comportamento das tendências centrais dos processos de clarificação, esta mesma variável não consegue descrever a amplitude dos dados.

Segundo conversa com técnicos da companhia que gerenciam as ETAs, a dispersão deve-se, principalmente, a diferenças de temperatura. Em dias quentes a eficiência de remoção é maior do que em dias frios. O fenômeno seria causado pela cinética da reação que fica prejudicada em baixas temperaturas. Essa dispersão é causada também por dificuldades operacionais em ajustar a dosagem de produtos químicos e mudanças na qualidade da água bruta, já discutida anteriormente com o exemplo da ETA 2.

Para tentar comparar a amplitude da dispersão dos dados do processo de clarificação, também foram comparados os conjunto de instalações projetadas para as etapas de floculação e decantação, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Tipos de Floculadores e Decantadores das ETAs avaliadas

ETA	Floculadores	Decantadores
1	1 Circular	3 Altas Taxas
	1 Alabama	
2	Alabama	1 Circular
		2 Retangulares
3	Convencional	Retangular
4	2 Convencionais	2 Retangulares
5	2 Convencionais	2 Retangulares
6	Alabama	4 Retangulares
	Convencional	
7	4 Convencionais	2 Retangulares
8	2 Convencionais	2 Retangulares

Como uma ETA opera em um processo em que a matéria-prima (água bruta) pode mudar constantemente, possivelmente há várias causas especiais dentro dos limites de controle do processo decorrentes dessa peculiaridade do processo. Mas, comparando os resultados obtidos pelas ETAs da Figura 4.6 e os equipamentos usados (Tabela 4.2) pode-se supor que o floculador tipo Alabama seja responsável por aumentar a dispersão dos resultados de turbidez da água decantada, já que a ETA 6 é a única a usá-lo entre as ETAs que recebem água bruta com turbidez baixa e tem a maior dispersão de resultados.

Comparando os resultados obtidos pelas ETAs que recebem água bruta com turbidez mais elevada (Figura 4.5) e os equipamentos utilizados (Tabela 4.2) não foi possível encontrar a mesma relação. Visto que as ETAs 2 (com floculador Alabama) e ETA 3 (com floculador convencional) apresentam amplitudes de dispersão muito semelhantes na Figura 4.5. Porém, quando se compara a amplitude da dispersão dessas ETAs pelo decantador usado percebe-se que a ETA 1 que tem o processo de clarificação com menor amplitude de dispersão possui decantadores de altas taxas enquanto que as ETAs 2, 3 e 8 que possuem decantadores retangulares tem maior amplitude na dispersão de valores de turbidez da água clarificada para mesmo valor de água bruta. Portanto, supõe-se que o decantador tipo altas taxas diminua a amplitude da dispersão de valores da turbidez da água clarificada para mesma água bruta, auxiliando no controle do processo.

Apesar de serem várias as causas da relação entre a turbidez da água bruta e a turbidez da água tratada, verifica-se que nas ETAs estudadas, o aumento do coeficiente angular desta relação está correlacionado com o aumento da vazão de operação em relação a de projeto e que a amplitude da dispersão dos dados tem correlação com os equipamentos utilizados para o tratamento.

Assim, a eficiência do processo de clarificação é dependente da adequação dos equipamentos para a qualidade da água bruta do manancial. Pelo estudo realizado, verifica-se que águas represadas captadas para tratamento, caso das ETAs 4, 6 e 7,

apresentam turbidez mais baixa e permitem que após o tratamento atinja-se menores valores de turbidez na água tratada, minimizando os riscos de contaminação biológica.

4.2 Análise dos dados do processo de filtração

Para avaliar o processo de filtração, foram relacionadas as médias diárias da turbidez da água pós-decantada com o resultado da turbidez da água tratada. Embora o valor de turbidez da água tratada não possa ser considerado a turbidez da água pós-filtração, acredita-se que a aproximação para a avaliação do processo de filtração não gera erros elevados, pois se verificou que a turbidez da água tratada não apresenta valor muito diferente da média da turbidez da água dos filtros, de modo que a turbidez adquirida na desinfecção, fluoretação não costumam ser significativas. Ao plotar o gráfico da média diária de turbidez da água pós-decantada versus turbidez da água tratada de uma ETA, exemplificada pelo gráfico obtido para a ETA 2 na Figura 4.7, e aplicar sua linha de tendência é possível observar uma relação diretamente proporcional entre as variáveis.

