

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

Michell Smith Gomes da Silva

**Adequação das condições operacionais de uma ETA “convencional” que trata
água com cor e turbidez baixas**

Natal/RN

2016

Michell Smith Gomes da Silva

**Adequação das condições operacionais de uma ETA “convencional” que trata
água com cor e turbidez baixas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Dr. Hélio Rodrigues dos Santos

Co-orientador: Dr. André Luis Calado Araújo

Natal/RN

2016

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas
Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Silva, Michell Smith Gomes da.

Adequação das condições operacionais de uma ETA
"Convencional" que trata água com cor e turbidez baixas / Michell
Smith Gomes da Silva. - 2016.

38f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande
do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Sanitária. Natal, RN, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. André Luís Calado Araújo.

1. ETA (Estação de tratamento de água) - Adequação -
Dissertação. 2. Ciclo completo – Dissertação. 3. Filtração Direta
Descendente - Dissertação. 4. Pré-oxidação – Dissertação. 5.
Adsorção – Dissertação. 6. Coagulação - Dissertação. I. Santos,
Hélio Rodrigues dos. II. Araújo, André Luís Calado. III. Título.

RN/UF/BCZM

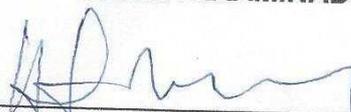
CDU 628.16

Michell Smith Gomes da Silva

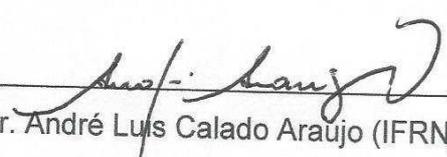
**Adequação das condições operacionais de uma ETA “convencional” que
trata água com cor e turbidez baixas**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Sanitária da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte, como
requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Sanitária

BANCA EXAMINADORA



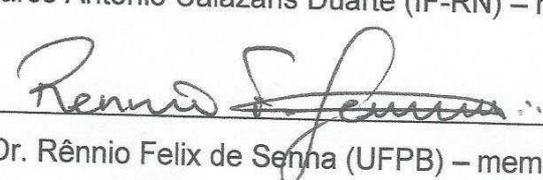
Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos (UFRN) - Orientador



Prof. Dr. André Luis Calado Araujo (IFRN) – Co-orientador



Prof. Dr. Marco Antônio Calazans Duarte (IF-RN) – membro externo



Prof. Dr. Rênio Felix de Senna (UFPB) – membro interno

Natal/RN

2016

DEDICATÓRIA

Toda glória e todo o louvor seja sempre dada ao nosso Senhor, Jesus Cristo, pois Ele sempre foi minha principal fonte de inspiração e motivação para que eu sempre tenha força, ânimo e vontade para superar todos os obstáculos da vida, crendo sempre em suas promessas...

Aos meus avôs, em memória, amo-os bastante e jamais me esquecerei deles...

Aos meus pais, por toda a educação, amor e dedicação a minha vida, desde o início, ensinaram-me a diferenciar o certo do errado e que os estudos sempre foi o caminho que vale a pena a trilhar...

A minha fiel companheira e amada, Bruna Medeiros, pela paciência, atenção, amor e motivação em me ajudar, principalmente nos momentos de enfermidades.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus todo poderoso, por nunca me abandonar, por nunca deixar a predominância da solidão e tristeza em minha vida, por mais difíceis momentos os quais passei. Momentos estes que me serviram como aprendizado e não fizeram perder o meu rumo, o caminho para uma vida melhor sempre em busca da paz interior.

Aos meus pais, Edvaldo e Marília, e meus irmãos, Michelly e Wendell, por toda a atenção, apoio e preocupação para comigo.

Bruna Medeiros, fiel companheira, que nunca me deixou desamparado, sempre foi um abrigo acolhedor e quente em momentos frios e preocupantes.

Aos meus “primos adotivos”, pelos quais tenho um enorme carinho, Carina, Jéssica, Keli, Riquelma, Fernanda, Alex, Allan, Ary e Rodrigo, agradeço por todos os momentos alegres que tivemos. A todos da família Medeiros, que me acolheram como um filho.

À minha grande amiga Larissa Saraiva, primeira pessoa que conheci no mestrado e teve grande presença em toda minha trajetória. Sempre otimista e confiante, uma pessoa sem igual, sempre disponível a ajudar no que for necessário.

Ao meu orientador Hélio Rodrigues, uma grande pessoa, pelos seus ensinamentos e orientações para que eu pudesse despertar no mundo acadêmico, o que refletiu também em meu perfil profissional e social, sempre pensando em meu melhor e da nossa pesquisa.

Aos professores André Calado, Marco Calazans e Rênio Felix, cada um me ajudou de formas diferentes, principalmente nas necessidades, retribuindo com toda a disponibilidade, atenção e dedicação.

À minha turma do mestrado em engenharia sanitária, por todos os momentos alegres, descontração, aflições coletivas e todos os momentos em que passamos juntos.

A todo o pessoal do laboratório de solos do IF-RN, que me cederam espaços para o desenvolvimento de algumas etapas da pesquisa e alguns reagentes.

A toda turma do LARHISA, Pedro Câmara, Rosana do Nascimento, Vanessa Becker e a todos que contribuíram.

À turma do Laboratório de Carvão ativado, da UFPB, que me recebeu e dedicou sua atenção e seu tempo quando estive no laboratório da UFPB, acompanhando em alguns experimentos e trocas de conhecimentos.

À Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), através do técnico em engenharia Man Cheng que autorizou o desenvolvimento desta pesquisa e ter me atendido em alguns momentos.

Toda a equipe da ETA Extremoz, como o engenheiro Francisco Canindé, pela permissão da realização desta pesquisa, disponibilidade do laboratório e de dados necessários à pesquisa, a Francisca Ferreira (Quinha), Sr. Luiz Eduardo, Fernando Querino e todos os funcionários que trabalham na ETA, com certeza também foram lembrados nesta pesquisa.

A todos não citados que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e me apoiaram todo este tempo, meus sinceros agradecimentos.

“Talvez não tenha conseguido fazer o meu melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes.”

Marthin Luther King Jr.

RESUMO

SILVA, M. S. G. **Adequação das condições operacionais de uma ETA “convencional” que trata água com cor e turbidez baixas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2016.

Águas com turbidez e cor aparente baixas a moderadas são eventualmente desafiadoras para tratar, principalmente em Estações de Tratamentos de Água (ETAs) de ciclo completo com clarificação por decantação (ETAs “convencionais”). Esse tipo de água pode ser coagulada no mecanismo de varredura, geralmente com dose de coagulante elevada, a fim de produzir flocos sedimentáveis que sejam removidos no decantador. Contudo a coagulação no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas é vantajosa, com dose usualmente mais baixa, sendo que, nesse caso, haverá apenas a desestabilização das partículas e a formação de flocos muito pequenos (não sedimentáveis) que serão removidos nos filtros. Em alguns casos a ETA possibilita o *by-pass* da água diretamente para os filtros (com ou sem pré-floculação), pois as unidades de decantação praticamente perdem sua função e a ETA, embora fisicamente seja configurada como de ciclo completo, opera como um sistema de filtração direta. Apesar das vantagens desta configuração, é geralmente mais difícil para o operador encontrar a dose e pH adequados para coagulação no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas. O objetivo deste trabalho foi adequar uma ETA com tais características. Fizemos ensaios em jarteste simulando a tecnologia de ciclo completo e de filtração direta descendente, e tratamentos como pré-oxidação, coagulação, pré-oxidação com coagulação e adsorção com coagulação, variando as doses dos respectivos produtos em cada tratamento e em pH diferentes. Todos os tratamentos realizados atenderam a Portaria 2.914/11 para cor aparente, porém somente os tratamentos em que houve a coagulação atenderam para turbidez e cor aparente simultaneamente, sendo os melhores resultados do tratamento de pré-oxidação com coagulação.

