



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

**EFEITOS DA RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE
FILTROS EM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DIRETA EM ESCALA DE
BANCADA**

DAIANNE GOMES DE FREITAS

Natal
2017

DAIANNE GOMES DE FREITAS

**EFEITOS DA RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE
FILTROS EM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DIRETA EM ESCALA DE
BANCADA**

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

Orientador: Prof. Dr. André Luís Calado Araújo

Coorientador: Hélio Rodrigues dos Santos

Natal
2017

DAIANNE GOMES DE FREITAS

**EFEITOS DA RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA DE
LAVAGEM DE FILTROS EM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO
DIRETA EM ESCALA DE BANCADA**

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Luís Calado Araújo (IFRN) – Orientador

Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos (UFRN) – Coorientador

Prof. Dr. Rênio Félix de Sena (UFRN) – Examinador Interno

Prof. Dr. Marco Antônio Calazans Duarte (IFRN) – Examinador Externo

Natal, 24 de março de 2017

AGRADECIMENTOS

À Deus, por todas as bênçãos em minha vida.

Aos meus pais, Batista e Fátima, e a minha irmã, Danielle, pela compreensão, apoio e incentivo durante toda minha vida.

Ao meu orientador, André Luís Calado Araújo, por toda paciência, dedicação, ensinamentos e apoio durante toda a realização desse trabalho.

Ao meu coorientador Hélio Rodrigues dos Santos, por todas as dicas e ensinamentos passados.

Ao professor Marco Antônio Calazans Duarte, por todo auxílio e opiniões valiosas.

Aos bolsistas, Thiago, Pryscila, Felipe e Ana Paula que tanto me ajudaram nas coletas e análises realizadas.

Aos meus amigos do mestrado, em especial a Gerardo Eloi e André Câmara, pelo companheirismo e ajuda.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte e a todos os professores do mestrado em Engenharia Sanitária, pela oportunidade e por todo conhecimento adquirido.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Norte, pelo espaço concedido para realização da minha pesquisa.

À Companhia de Águas e Esgotos do Estado do Rio Grande do Norte, pela disponibilidade e oportunidade de realizar a pesquisa em uma de suas estações de tratamento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1	Delineamento experimental	15
2.2	Local de estudo	16
2.3	Procedimentos de coleta e análises das amostras	20
2.4	Ensaio de tratabilidade	21
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1	Caracterização da água bruta e das ALFs	23
3.2	Fase 1 – Filtração direta.....	25
3.3	Fase 2 – Filtração direta com pré-oxidação	29
3.4	Fase 3 – Filtração direta em linha com pré-oxidação	33
3.5	Fase 4 – Filtração direta em linha com pré-oxidação, utilizando a ALF _{LSED}	38
3.6	Fase 5 – Filtração direta em linha com pré-oxidação, utilizando a ALF _{DEC}	42
4	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
	APÊNDICE A - Resultados dos ensaios em jarreste com recirculação de resíduos	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidades de tratamento da ETA e pontos de coleta das amostras	18
Figura 3 - Fluxograma das unidades da ETA de Extremoz	19
Figura 4- Equipamento de jarteste fabricado pela Marconi utilizado nos ensaios	21
Figura 5 - Curva granulométrica do material filtrante utilizado nos experimentos	22
Figura 6 - Volume de sólidos sedimentáveis e concentração de SST na ALF durante o período de lavagem de filtros na ETA Extremoz	24
Figura 7 – Concentração média de turbidez e cor ALF durante o período de lavagem de filtros na ETA Extremoz.....	25
Figura 8 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), percentual de recirculação e tipo de água de lavagem	26
Figura 9 - Variação dos valores médios de cor em função da dose de coagulante (mg/L), percentual de recirculação e tipo de água de lavagem	26
Figura 10 – Comparação entre as médias de cor e turbidez de todos os experimentos realizados em função das diferentes variáveis testadas: resíduo, razão de recirculação e dose de coagulante	28
Figura 11 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 1	29
Figura 12 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), percentual de recirculação e tipo de água de lavagem	31
Figura 13 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), percentual de recirculação e tipo de água de lavagem	31
Figura 14 – Comparação entre médias de turbidez em função dos fatores analisados: resíduos, dose de coagulante e razões de recirculação	32
Figura 15 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 2	33
Figura 16 - Concentrações de cor e turbidez em função das diferentes variáveis testadas: resíduo, razão de recirculação e dose de coagulante.....	34
Figura 17 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 3	35
Figura 18 - Comparação entre as médias de pH, SST, cor e turbidez em função tipos de resíduos analisados	37