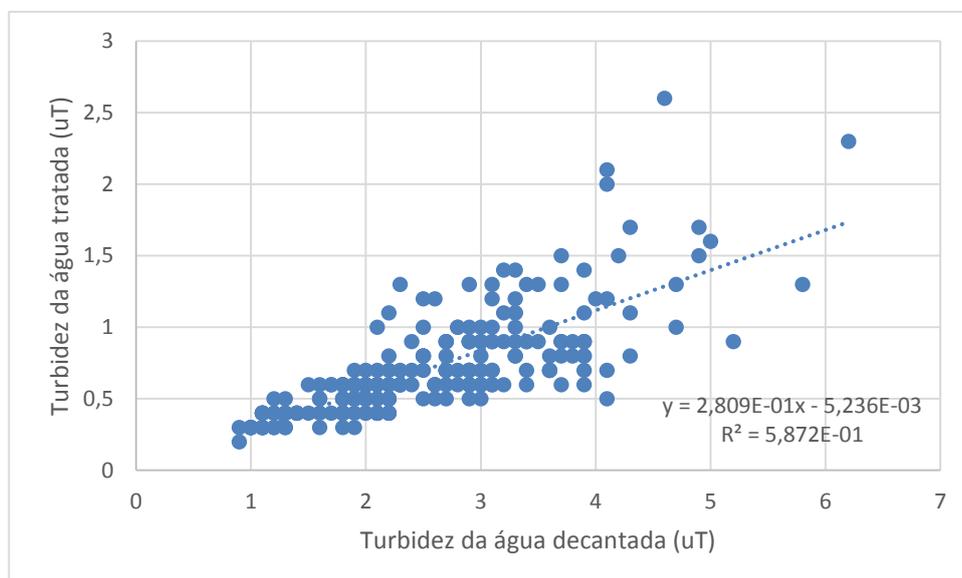


Figura 4.7. Turbidez da água tratada em função da turbidez da água clarificada da ETA 2

O fato de haver uma relação diretamente proporcional entre a turbidez de entrada e saída do processo é preocupante, haja visto a necessidade que as ETAs tem de atender a legislação prevê um valor fixo pós-filtração de 0,5 uT (para 95% das amostras coletadas de 2 em 2 horas) e de 5,0 uT (para a água no reservatório ou na rede de distribuição).

4.2.1 Análise da tendência central e dispersão dos processos de filtração

A tendência central do comportamento do processo de filtração para as ETAs de turbidez alta e das ETAs de turbidez baixa estão na Figura 4.8 e Figura 4.9, respectivamente. Para comparar a influência da vazão na etapa de filtração das diferentes ETAs, empregou-se a variável taxa específica média de filtração. Algumas ETAs possuem filtros de camada simples e de dupla, baseado no entendimento da NBR 12216 que prevê taxa específica de filtração duas vezes maiores para filtros de camada dupla do que para filtros de camada simples ($360 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ e $180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). Essa distorção foi contornada normalizando as áreas dos filtros de camada dupla (multiplicando-as por 2). Logo as estações com taxa específica de filtração média acima de $180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ atuam acima do que recomenda a referida norma. Algumas linhas dos gráficos que descrevem o

comportamento do processo de filtração das ETAs avaliadas não estão completas por falta de valores de turbidez de água decantada na faixa analisada, de modo a evitar a extrapolação as tendências de comportamento encontradas.

Além das considerações já citadas, é necessário considerar problemas em filtros específicos que comprometem o resultado da filtração e os efeitos da distribuição não uniforme da vazão, suposta no parágrafo anterior, causando diferenças nas taxas específicas dos filtros e, conseqüentemente na qualidade da água filtrada.