Palavras-chaves: adequação de ETA, ciclo completo, filtração direta descendente, pré-oxidação, adsorção, coagulação.

ABSTRACT

SILVA, M. S. G. **Adequacy of operating conditions of a WTP conventional that treat water with low color and turbidity.** Dissertation (Master's degree in Sanitary Engineering) – Federal University of Rio Grande do Norte, Natal. 2016.

Water with turbidity and color apparent low to moderate are sometimes challenging to treat, especially in Water Treatment Plants (WTP) of full cycle with clarification by decantation (WTPs "conventional") because should be coagulated preferably in adsorption-neutralization mechanism loads. Such water can be coagulated in the sweep mechanism, generally with a high dose of coagulant, to produce settleable flocs which are removed in the decanter. However, it is also possible, in an advantageous overall, making the water coagulation at adsorption and charge neutralization mechanism with usually lower dose, and in this case there will be only a destabilization of the particles and formation of tiny floc (not settleable) to be removed on the filters. In some cases WTP enables the bypass of water directly to the filter (with or without pre-flocculation), since the decantion units practically lost its function and ETA, although it is physically configured as a complete cycle, it operates as a direct filtration system. Despite the advantages of this configuration, it is generally more difficult for the operator to find the dose and pH suitable for the adsorption and charge neutralization mechanism. The objective was to adapt a WTP with such characteristics. We did jar test tests simulating the complete cycle and downstream direct filtration, and treatments as pre-oxidation, coagulation, pre-oxidation with coagulation and adsorption coagulation, varying dosages of the respective products in each treatment and at different pH. All treatments performed attended Ordinance 2.914/11 for apparent color, but only the treatments in which there was coagulation attended for turbidity and apparent color simultaneously, and the best results of treatment of pre-oxidation with coagulation.

Keywords: ETA adequacy, full cycle, downstream direct filtration, pre-oxidation, adsorption, coagulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista de planta da ETA Extremoz.....	5
Figura 2 - Vista do conjunto jarteste + FLA.	9
Figura 3 - Esquema da execução da retrolavagem dos FLA.	11
Figura 4 – Cor aparente (a) e turbidez (b) remanescentes (\pm erro-padrão) na água filtrada em ensaios de pré-oxidação com dicloroisocianurato de sódio (cloroD).	14
Figura 5 – Cor aparente (a) e turbidez (b) remanescentes (\pm erro-padrão) na água filtrada em ensaios de pré-oxidação com hipoclorito de sódio (cloroH).	14
Figura 6 – Cor aparente (a) e turbidez (b) remanescentes (\pm erro-padrão) na água filtrada em ensaios de coagulação com PAC 23.	17
Figura 7 – Resultados da pré-oxidação com cloroD e coagulação: (a) cor aparente remanescente, (b) turbidez remanescente.	18
Figura 8 – Resultados da pré-oxidação com cloroH e coagulação: (a) cor aparente remanescente, (b) turbidez remanescente.	18
Figura 9 – Resultados da adsorção com CAP A e coagulação: (a) cor aparente remanescente, (b) turbidez remanescente.	21
Figura 10 – Resultados da adsorção com CAP B e coagulação: (a) cor aparente remanescente, (b) turbidez remanescente.	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento experimental do estudo.	8
Tabela 2 - Valores dos fatores hidráulicos utilizados para o estudo.....	9
Tabela 3 - Variáveis estudadas e as respectivas unidades e metodologias.	10
Tabela 4 – Estatística descritiva da caracterização da água bruta.....	13

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Material e métodos	4
2.1. Descrição da Estação de Tratamento de Água (ETA)	4
2.2. Delineamento experimental.....	5
2.3. Procedimentos para realização dos ensaios.....	9
2.3.1. Realização dos ensaios de pré-oxidação e de coagulação	11
2.3.2. Realização dos ensaios de pré-oxidação associado à coagulação e de adsorção associado à coagulação.....	12
3. Resultados e discussão	13
3.1. Caracterização da água em estudo.....	13
3.2. Ensaio de pré-oxidação com cloro (sem coagulação).....	13
3.3. Ensaio de coagulação com cloreto de polialumínio (PAC 23).....	15
3.4. Ensaio de pré-oxidação com cloro associado à coagulação com PAC 23.....	17
4. Conclusões	23
Referências bibliográficas	24

1. Introdução

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) podem ser classificadas, com relação à concepção, em dois tipos mais comuns: as de ciclo completo - que abrangem as etapas de coagulação, floculação, sedimentação ou flotação, filtração e desinfecção - e as de filtração direta - filtração direta ascendente e descendente, dupla filtração (nas quais ocorrem apenas as etapas de coagulação, eventualmente pré-floculação e filtração) e filtração lenta, seguida da desinfecção.

Quando a água pode ser tratada tanto por filtração direta quanto por ciclo completo, a primeira tecnologia apresenta como vantagem o menor custo de implantação e de operação, uma vez que não há necessidade de construir unidades de decantação (ou flotação) e, em alguns casos, também os floculadores podem ser dispensados (DI BERNADO, 2003).

As ETAs em ciclo completo podem ser convertidas para o tratamento por filtração direta nos períodos em que a água bruta do manancial apresentar qualidade compatível com esta tecnologia, o que possibilitará a redução do consumo de produtos químicos e também da geração de lodo (PÁDUA, 2001).

A concepção em ciclo completo deve ser empregada no tratamento de águas com turbidez e cor aparente médias a elevadas, sendo que, neste caso, a coagulação deverá ser realizada no mecanismo de varredura. Quando a água bruta possui valores baixos de turbidez e cor aparente, entretanto, o tratamento da água em ETAs de ciclo completo pode se tornar desafiador, pois neste caso, é desejável que a coagulação ocorra no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, o que exige o ajuste mais preciso do pH de coagulação e da dose de coagulante, que geralmente é bem menor do que no mecanismo de varredura.

Neste caso, contudo, a baixa sedimentabilidade dos flocos formados, devido à falta de um núcleo pesado para formação de flocos que sedimentem com facilidade, resulta em baixa eficiência das unidades de decantação, de modo que é preferível que a água coagulada ou pré-floculada seja encaminhada diretamente aos filtros (RITCHER, 2009), ou até mesmo sem esta etapa (filtração direta em linha). Em muitos casos, contudo, as ETAs em ciclo completo já existentes não possuem dispositivos para “*by-passar*” os decantadores, de maneira que, embora a água

passa por todas as unidades de tratamento (inclusive o decantador), a ETA funciona na verdade como por filtração direta.

Outra dificuldade que diz respeito ao tratamento de águas com cor baixa a moderada (resultante da presença de matéria orgânica de origem natural - MON). Em águas com MON de alto peso molecular, a dose de coagulante será geralmente baixa, de modo que a coagulação ocorra no mecanismo de neutralização de cargas; em águas com MON de baixo peso molecular, por sua vez, o mecanismo de coagulação geralmente mais eficaz é o de adsorção em superfícies de hidróxidos (mecanismo de varredura), e com dose de coagulante maior (MATILAINEN et al., 2010). Em muitos casos, contudo, além dos ajustes indicados na coagulação, a remoção eficaz de MON (cor verdadeira) só é efetiva com o emprego de tratamentos químicos auxiliares, como pré-oxidação e, eventualmente, adsorção.

Nesse contexto, frente às diversas variáveis intervenientes no tratamento adequado das águas que contêm cor e turbidez baixas a moderadas, os operadores das ETAs frequentemente encontram dificuldades para obter o ajuste mais adequado do sistema de tratamento. Além disso, a crescente restrição do padrão de potabilidade (Portaria 2914/2011) em relação à turbidez da água filtrada (tendo em vista maximizar a remoção de microrganismos) constitui outro desafio à operação de ETAs.