Figura 19 - Médias de cor e turbidez das fases 1, 2 e 3 em função tipos de resíduos analisados	38
Figura 20 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), tempo de oxidação (minutos) e dose de oxidante (mg/L)	39
Figura 21 - Variação dos valores médios de cor em função da dose de coagulante (mg/L), tempo de oxidação (minutos) e dose de oxidante (mg/L)	39
Figura 22 - Comparação entre as médias de cor e turbidez em função da dose de oxidante e do tempo de oxidação.....	40
Figura 23 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta e parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 4	41
Figura 24 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), tempo de oxidação (minutos) e dose de oxidante (mg/L)	42
Figura 25 - Variação dos valores médios de cor em função da dose de coagulante (mg/L), tempo de oxidação (minutos) e dose de oxidante (mg/L)	43
Figura 26 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 5	44
Figura 27 - Comparação das médias de turbidez em função das diferentes variáveis testadas: tempo de oxidação e dose de coagulante	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das condições operacionais adotadas em cada fase dos ensaios em jarteste.....	15
Tabela 2 - Fatores e níveis testados em cada uma das fases de ensaio	16
Tabela 3- Descrição dos parâmetros físico-químicos avaliados e metodologias adotadas	20
Tabela 4 - Resumo dos parâmetros operacionais adotados nos ensaios em jarteste	23
Tabela 5 - Características físico-químicas da água bruta da lagoa de Extremoz e dos resíduos (ALFs) utilizados nos experimentos, no período de junho a setembro/2016	23
Tabela 6- Ensaios de controle (sem recirculação) realizados com a AB.....	24
Tabela 7 - Ensaios auxiliares com água bruta ¹ , sem recirculação, em jarteste para definir nova dose e tempo de oxidação	30
Tabela 8 - Ensaios auxiliares com água bruta ¹ , sem recirculação, em jarteste para definir novas doses de coagulantes	30
Tabela 9 - Características físico-químicas da ALF _{LSED} e ALF _{DEC} utilizadas em cada fase de ensaios	45
Tabela 10 - Resultados dos ensaios em jarteste na fase 1	50
Tabela 11 - Resultados dos ensaios em jarteste na fase 2	52
Tabela 12 - Resultados dos ensaios em jarteste na fase 3	54
Tabela 13 - Resultados dos ensaios em jarteste na fase 4	56
Tabela 14 - Resultados dos ensaios em jarteste na fase 5	57

RESUMO

Os resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água (ETA) são formados principalmente pelo lodo de decantadores e pela água de lavagem dos filtros - ALF. A ALF representa a maior parcela de perda de água, podendo compreender a até 10% da vazão da estação. Uma alternativa para a destinação desses resíduos é a recirculação na própria estação. Dessa forma, além de representar uma redução nas perdas da estação, também diminui o consumo de energia e de água. A presença de partículas desestabilizadas em sua constituição e o residual de coagulante presentes na ALF podem auxiliar a remoção de partículas da água bruta. Para que o reaproveitamento dos resíduos não prejudique a qualidade da água tratada, é essencial a avaliação dos impactos causados por esse procedimento. O trabalho foi desenvolvido na ETA de Extremoz – RN, que apresenta configuração de estação convencional, apesar de operar como filtração direta. O presente estudo investigou as seguintes configurações para recirculação do efluente da lagoa de sedimentação, ALF bruta (isto é, sem clarificação) e após clarificação. Foram avaliadas diferentes taxas de recirculação (0, 2, 5 e 8%) através de ensaios de tratabilidade no jarteste. Foram simulados tratamentos com as configurações de filtração direta e filtração direta em linha, com e sem a etapa de oxidação, utilizando diferentes doses de coagulante e oxidante. A água bruta utilizada caracteriza-se por apresentar turbidez e cor em torno de 2 unT e 20 uH, respectivamente. A etapa de floculação não foi necessária, enquanto que a etapa de oxidação foi essencial para se atender ao valor limite estabelecido pela legislação. A recirculação da ALF não influenciou na qualidade da água tratada, não apresentando diferença significativa entre os tipos de resíduos nem entre as taxas de recirculação adotadas.

Palavras-chave: estação de tratamento de água, água de lavagem dos filtros, recirculação de resíduos, ensaios de tratabilidade.