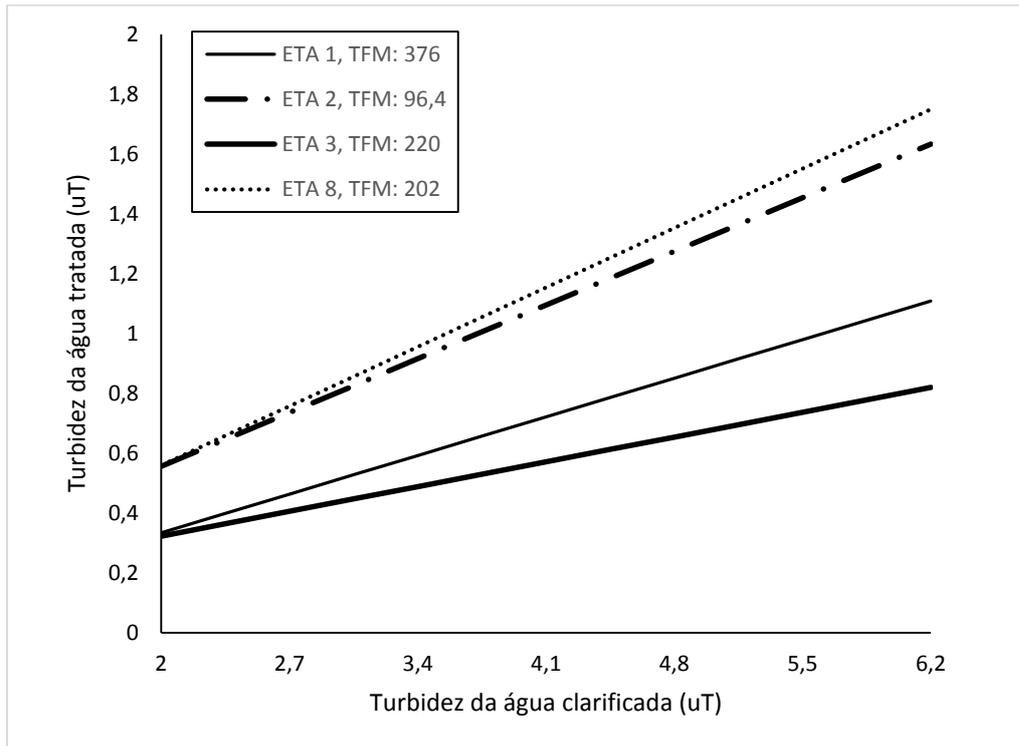


Figura 4.8. Turbidez média da água tratada em função da turbidez da água clarificada para as 4 ETAs com turbidez de água clarificada entre 2,0 uT e 6,8 uT e suas razões VO/VP

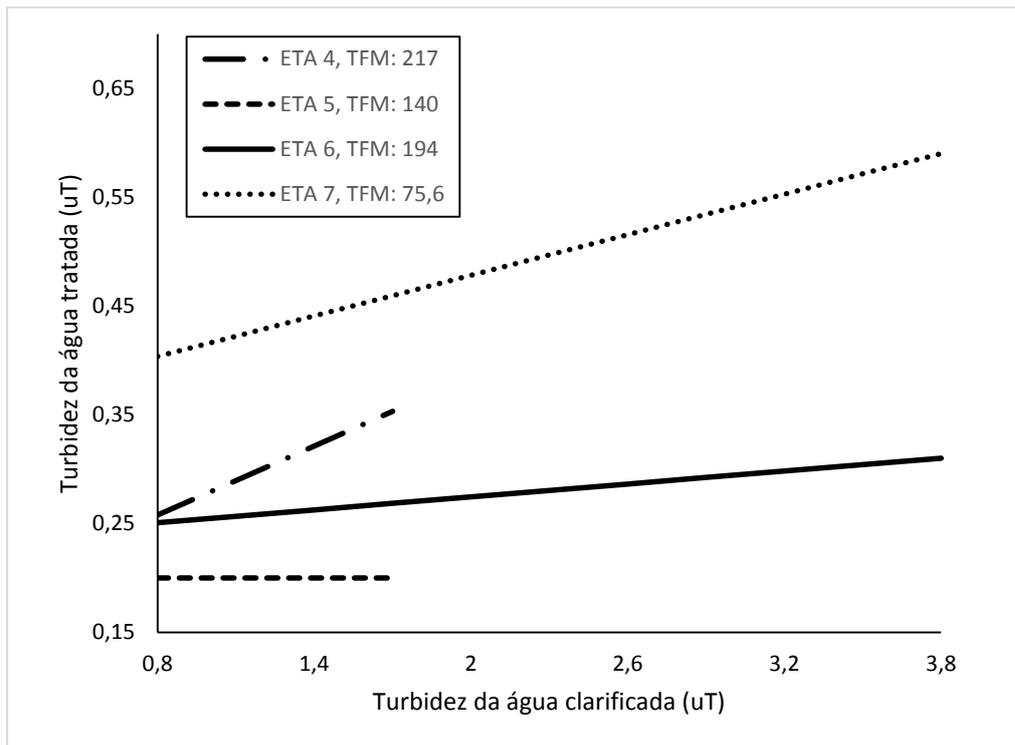


Figura 4.9. Turbidez média da água tratada em função da turbidez da água clarificada para as 4 ETAs com turbidez de água clarificada entre 0,8 uT e 3,8 uT e suas razões VO/VP