Tendo em vista a necessidade de ajuste de diversas características operacionais de uma ETA para que seja possível a obtenção de água tratada capaz de consistentemente atender ao padrão de potabilidade, aliado à falta de modelos abrangentes para auxiliar nas decisões operacionais, o ajuste das condições operacionais de ETAs é geralmente obtido com a realização de ensaios em unidades em escala piloto ou de laboratório, com destaque para os equipamentos de jarreste, cujos reatores de mistura atualmente podem ser facilmente acoplados a unidades de filtração, possibilitando a simulação das operações realizadas na ETA.

O objetivo desta pesquisa foi ajustar as condições operacionais de uma ETA que foi projetada empregando a tecnologia de ciclo completo que trata a água de um manancial com baixas turbidez e cor. Para isto, fizemos vários tratamentos envolvendo a pré-oxidação, coagulação e adsorção, variando as doses dos produtos aplicados e o pH. Os ensaios foram realizados em reatores do tipo jarreste

acoplados a filtros de laboratório, simulando a operação da ETA tanto em ciclo completo quanto por filtração direta.

2. Material e métodos

2.1. Descrição da Estação de Tratamento de Água (ETA)

A ETA Extremoz, localizada em Natal/RN, trata a água da Lagoa de Extremoz, situada no município de Extremoz. A ETA foi inaugurada em 1992, com uma vazão de projeto de 500 L/s, contudo, atualmente, a vazão de água tratada é de 700 L/s, suficiente para abastecer cerca de 70% da Zona Norte de Natal/RN.

Esta lagoa é abastecida principalmente através de infiltrações subterrâneas originada por tabuleiros arenosos que predominam na bacia hidrográfica. A lagoa ainda tem como afluentes os rios Guajirú e do mudo que a alimentam em menor proporção (DUARTE et al, 1997), e que podem ter papel significativo em épocas de enchurradas.

A ETA Extremoz foi projetada e construída segundo a concepção em ciclo completo, contando com as operações: mistura rápida em calha Parshall (coagulação e pré-oxidação); floculação por meio de dois conjuntos paralelos de floculadores, sendo cada conjunto com quatro câmaras em série com agitadores mecânicos (atualmente desativados); clarificação por sedimentação em dois decantadores paralelos de alta taxa; filtração em quatro filtros rápidos descendentes de areia; e desinfecção, com cloro (gasoso e dicloro isocianurato de sódio). A Figura 1 mostra a vista em planta da ETA Extremoz.

Na ETA utiliza-se o cloreto de polialumínio com 23 % de alumina (PAC 23) como coagulante, e geralmente opera com baixa dose de coagulante e em pH natural, o que provavelmente resulta na coagulação no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas. A água coagulada é então encaminhada aos floculadores que eram originalmente mecanizados, mas que atualmente se encontram praticamente inutilizados, pois os dispositivos de mistura dos mesmos (motores, agitadores) foram desligados, sendo que provavelmente ocorre alguma pré-floculação em virtude dos gradientes de mistura resultantes das passagens entre as câmaras de floculação. A seguir a água segue para os decantadores de alta taxa, que apresentam eficiência de remoção de partículas muito baixa, uma vez que os flocos formados são pouco sedimentáveis. Assim, embora a ETA Extremoz tenha sido concebida como de ciclo completo, a água coagulada praticamente apenas “atravessa” os floculadores e decantadores até ser filtrada, caracterizando a

operação da ETA como de filtração direta. Os leitos filtrantes dos quatro filtros da ETA são constituídos exclusivamente de areia.

Em virtude da presença de nutrientes na lagoa, frequentemente observavam-se florações de algas aderidas sobre as placas e dispositivos de coletados decantadores, o que foi resolvido pela cobertura dos mesmos.

A pré-oxidação é executada na Calha Parshall com uma dose baixa de cloro gasoso junto à aplicação de uma pequena dose do PAC 23 no mesmo ponto. Não há ajustes de pH para o tratamento. Com esta condição, após a filtração, a ETA comumente conseguia resultados médios nos quatro filtros de cor aparente e turbidez de 15,5 uH e de 1,05 uNT, respectivamente.

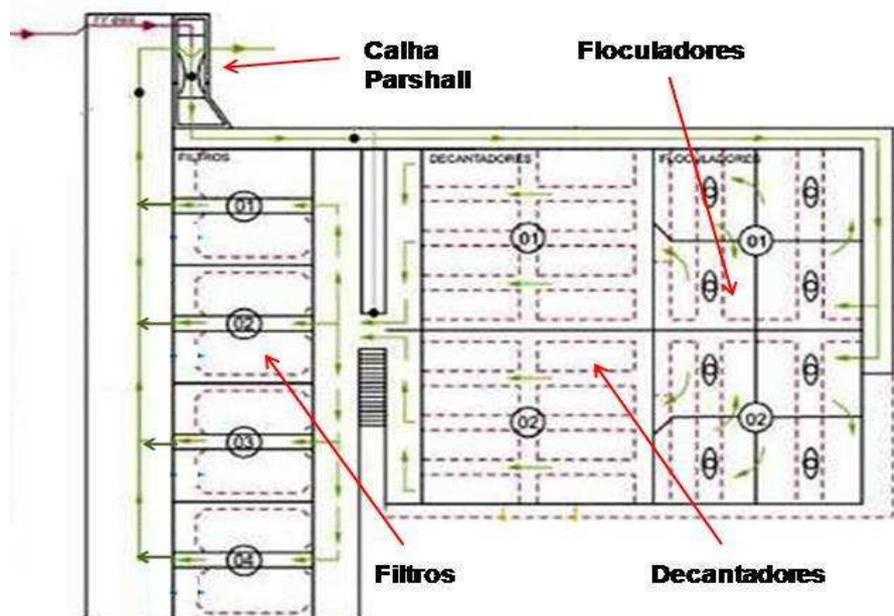


Figura 1 – Vista de planta da ETA Extremoz.

Fonte: Adaptado de Moraes Filho (2015).

2.2. Delineamento experimental

Para investigar as condições operacionais mais adequadas para a ETA Extremoz foram realizados ensaios em reatores do tipo jarteste acoplados a filtros de laboratório preenchidos com areia. Nesses ensaios, simulou-se o funcionamento da ETA tanto para operação em ciclo completo (CC) – que corresponde à configuração na qual ETA foi construída – quanto por filtração direta descendente (FDD) – configuração que poderia ser obtida mediante pequenas obras de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária

adequação na ETA, com a interligação dos floculadores diretamente ao canal comum de alimentação dos filtros.

Para estas duas configurações da ETA (CC e FDD), foi testada a adequabilidade dos seguintes processos de tratamento: (1) pré-oxidação com dicloroisocianurato de sódio (sem coagulação); (2) pré-oxidação com hipoclorito de sódio (sem coagulação); (3) coagulação com cloreto de polialumínio; (4) pré-oxidação com dicloroisocianurato de sódio associada com coagulação com cloreto de polialumínio; (5) pré-oxidação com hipoclorito de sódio associada com coagulação com cloreto de polialumínio; (6) e (7) adsorção com dois tipos de carvão ativado associada à coagulação com cloreto de polialumínio (ver Tabela 1).

Os produtos utilizados foram: o dicloro isocianurato de sódio 60% de cloro ativo (cloroD); o hipoclorito de sódio 12-14 % de cloro ativo (cloroH); e o coagulante foi o cloreto de polialumínio, com 23 % de alumina (PAC 23). Os carvões ativados em pó (CAP) possuíam as seguintes características: CAP A, área superficial pelo método BET – 814 m²/g e tamanho médio de poro – 37,5 Å (método BJH); CAP B, área superficial pelo método BET – 896,7 m²/g e tamanho médio de poro – 32,5 Å (método BJH).