ABSTRACT

The residues generated in the Water Treatment Plants (WTP) are mainly formed by the sedimentation and the filter backwash water (FBWW). The FBWW represents the largest portion of water loss, and may comprise up to 10% of the station's flow. An alternative to the destination of this waste is the recirculation in the station itself. In this way, besides representing a reduction in the losses of the station, it also reduces the consumption of energy and water resources. The presence of destabilized particles in their constitution and the residual coagulant present in the FBWW can aid the removal of particles from the raw water. In order to ensure that the reuse of waste does not adversely affect the quality of the treated water, it is essential to assess the impacts caused by this procedure. The work was developed in WTP of Extremoz - RN, which presents conventional configuration but operates as direct filtration. The present study compared the recirculation of sedimentation pond effluent with crude FBWW, that is, without any type of treatment, and after being clarified in the laboratory - simulating a filler. The performance of recirculation at different recirculation rates (0, 2, 5 and 8%) was investigated through treatability tests in the reservoir. The raw water used is characterized by turbidity and color around 2 unT and 20 uH, respectively. The flocculation step was not necessary, whereas the oxidation step was essential to meet the limit value established by the legislation. The recirculation of the different residues in the different recirculation ratios did not influence the quality of treated water.

Key-words: water treatment plants, filter backwash water, residual recirculation, treatability test.

1 INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de água – ETAs - visam garantir que a qualidade da água tratada seja compatível com a finalidade a qual se destina. Durante o tratamento são geradas consideráveis quantidades de resíduos com elevado potencial poluidor, advindos das impurezas presentes da água bruta e das unidades de tratamento adotados. Todas as unidade do processo de tratamento, como coagulação, sedimentação, filtração, entre outras, produzem resíduos compostos principalmente por argilas, siltes, areia fina, material húmico, microorganismos e resíduos produtos químicos utilizados durante o processo.

A maior parte dos resíduos gerados são oriundos das águas de lavagem dos filtros – ALF - e do lodo dos decantadores. Geralmente, a quantidade de resíduos gerados pode compreender entre 2 a 10% do volume total tratado (USEPA, 2002; Raj *et al.*, 2008), contendo apenas 0,01 a 0,1% de sólidos (Di Bernardo *et al.*, 2012).

Diante da escassez de mananciais de boa qualidade, devido à crescente demanda por água, um adequado gerenciamento, englobando minimização, aproveitamento, tratamento e disposição desse resíduo torna-se imprescindível.

Os custos relativamente elevados de implantação, operação e manutenção das instalações de tratamento de resíduos (ETR) implicam na disposição inadequada dos resíduos. No Brasil, cerca de 73% dos resíduos de ETA são lançados nos cursos de água sem tratamento (IBGE, 2002), prática, essa, ilegal, uma vez que os lodos de ETAs são classificados como resíduos sólidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) e seu lançamento *in natura* no meio ambiente é vedado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

Os resíduos apresentam elevado potencial poluidor e o seu lançamento direta ou indiretamente nos corpos de água pode acarretar alterações de cor e turbidez, inibição da atividade biológica, aumento da concentração de sólidos no fundo do corpo receptor e riscos à saúde humana em razão da presença de agentes patogênicos e metais pesados (Scalize e Di Bernardo, 1999; Di Bernardo *et al.* 2012)

Mesmo com o avanço do conhecimento sobre as técnicas para tratamento dos resíduos, uma destinação final viável e ambientalmente sustentável ainda é um grande desafio a vencer (Di Bernardo *et al.*, 2012).

Uma opção de destinação da ALF e lodos de ETA é a recirculação na própria ETA. Tal medida contribui para a diminuição do seu lançamento no meio ambiente, favorece a economia de água, proporciona a redução do consumo de produtos químicos, melhora sedimentabilidade dos flocos, e conseqüentemente, a reduz os custos de tratamento de água. A recirculação pode ser contínua ou não, com ou sem processo de clarificação.

Bourgeois *et al.* (2004) submeteram apenas resíduos de uma ETA convencional a ensaios de jarteste. Ao comparar com ensaios realizados com a água bruta, os estudos mostraram que o efluente gerado após o tratamento do resíduo apresentou tratabilidade superior à da água bruta. A melhor tratabilidade dos resíduos ocorre em razão da existência de partículas desestabilizadas em sua constituição que permite melhorar as etapas de coagulação, floculação, sedimentação (Gottfried *et al.*, 2008; Suman *et al.*, 2012 e Raj *et al.*, 2008) e pode, até mesmo, auxiliar na remoção de microorganismos (Arora *et al.*, 2001; Cornwell & MacPhee, 2001) no processo de tratamento de água.