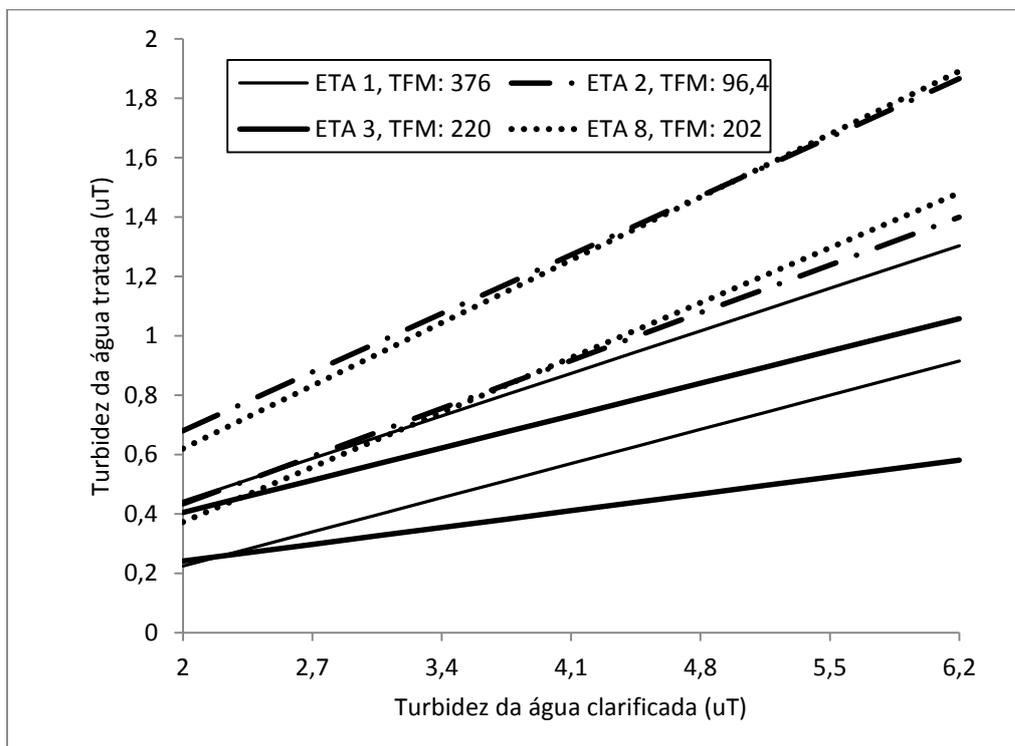


Figura 4.10. Amplitude da dispersão da turbidez da água tratada em função da turbidez da água clarificada para as 4 ETAs com turbidez de água clarificada entre 2,0 e 6,2 uT e suas razões VO/VP