O uso apenas dos agentes clorados é uma prática eventualmente utilizada. O dicloroisocianurato de sódio já é um produto utilizado pela ETA para desinfecção. O hipoclorito de sódio foi testado para avaliar o desempenho do cloro gasoso, já que ambos os produtos possuem comportamentos similares. Durante a pesquisa houve um período em que esta condição foi utilizada devido à falta do coagulante, e a ETA conseguiu resultados médios após a filtração de 14,7 uH para cor aparente e 1,47 uNT para turbidez.

Com relação às características, comparando o dicloroisocianurato de sódio com o hipoclorito de sódio, o primeiro possui uma maior estabilidade de armazenamento e na rede de distribuição de água, não há perdas por volatilidade e é de fácil manuseio justamente por ser um pó. Em relação à formação de trihalometanos (THM), o dicloroisocianurato de sódio não forma THM em níveis significantes justamente por ter características ácidas. Derivados de cloro com características alcalinas como o hipoclorito de sódio tendem a formar maiores níveis de THM (MACEDO, 2004).

O PAC 23 é o coagulante que a ETA Extremoz já utiliza. Além disto, coagulantes pré-hidrolizados como o PAC possuem uma menor dependência da temperatura e do pH quando comparados aos coagulantes convencionais, como o sulfato de alumínio (MATILAINEN et al, 2010). E frequentemente coagulantes pré-hidrolizados são mais eficazes que sais de ferro ou de alumínio, tanto para remover partículas coloidais (turbidez) como MON (cor aparente) (DUAN E GREGORY, 2003).

Para realização dos ensaios, inicialmente, foi feito um planejamento fatorial completo com um ponto central. Foram estabelecidos quais variáveis a serem estudadas e dois níveis para cada variável. Assim gerando $(2^k + 1)$ ensaios, ou seja, 2 níveis para cada fator, k fatores (depende do tratamento em questão) e 1 ensaio no ponto central. Foram feitas duas réplicas para cada ensaio. O planejamento fatorial realizado é mostrado na Tabela 1.

Para os tratamentos em que houve só pré-oxidação ou coagulação, tínhamos 2 fatores (dose do agente químico e pH), então tivemos $2^2 + 1 = 5$ ensaios. Já os tratamentos de pré-oxidação ou adsorção associado à coagulação tínhamos 3 fatores, o que gerou $2^3 + 1 = 9$ ensaios. Para determinar a ordem de execução dos ensaios, foi feita uma aleatorização como recomenda Barros Neto et al. (2010).

Tabela 1 – Planejamento experimental do estudo.

Operações	Produtos químicos utilizados	Configurações testadas	Fatores					
			pH	Dose (mg/L)				
				PAC 23	CloroD	CloroH	CAP A	CAP B
Pré-oxidação	CloroD	Ciclo completo; Filtração direta descendente	6,0; 6,8*; 7,7 **	-	1,40; 2,8*; 4,2	-	-	-
Pré-oxidação	CloroH			-	-	1,34; 2,68*; 4,02	-	-
Coagulação	PAC 23			2,0; 4,0*; 6,0	-	-	-	-
Pré-oxidação e coagulação	CloroD + PAC 23			2,0; 4,0*; 6,0	1,40; 2,8*; 4,2	-	-	-
Pré-oxidação e coagulação	CloroH + PAC 23			2,0; 4,0*; 6,0	-	1,34; 2,68*; 4,02	-	-
Adsorção e coagulação	CAP A + PAC 23			2,0; 4,0*; 6,0	-	-	2,0; 3,0*;4,0	-
Adsorção e coagulação	CAP B + PAC 23			2,0; 4,0*; 6,0	-	-	-	2,0; 3,0*;4,0

* Condição central dos ensaios; ** pH natural da água bruta

Legenda: CloroD – dicloroisocianurato de sódio; cloroH – hipoclorito de sódio; PAC 23 – cloreto de polialumínio.

2.3. Procedimentos para realização dos ensaios

Todos os ensaios realizados aconteceram *in loco* (ETA Extremoz), o que era estratégico à preservação das amostras. A coleta da água bruta sempre aconteceu antes da calha Parshall e a caracterização da mesma sempre antes da execução dos ensaios.

Foi utilizado o jarteste para realização dos ensaios de tratamento, um aparelho versátil capaz de simular as operações unitárias da ETA (coagulação, floculação e sedimentação), junto com Filtros de Laboratório de Areia (FLA), nos quais foram preenchidos com uma areia recolhida de praia. Primeiramente, esta areia foi levada ao laboratório de solos do IF-RN, retirou-se todo detrito, foi lavada com água potável para retirar toda a salinidade, depois lavada novamente com detergente para eliminar orgânicos e então foi secada a 105 °C. Após isto, identificou-se a granulometria, obtendo grãos na faixa de 0,30 a 0,42 mm, granulometria esta indicada por Di Bernado (2011). O conjunto jarteste com o FLA é mostrado na Figura 2 e a Tabela 2 mostra os valores dos fatores hidráulicos utilizados para esta pesquisa.



Figura 2 - Vista do conjunto jarteste + FLA.

Tabela 2 - Valores dos fatores hidráulicos utilizados para o estudo.

Operação	Gradiente de velocidade (s^{-1})	Tempo de detenção hidráulico (s)
Mistura rápida	900	1
Mistura lenta	40	1200

De acordo com a curva do equipamento jarreste utilizado, os valores para os gradientes de velocidade mostrados na tabela 2 para mistura rápida e mistura lenta foram convertidos para 350 e 60 RPM, respectivamente.

A velocidade de sedimentação é de 2,74 cm/min, o equivale a um tempo de sedimentação de 2,55 minutos, porém por questão de facilidade adotou-se 3 minutos. A única diferença entre os tratamentos em ciclo completo e o em filtração direta descendente estava na execução da etapa de sedimentação.

A filtração teve um tempo de duração de vinte minutos, sendo o volume dos primeiros 10 minutos era descartado para garantir uma completa substituição do volume de água já existente no leito filtrante. O volume seguinte de água filtrada era coletado para as análises, as quais são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis estudadas e as respectivas unidades e metodologias.

Variável	Unidade	Metodologia	Método referenciado (APHA et al., 1992)
Turbidez	uNT	Nefelometria	2130, B
Cor aparente	uH	Colorimetria	2120, C
Cloro residual	mg cloro/L	Colorimetria com DPD	4500 – Cl, G
pH	-	Potenciometria	4500 – H+, B

O procedimento para lavagens dos FLA é mostrado na Figura 3, utilizamos água potável em fluxo ascendente por 2 minutos aproximadamente. Depois executamos uma filtração com água destilada, como recomenda Di Bernado (2011).



Figura 3 - Esquema da execução da retrolavagem dos FLA.

2.3.1. Realização dos ensaios de pré-oxidação e de coagulação

A água bruta era coletada e levada ao laboratório para determinação da cor aparente, turbidez e pH. Após isto, eram transferidos 2 litros de amostra para cada jarro do jarteste e submetidos a uma agitação de 100 RPM. Para os ensaios em que o pH deveria ser ajustado, uma solução de ácido sulfúrico de 1/5 (uma parte de ácido sulfúrico para cinco partes de água destilada) e pH 0,50 (foi realizado tal medição para esta solução) era adicionada aos poucos, esperava-se um momento e retirava uma alíquota da água do jarro para medir o pH. Este procedimento era repetido até atingir o pH desejado. Para os ensaios em pH natural, não foram feitos ajustes. Feito isto, eram realizados os seguintes procedimentos:

- Após a agitação para ajustes no pH, o jarteste era programado de acordo com a tabela 2;
- Na mistura rápida, o tempo programado foi de 8 segundos para o equipamento atingir o *set point* e então adicionava o pré-oxidante ou o coagulante no último segundo, aproximadamente;
- Após a floculação de 1200 minutos, o jarteste desligava e então aguardava um tempo de sedimentação de 3 minutos;
- Acabada a filtração, o volume coletado de amostra era levado a bancada para medição da cor aparente, turbidez, pH e cloro residual (para pré-oxidação);

- Finalizado, os FLA eram lavados de acordo com os procedimentos recomendados por Di Bernado (2011).

2.3.2. Realização dos ensaios de pré-oxidação associado à coagulação e de adsorção associado à coagulação

Todo o procedimento inicial do item 2.3.1 era realizado da mesma forma, desde a coleta até os ajustes necessários de pH para os ensaios em meio ácido. Feito isto, eram realizados os seguintes procedimentos:

- Após a agitação para ajustes no pH, o jarreste era programado para iniciar 5 minutos numa agitação de 100 RPM antes da mistura rápida, momento em que se adicionava o pré-oxidante ou o CAP, dependendo do tratamento. A mistura rápida e da mistura lenta estão de acordo com a tabela 2;
- Na mistura rápida, o tempo programado foi de 8 segundos para o equipamento atingir o *set point* e então adicionar o coagulante no último segundo, aproximadamente;
- Após a floculação de 1200 minutos, o jarreste desligava e então aguardava um tempo de sedimentação de 3 minutos;
- Acabada a filtração, o volume coletado de amostra era levado a bancada para medição da cor aparente, turbidez, pH e cloro residual (para pré-oxidação);
- Finalizado, os FLA eram lavados de acordo com os procedimentos recomendados por Di Bernado (2011).

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização da água em estudo

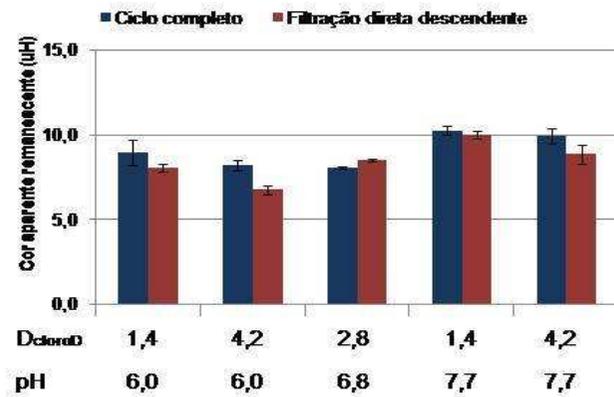
Para caracterização da água bruta proveniente da Lagoa de Extremoz, foram coletadas diversas amostras, previamente à realização dos ensaios em jarreste, entre os meses de dezembro de 2015 e fevereiro de 2016. Neste período, como ocorre tipicamente naquela manancial, a qualidade da água mostrou-se bastante estável, com baixos valores de turbidez (uNT) e cor aparente (uH) e pH levemente alcalino (ver Tabela 4).

Tabela 4 – Estatística descritiva da caracterização da água bruta.

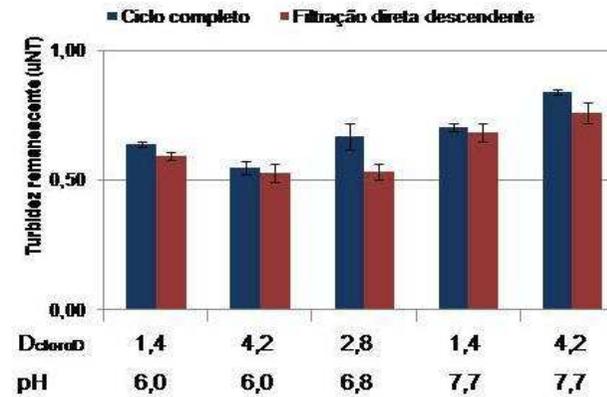
	Turbidez	Cor aparente	pH
Mínimo	1,20	18,6	7,54
Máximo	1,59	20,5	7,92
Média	1,41	19,7	7,70
Desvio padrão	0,074	0,613	0,101
Contagem	28	28	28

3.2. Ensaio de pré-oxidação com cloro (sem coagulação)

A Figura 4 mostra os resultados de cor aparente e turbidez dos ensaios com pré-oxidação utilizando o dicloroisocianurato de sódio (cloroD) e a Figura 5 os resultados obtidos com o emprego do hipoclorito de sódio (cloroH) como pré-oxidante, ambos simulando a operação da ETA em ciclo completo e em filtração direta descendente.

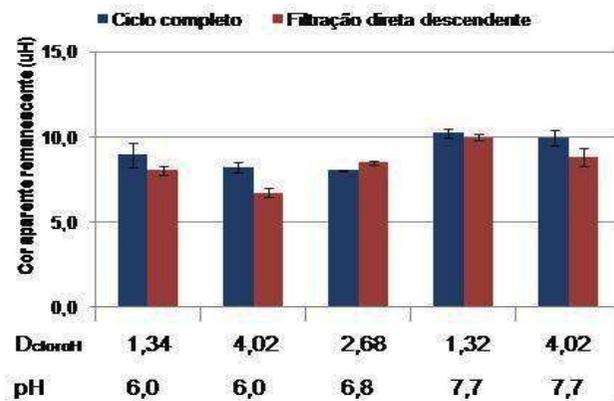


(a)

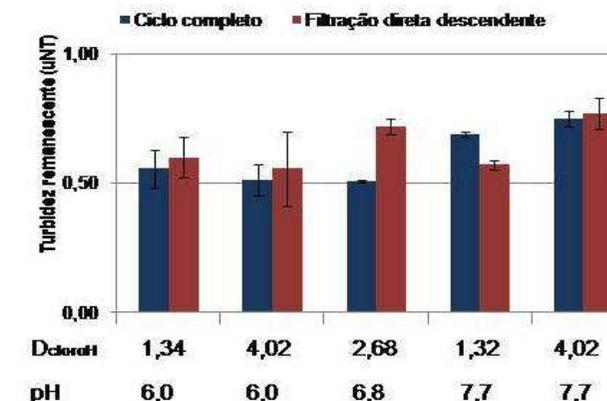


(b)

Figura 4 – Cor aparente (a) e turbidez (b) remanescentes (\pm erro-padrão) na água filtrada em ensaios de pré-oxidação com dicloroisocianurato de sódio (cloroD).



(a)



(b)

Figura 5 – Cor aparente (a) e turbidez (b) remanescentes (\pm erro-padrão) na água filtrada em ensaios de pré-oxidação com hipoclorito de sódio (cloroH).

Todos os ensaios realizados nesta etapa obtiveram resultados de cor aparente (Figura 4.a para o cloroD e Figura 5.a para o cloroH) que satisfizeram a exigência da Portaria 2.914/11 com relação à cor aparente (menor que 15 uH). Entretanto, nenhum ensaio atingiu o padrão de potabilidade para turbidez (menor que 0,50 uNT), o que pode ser verificado nas Figuras 4.b para o cloroD e 5.b para o cloroH. Isto ocorreu em virtude da ausência do coagulante, que se mostra essencial para remoção de partículas coloidais da água. Observa-se, portanto, que a pré-oxidação com cloro (sem coagulação) não possibilita a obtenção de água filtrada com qualidade suficiente para atender ao padrão de potabilidade.