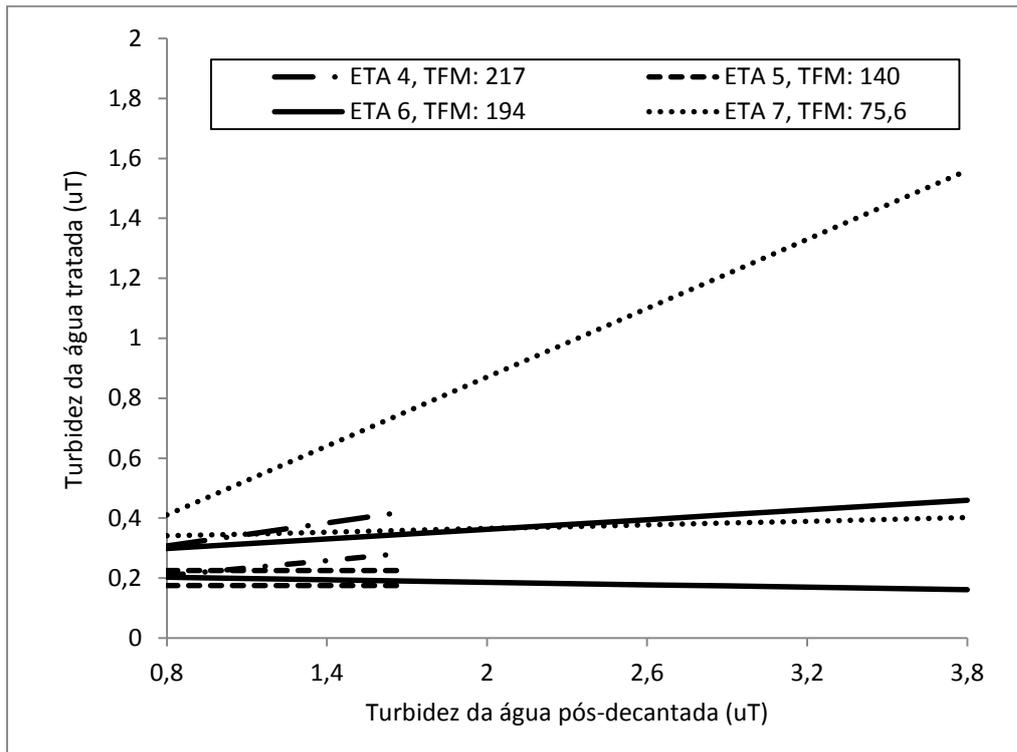


Figura 4.11. Amplitude da dispersão da turbidez da água tratada em função da turbidez da água clarificada para as 4 ETAs com turbidez de água clarificada entre 0,8 uT e 3,8 uT e suas razões VO/VP

- Não foi possível verificar uma relação entre a taxa específica de filtração média (TFM) e o comportamento do processo de filtração através da comparação das ETAs avaliadas. Apesar da NBR 12216 prever um limite para taxa específica de filtração, as ETAs 3 e 6 com taxa específica de filtração média acima do recomendado pela norma resultam maior eficiência de remoção de turbidez da água que as ETAs 2 e 7, que estão dentro do recomendado.
- As ETAs 5 e 7 possuem o melhor desempenho de remoção da turbidez da água decantada e pior desempenho para as ETAs com água de turbidez alta, respectivamente. Aparentemente, não há parâmetros avaliados que sugerem essa relação. No entanto, o processo de colmatação das camadas filtrantes dos filtros é bastante complexo e pode ser que a comparação de ETAs com qualidade da água bruta diferentes não seja viável em visto disto.
- Apesar das ETAs 4 e 6 possuírem um processo de filtração com comportamento diretamente proporcional entre a turbidez da água pós-decantada e a turbidez da água tratada, essas garantem a turbidez da água tratada abaixo de 1,0 uT durante o período em que seus dados foram analisados. Aparentemente o fato de captarem água com turbidez máxima de 15 uT foi importante para atingir esses resultados.
- A ETA 5 foi a ETA com melhor controle de processo. Ao longo de um ano, teve sempre turbidez média da água filtrada 0,2 uT, ou seja, variando abaixo da capacidade da unidade de medida em que os dados foram registrados. Além de

méritos operacionais, a ETA possui a menor relação VO/VP entre as ETAs estudadas e taxa específica de filtração média abaixo do limite recomendado pela NBR 12216.

- A ETA 7 apresenta dispersão maior que as demais ETAs do subgrupo de turbidez baixa e dependente da turbidez da água decantada (Figura 4.11), indicando que o processo de filtração é ineficiente ou ainda que a hipótese do armazenamento não aumentar a turbidez na água tratada foi falseada neste caso.

Acredita-se que a relação diretamente proporcional identificada nas Figuras 4.8 e 4.9 é decorrente de decisões operacionais, pois os operadores das estações de tratamento costumam manter o tempo de carreira dos filtros constante, porém poderiam diminuir esse tempo entre as lavagens quando a turbidez da água clarificada se eleva, para controlar a turbidez que sai após o processo de filtração. Acredita-se que não é usada a perda de carga dos filtros ou de turbidez limite na saída dos filtros para determinar a frequência da lavagem dos mesmos.

Segundo técnicos da companhia responsável, a diminuição dos tempos de carreira pode implicar em reduções significativas no volume da água produzida pela ETA e, por consequência no desabastecimento da população. O aumento na produção de água em períodos em que a turbidez da água decantada estivesse mais baixa e sua armazenagem, permitiriam a diminuição dos tempos de carreira quando a turbidez da água clarificada fosse mais elevada, melhorando a qualidade da água nos períodos de turbidez de água bruta elevada.