Nas Figuras 4 e 5, as barras indicativas do erro-padrão de cada ensaio possibilita a comparação das médias obtidas. As médias são iguais quando há sobreposição das barras de erros para um mesmo ensaio. Sendo assim, por exemplo, na Figura 5.b, para a dose de 1,34 mg de cloroH/L e em pH 6,0, embora o valor médio da turbidez remanescente tenha sido menor para o tratamento em ciclo completo (CC) do que para a filtração direta descendente (FDD), a sobreposição das barras do erro-padrão indica que tais médias na verdade são estatisticamente iguais.

Assim, em geral, não há diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos em ciclo completo e em filtração direta descendente com o emprego da pré-oxidação com cloro nas formas de dicloroisocianurato de sódio e de hipoclorito de sódio.

Os dois produtos clorados utilizados mostraram eficiências semelhantes quando comparamos as Figuras 4 e 5. A ação oxidante do cloro tanto de origem inorgânica como de origem orgânica é controlada pelo ácido hipocloroso. Quanto mais ácida for a água (pH próximo de 6,0, por exemplo), o ácido hipocloroso terá uma maior fração em relação ao íon hipoclorito (Meyer, 1994). Por esta razão, os resultados em pH 6,0 são levemente melhores.

3.3. Ensaios de coagulação com cloreto de polialumínio (PAC 23)

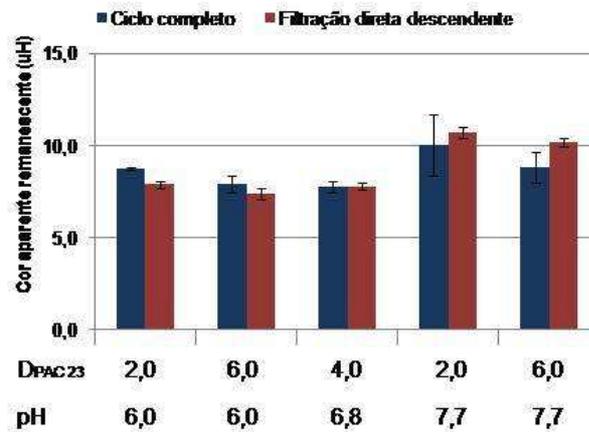
A coagulação da água com PAC 23 possibilitou a obtenção de água filtrada com cor aparente capaz de atender ao padrão de potabilidade (Portaria 2914/2011) (ver Figura 6). Quanto à remoção da turbidez, a configuração em ciclo completo

apresentou melhores resultados do que a de filtração direta descendente (Figura 6.b).

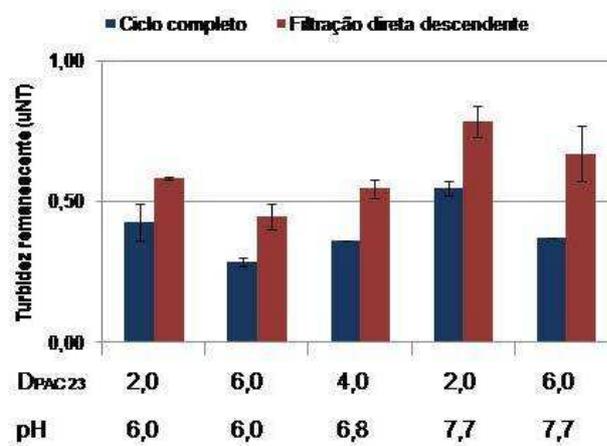
Observa-se, portanto, que, neste caso, a etapa sedimentação contribui para a remoção de partículas da água. Por exemplo, a dosagem de PAC 23 em pH natural (7,7) possibilitou a obtenção de água dentro dos padrões de cor aparente e turbidez com a dose de 6,0 mg/L de coagulante, mas apenas na configuração da ETA em ciclo completo. Ao observar as barras de erro-padrão para um mesmo ensaio (Figura 6.b), percebemos na remoção de turbidez que há diferenças significativas entre o tratamento em ciclo completo e em filtração direta descendente.

Na filtração direta descendente, é bem provável que os microflocos e partículas não coaguladas transpassaram o leito filtrante, impactando na qualidade da água tratada.

Verifica-se ainda que resultados de cor aparente (Figura 6.a) e de turbidez (Figura 6.b) que atendam a Portaria 2.914/11 podem ser obtidos para pH mais baixo numa dose de coagulante menor, mas o ajuste do pH, muitas vezes, pode ser algo indesejável.



(a)

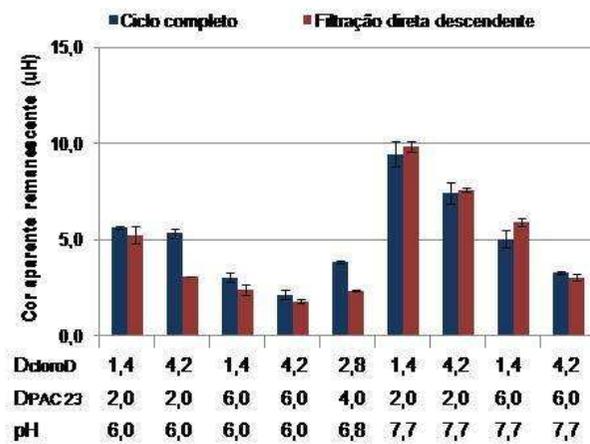


(b)

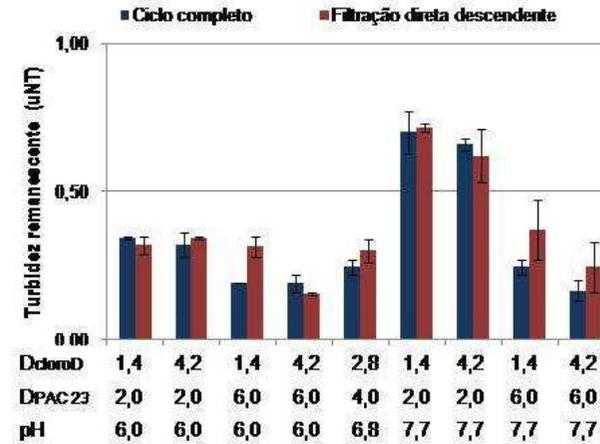
Figura 6 – Cor aparente (a) e turbidez (b) remanescentes (\pm erro-padrão) na água filtrada em ensaios de coagulação com PAC 23.

3.4. Ensaio de pré-oxidação com cloro associado à coagulação com PAC 23

A Figura 7 mostra os resultados obtidos com o cloroD como pré-oxidante e o coagulante PAC 23 e Figura 8 para o cloroH com o mesmo coagulante.

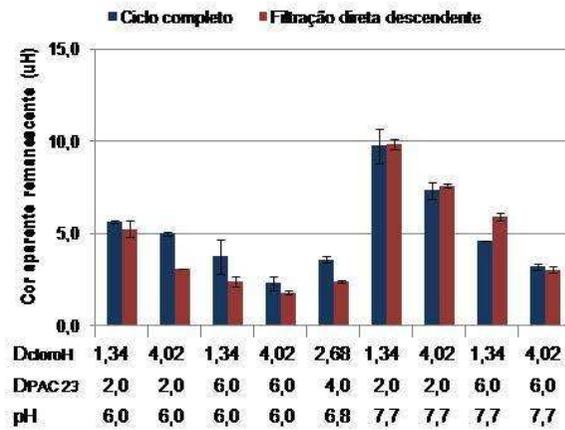


(a)

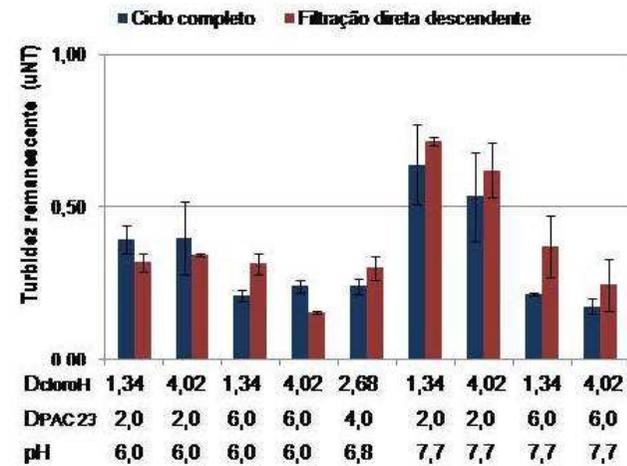


(b)

Figura 7 – Resultados da pré-oxidação com cloroD e coagulação: (a) cor aparente remanescente, (b) turbidez remanescente.



(a)



(b)

Figura 8 – Resultados da pré-oxidação com cloroH e coagulação: (a) cor aparente remanescente, (b) turbidez remanescente.

Nestes ensaios, todos os tratamentos atenderam à Portaria 2.914/11 para cor aparente (menor que 15 uH), independente da dose de cloro, do PAC 23, do pH de tratamento ou da própria configuração de ETA (ver Figuras 7.a e 8.a). Para a turbidez, contudo, somente os tratamentos com acidificação da água bruta atenderam à referida Portaria (turbidez menor que 0,50 UNT) para qualquer dose de PAC 23 e de cloro (observar as Figuras 7.b e 8.b). Em pH natural, a remoção de turbidez e cor aparente aumenta com o aumento da dose de cloro e de coagulante, sendo que o padrão de turbidez só é atingido com maior dose de PAC 23 (6 mg/L).

Nesses ensaios, não houve diferença estatisticamente significativa entre os resultados de cor aparente e turbidez para os tratamentos realizados em ciclo completo e em filtração direta descendente, uma vez que as barras de erros dos resultados sobrepõem-se para os dois tratamentos. Além disso, as duas formas de cloro empregadas (dicloroisocianurato e hipoclorito de sódio) apresentaram comportamentos semelhantes.

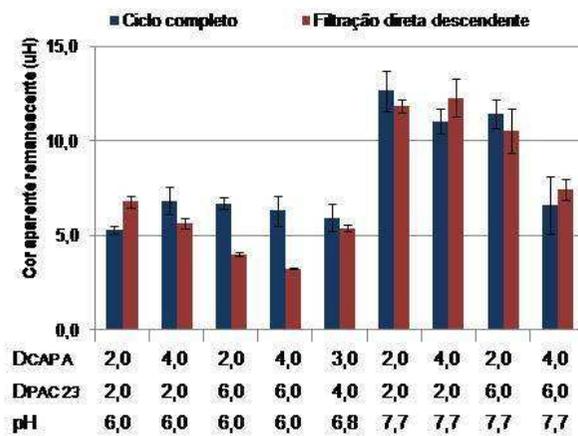
Mantendo a dose do PAC 23 baixa ou alta, observando as Figura 7.a e 8.a é possível notar ao aumentar a dose do cloro promove uma pequena diferença na cor aparente. Isto é notado tanto em pH ácido quanto em pH natural. A remoção da cor aparente é mais acentuada quando se aumenta a dose do PAC 23, independente de dose baixa ou alta de cloroD ou do pH de tratamento. Assim, percebemos que doses altas de cloro são desnecessárias, sendo mais necessário manipular a dose de PAC 23 em doses baixas de cloro para obter bons resultados e que atendam a questionada Portaria.

Esta mesma observação também é notada para remoção de turbidez. Considerando o tratamento num pH e mantendo a dose de PAC 23 fixa, o aumento da dose do cloroD mostra não ter uma influência significativa para o remoção da turbidez. O aumento da dose do PAC 23 desencadeia maiores remoção de turbidez.

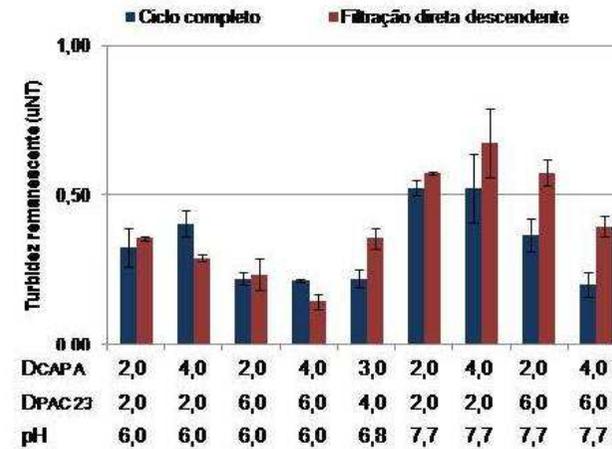
Não foram observadas diferenças muito significantes na comparação entre o tratamento em ciclo completo e a filtração direta descendente. As barras de erros das Figuras 7 e 8 sobrepõem-se, significando que as diferenças são mínimas.

3.5. Ensaio de adsorção com CAP associada à coagulação com PAC

São apresentados aqui os resultados obtidos com os ensaios realizados com dois tipos de carvão ativado em pó (CAP) como adsorvente associado ao coagulante PAC 23 (ver Figuras 9 e 10).

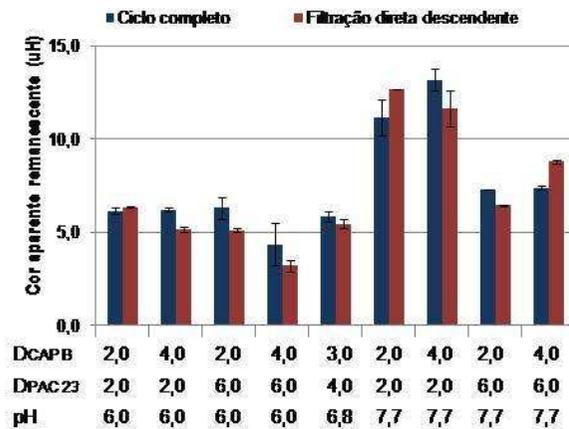


(a)

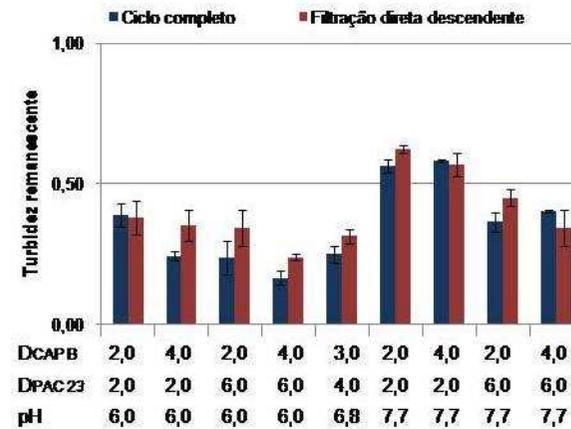


(b)

Figura 9 – Resultados da adsorção com CAP A e coagulação: (a) cor aparente remanescente, (b) turbidez remanescente.



(a)



(b)

Figura 10 – Resultados da adsorção com CAP B e coagulação: (a) cor aparente remanescente, (b) turbidez remanescente.

Os resultados dos tratamentos com adsorção associada à coagulação mostram que qualquer condição testada de dose de CAP, de PAC 23 e pH atendeu o recomendado pela Portaria 2.914/11 do Ministério da Saúde (observar figuras 9.a e 10.a) para cor aparente (menor que 15 uH), para os dois tipos de carvão.