Embora o valor da turbidez da água tratada não seja o resultante da remoção de turbidez dos filtros pelos motivos citados anteriormente, o fato de ser possível estabelecer uma relação crescente entre a turbidez da água tratada com a turbidez da água filtrada revela a necessidade de etapas de coagulação, floculação e sedimentação eficientes.

Com relação aos filtros, todas as ETAs possuem filtros rápidos descendentes, portanto a análise de equipamentos para avaliar seu efeito na amplitude das dispersões nos comportamentos dos processos de filtração não se justifica.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

A partir dos resultados encontrados para o processo de clarificação, pode-se concluir que a turbidez da água clarificada tende a aumentar a medida que a turbidez da água bruta se eleva e esse efeito é mais significativo em estações de tratamento de água que tem vazão de operação acima da vazão de projeto.

O comportamento logarítmico encontrado entre a turbidez da água bruta e clarificada nos processos de clarificação de várias ETAs avaliadas foi descrito por Yao (2014) que apontou que a concentração de partículas com diâmetros maiores 5 μm tende a aumentar a medida que a turbidez se eleva independente da qualidade da água. Partículas maiores formam flocos maiores e com maior velocidade de sedimentação no decantador e, por consequência, ocorre maior remoção de turbidez na etapa de clarificação.

O fato de estações de tratamento de água que tem vazão de operação acima da de projeto apresentarem maior turbidez de água clarificada para mesma turbidez de água bruta pode ser explicada pela velocidade longitudinal da água no decantador, pois quanto maior for essa velocidade, maior terá que ser a velocidade de sedimentação dos flocos para que sedimentem no decantador. Isto leva a concluir que flocos intermediários possuem maior fração de remoção em ETAs com menor vazão de operação em relação a vazão de projeto.

A variável VO/VP não apresentou efeito significativo para ETAs avaliadas que recebem água com turbidez abaixo de 15 uT e os resultados de turbidez da água clarificada destas ETAs foram mais baixos que das ETAs que recebem água bruta acima de 13 uT.

A partir dos resultados encontrados para o processo de filtração, pode-se concluir que a turbidez da água tratada tende a aumentar a medida que a turbidez da água clarificada se eleva, e não foi possível identificar relação entre esse efeito nas estações de tratamento de água que tem taxa de filtração média dos filtros maior que a recomendada pela norma NBR 12216.

Conclui-se que o comportamento do processo de filtração é fruto de decisão operacional, na medida que a turbidez poderia ser controlada diminuindo os tempos de carreira de filtração quando a turbidez da água clarificada estivesse mais elevada. O comportamento esperado para esse processo seria logarítmico de tender a um patamar da turbidez da água tratada a medida que a água clarificada aumenta.

Não foi possível encontrar relação entre as taxas de filtração média das ETAs analisadas comparando o comportamento do processo de filtração, pois o mecanismo de ação da profundidade ligado a teoria da colmatação das camadas dos filtros está relacionado com as características da água clarificada de cada ETA. Outros aspectos como: divisão da vazão por filtros e filtros operando com problemas também podem ter dificultado essa associação.

Conclui-se considerando as ETAs avaliadas no estudo que as variáveis qualidade da água bruta e vazão influenciam nos resultados de turbidez da água pós-filtração considerando as ETAs avaliadas no estudo. Esse resultado é preocupante, pois várias ETAs

avaliadas atingiram turbidez de água tratada acima de 1,0 uT após a filtração rápida o que não garante a eliminação de protozoários, helmintos e bactérias. Uma solução para eliminação desse risco é que as ETAs que operam acima da vazão de projeto e recebem água com turbidez acima de 13 uT recebam investimentos para ampliação do processo de tratamento de água no médio e longo prazo. Outras alternativas a serem testadas seriam a adoção de outro agente coagulante, controles de temperatura da água bruta e controle automatizado da dosagem de agente coagulante. No curto prazo, é necessário que haja monitoramento da água tratada através de análises de protozoários, helmintos e bactérias.

Para trabalhos futuros, seria interessante avaliar a influência da temperatura no comportamento do processo de clarificação. Também seria interessante estudar a implementação de alternativas de automação e controle em ETAs para buscar atingir resultados de turbidez preconizados pela legislação.

6 Referências

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. L. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *JAWWA*, v. 74, n. 4, p. 20, Apr. 1982.

BRASIL. Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. *Diário Oficial da União. Poder Executivo*. Brasília, DF: Congresso Nacional, 1989. Disponível em: . Acesso em: 02 abr. 2016.

BERNARDO, Luiz Di ; DANTAS, A. D. B. . Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2. ed. São Carlos: Rima Editora, 2005. v. 2.

BERNARDO, L. DI; PAZ, L. P. S. Seleção de tecnologias de tratamento de água. São Carlos: LDiBe, 2010. p. 868.

CAMP, T. R. Sedimentation and the design of settling tanks. *ASCE Transactions*, v. 111, p. 895-936, 1946.

CAMP, T. R. Studies of sedimentation basin design. *Sewage & Industrial*, v. 25, n. 1, 1953.

CARVALHO, EMF de et al. O processo de transição epidemiológica e iniquidade social: o caso de Pernambuco. *Revista da Associação de Saúde Pública do Piauí, Teresina*, v. 1, n. 2, p. 107-119, 1998.

CARVALHO, J. S. Influência das características da camada filtrante e da taxa de filtração na eficiência de remoção de *Microcystis aeruginosa* e microcistina na filtração lenta em areia. Universidade de Brasília, 2006.

FAUST, S. D.; ALY, O. M. Chemistry of water treatment. 2nd ed. USA: Lewis Publishers, 1998.

FLAING, W.; HEUDSPACHER, H; RIETZ. Chemical composition and physical properties of humic substances. In: GIESEKING, J. E. Soil components. New York: Springer-Verlag, 1975. v. 1, p. 1-211.

GABARRÓN, S.; GERNJAK, W.; VALERO, F.; BARCELÓ, A.; PETROVIC, M.; RODRÍGUEZ-RODA. Evaluation of emerging contaminants in a drinking water treatment plant using electrodialysis reversal technology. *Journal of Hazardous Materials*, v.309 pg 192-201, 2016.

GREGORY, J. Effect of polymers on colloid stability. In: *The scientific basis of flocculation*. The Netherlands: Sijthoff and Noordoff, 1978.

HAFIZA, N. A. R.; MANGALA, S. P.; ZAHARIN, A. A.; HASHIM, Z. Drinking water studies: A review on heavy metal, application biomarker and health risk assessment (a special focus in Malaysia). *Journal of Epidemiology and Global Health*, v.5, pg 297-310, 2015.

IVES, K. J. Capture mechanisms in filtration: the scientific basis of filtration. Netherlands: Nato Advanced Study Institute, 1975.

KAYSER, G. L. Drinking water governance: A comparative case study of Brazil, Ecuador and Malawi. *Journal of Environmental Science & Policy* v.48 pg 186-195, 2015.

KHAN, K.; LU, Y.; KHAN, H.; ZAKIR, S.; KAHN, S.; IHSANULLAH.; KHAN, A. A.; WEI, L.; WANG, T. Health risks associated with heavy metals in the drinking water of northern Pakistan. *Journal of Environmental Sciences* v.25 pg 2003-2013, 2013.

KONONOVA, M. M. Soil organic matter. Oxford: Pergamon Press, 1966. p. 75-156.

LESSELS, J.S. Estimating water quality using linear mixed models with stream and turbidity. *Journal of Hydrology*, pg 13-23, 2013.

MANUAL de procedimentos de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano. Brasília: MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006.

PINTO, F.B. Avaliação do desempenho de uma estação de tratamento de água do município de juiz de fora - MG. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO A. A. Introdução à química ambiental. Editora Bookman, pg 29-33, 2004.

SCALIZE, P. S. Estudo da Influência da temperatura da água bruta na eficiência do coagulante químico. *Sodebras*, v.7, n. 80 pg.3-9, 2012.

WILLIAMS, R. L. Microelectrophoretic studies of coagulation with aluminum sulfate. *JAWWA*, v. 57, n. 6, p. 801-810, 1994.

XU, L.; OUYANG, W.; QIAN, Y.; SU, C.; SU, J.; CHEN, H. High-throughput profiling of antibiotic resistance genes in drinking water treatment plants and distribution systems. *Environmental Pollution*, v.213 pg 119-126, 2016.

YAO, M. Effect particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes. *Desalination*, pg 116-124, 2014.

ZINI, L. B. Contaminação de agrotóxicos na água para consumo humano no RS: avaliação de riscos, desenvolvimento e validação de método empregando SPE e LC-MS/MS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.