Da mesma forma como aconteceu com o tratamento de pré-oxidação seguida da coagulação, em pH natural foi preciso uma dose maior de PAC 23, independente da dose do CAP, para atender o recomendado para turbidez pela mesma Portaria (turbidez menor que 0,5 uNT). Para pH mais baixo, contudo, o padrão de potabilidade é atingido para turbidez mesmo com as doses menores de PAC e CAP. Isto ocorre por que o pH influencia principalmente na coagulação, como já demonstrado, de modo que a eficiência de remoção de partículas (turbidez) e MON (cor aparente) aumenta com a redução do pH..

Percebemos a ação que os CAP promoveram ao tratamento quando comparamos com os resultados do tratamento somente coagulação. Comparando as Figuras 9 e 10, é possível perceber que os tratamentos com os CAP associada à coagulação possuem eficiências de remoção de cor aparente e de turbidez semelhantes, isto se deve pelo fato dos CAP possuírem características também semelhantes (Área superficial e tamanho de poros).

No geral é possível perceber nas Figuras 9 e 10 que não houve uma diferença considerável entre o tratamento em ciclo completo e em filtração direta descendente. Nota-se que as barras de erros tendem a proximidade uma da outra, significando que as médias são semelhantes.

Quando comparamos os tratamentos de adsorção associado à coagulação com os tratamentos de pré-oxidação associado à coagulação, percebemos que este segundo resulta em melhores resultados de cor aparente e de turbidez. Para percebemos, podemos comparar os resultados em pH natural com 6,0 mg de PAC/L e o nível máximo do outro agente. Perceberemos que com o uso de cloro, conseguimos resultados de cor aparente abaixo de 5,0 uH e turbidez menores que 0,25 uNT.

4. Conclusões

A água tratada por simples pré-cloração (isto é, sem coagulação) não atende ao padrão de potabilidade (Portaria 2.914/11). Ambos os produtos clorados (dicloroisucianurato de sódio e hipoclorito de sódio) apresentam eficiências semelhantes, com considerável remoção de cor aparente, sendo que a remoção de turbidez é insuficiente para atender a referida Portaria. Para potabilizar a água da lagoa de Extremoz se faz necessário o emprego do coagulante (PAC 23).

O tratamento da água da Lagoa de Extremoz que proporciona a melhor qualidade da água filtrada (cor aparente e turbidez), dentre as alternativas testadas é a associação da coagulação com PAC com pré-oxidação com cloro, que possibilitou a obtenção de uma água filtrada com melhor qualidade em ensaios de jarreste. Por exemplo, obteve-se de cor aparente de ~5 uH e ~0,30 uNT para doses de 1,40 mg/L de dicloroisucianurato de sódio e 2,0 mg/L de PAC 23 em pH de 6,0.

Os tratamentos em ciclo completo e por filtração direta descendente possuem eficiências estatisticamente semelhantes para remoção de cor aparente e de turbidez na maioria das alternativas de tratamento testadas. Contudo, quando o coagulante (PAC 23) é o único produto químico adicionado, a configuração em ciclo completo apresenta eficiência de remoção de turbidez superior à da configuração por filtração direta, principalmente para coagulação da água em pH natural.

Assim, tendo em vista que esta é uma estratégia de tratamento que pode ser eventualmente empregada na ETA Extremoz e que qualquer modificação implica em custos adicionais, conclui-se que não há necessidade de modificação da ETA para ajustá-la à configuração de filtração direta, devendo a mesma permanecer com a configuração em ciclo completo, apesar de eventualmente o decantador ter papel insignificante na remoção de impurezas, depende da estratégia (produtos químicos e doses empregadas) de tratamento empregado.

Referências bibliográficas

APHA, AWWA, WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19 ed. American Public Health Association: Washington, USA, 1992.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S. BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 414 p.

DI BERNARDO, L. (Coord.); et al. **Filtração direta aplicada a pequenas comunidades**. Rio de Janeiro. ABES. RiMa. 2003. 491 p

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

DUAN, J.; GREGORY, J. **Coagulation by hydrolysing metal salts**. Advances in Colloid and Interface Science. 100_102. 475-502. 2003.

DUARTE, M. A. C.; CEBALLOS, B.S.O.; FREITAS, E. B. P.; MELO, H. N. S.; KONIG, A. **Utilização dos índices do estado trófico (IET) e de qualidade de água (IQA) na caracterização limnológica e sanitária das lagoas do Bonfim, Extremoz e Jiqui (RN) – análise pré-eliminar**. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Foz de Iguaçu/RS. 1997.

DUARTE, M. A. C. **Tratamento de água para o consumo humano de reservatório eutrofizado através da pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração**. 318 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos. 2011.

FERREIRA FILHO, S. S.; MARCHETTO, M.. **Otimização multi-objetivo de Estações de Tratamento de Águas de Abastecimento: remoção turbidez,**

carbono orgânico total e gosto e odor. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 11, n. 1, p.7-15, 2006.

JERÔNIMO, C. E. M.; SOUZA, F. R. S. **Determinação Do Índice de Qualidade da Água da Lagoa de Extremoz/RN: Série temporal e correlação a índices pluviométricos.** Ver. Elet. Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. V.10. n.10. 2013. 2219-2232.

LIBANIO, M. **Fundamentos da qualidade e tratamento de água.** Campinas, SP. 3ª Ed. Editora Átomo, 2010.

LIBECKI, B.; DZIEJOWSKI, J. **Optimization of humic acids coagulation with aluminum and iron salts.** Polish J. of Enviromental Studies. vol. 17. nº 3. p. 397-403. 2007.

MACEDO, J. A. B. **O uso de derivados clorados orgânicos no processo de desinfecção de água para o abastecimento público.** In: Congresso Brasileiro de Química – Associação Brasileira de Química. Fortaleza/CE. 2004.

MARCHETTO, M.; FERREIRA FILHO, S. S. **Interferência do processo de coagulação na remoção de compostos orgânicos causadores de gostos e odor em águas de abastecimento mediante a aplicação de carvão ativado em pó.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 10, n. 3. p.243-252. 2005.

MATILAINEN, A.; VEPSALAINEN, M; SILLANPAA, M. **Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review.** Advances in Colloid and Interface Science. 159. 189-197. 2010.

MEYER, S. T. **O uso do cloro na desinfecção de água, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública.** Card. Saúde Pública, Rio de Janeiro. 10(1). 99-110. Jan-mai, 1994.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria n.º 2.914, de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde.** Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acessado em: 15 de março de 2015.

MORAES FILHO, F. C. **ETA Extremoz – CAERN.** Material de apresentação da ETA Extremoz destinado às visitas. 2015.

PÁDUA, V. L.; SALES, M. V.; FREIRE, R. E. **Influência do pré-tratamento químico no desempenho de unidades de flotofiltração e de filtração direta descendente.** In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia sanitária e ambiental – ABES. João Pessoa/PB. 2001.

PAVANELLI, G. **Eficiência de Diferentes Tipos de Coagulantes na Coagulação, Floculação e Sedimentação de Água com Cor e Turbidez Elevada.** Dissertação (Mestrado EESC-USP), São Carlos. São Paulo. 2001.

SARON, A.; SILVA, E. P. **Redução na dosagem de sulfato de alumínio na ETA Guaraú com a utilização do sistema de recuperação de água de lavagem de filtros.** In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Foz de Iguaçu/RS. 1997.

SILVA, G. G.; NAVAL, L. P.; DI BERNADO, L.; DANTAS, A. D. **Tratamento de água de reservatórios por dupla filtração, oxidação e adsorção em carvão ativado granular.** Revista Engenharia Sanitaria e Ambiental. V.17, v.1. p71-80. 2012.

ZHONGLIAN, Y.; BAOYU, G.; QINYAN, Y. **Coagulation performance and residual aluminum specification of $Al_2(SO_4)_3$ and Polyaluminum chloride (PAC) in Yellow river water treatment.** Chemical Engineering Journal. V. 165. Issue 1. Novembro. 2010. P.122-132.