Estudos realizados por Suman *et al.* (2012) avaliaram, em laboratório, a remoção de matéria orgânica (COT e COD) em uma água com turbidez variando de 20 a 40 unT utilizando diferentes vazões de recirculação (5%, 7% e 10%) de ALF coletada de uma ETA de ciclo completo. Mesmo a ALF possuindo elevada turbidez – em torno de 300 unT -, quando misturada com a água bruta, essa necessitou de menos coagulante para o tratamento, com redução de 20mg/L para 16 mg/L de sulfato de alumínio. Os resultados mostraram que o aumento de turbidez gerado a partir da introdução do resíduo antes do processo de coagulação aumentou o tamanho dos flocos. Os melhores resultados foram para a mistura de 7% de ALF.

Campos (2014) avaliou, em ensaios em jarteste seguidos de filtração, simulando ETA em ciclo completo, a recirculação de ALF nas razões de 0, 2, 4, 6, 8 e 10%. A turbidez apresentou pouca variação, obedecendo o limite permitido pela Portaria nº 2914/2011 de 0,5 unT, ultrapassando esse valor apenas nos ensaios em que não houve ajuste de pH. A variação da turbidez da água bruta de 11,43 a 162 unT e as diferentes taxas de recirculação não influenciaram nos resultados.

Para Campos (2014) o tratamento da água não foi influenciado pela taxa de recirculação, entretanto Suman *et al.* (2012) obtiveram resultados menos satisfatórios ao recircular mais que 7%. Apesar dos estudos avaliarem parâmetros distintos -

Campos (2014) analisou turbidez, cor, cloro livre, enquanto Suman *et al.* (2012) focaram na remoção de matéria orgânica -, nota-se a importância de avaliar a razão de recirculação visto que pode impactar de maneiras distintas no processo ou na eficiência da ETA.

Os diferentes resultados observados nos estudos de Suman (2012) e Campos (2014) ocorrem em razão das diferentes características dos resíduos que podem variar extensivamente, dificultando a extrapolação de dados de uma situação para outra. Os resíduos são influenciados por diversos fatores, como: i) a qualidade da água bruta e tecnologia do tratamento; ii) tipo de produtos químicos utilizados; iii) técnica de lavagem de filtros e limpeza de decantadores (Di Bernardo & Paz, 2008).

Cornwell & Lee (1994) sugerem que a vazão de recirculação se mantenha abaixo de 10% da vazão da ETA, a fim de assegurar a qualidade microbiológica da água. A USEPA (2002) orienta que o percentual de recirculação deve ser determinado de acordo com cada ETA, definidos a partir de estudos em escalas menores.

O encaminhamento dos resíduos para o início do tratamento também pode recircular ferro, manganês, COT, trihalometanos (Cornwell & Lee, 1994; Bourgeois, *et al.*, 2004) e diferentes organismos de importância para o tratamento de água para consumo. Entre os quais, protozoários, *Escherichia coli*, coliformes totais e termotolerantes (Braga *et al.*, 2006).

De acordo com a USEPA (2002), os principais microrganismos que devem ser analisados são *Giardia* e *Cryptosporidium*. Organismos como (oo)cistos de protozoários podem estar em concentrações mais elevadas nas ALFs do que na água bruta (Braga, *et al.*, 2006; Freitas, *et al.*, 2010), mesmo após tratamento (Cornwell & Lee, 1994). A recirculação pode, então, resultar em uma quantidade adicional desses patógenos no processo de tratamento de água, podendo implicar em risco à saúde da população consumidora (USEPA, 2002).

O grande risco associado a esses microrganismos reside no fato de possuírem baixa dose infecciosa e elevada resistência a condições ambientais adversas (Smith & Grimason, 2003). Além disso, são dificilmente removidos durante o tratamento da água por serem pouco susceptíveis ao processo de desinfecção mais comumente utilizado, a cloração (USEPA, 2002).

De acordo com USEPA (2000), uma forma de minimizar os riscos relacionados aos protozoários é através do tratamento dos resíduos antes da recirculação. Freitas

et al. (2010) alertam quanto à necessidade de tratamento desses resíduos, posto que se apresentaram como um veículo de contaminação microbiológica ao se recircular ALF sem clarificação.

As tecnologias utilizadas para tratamento dos resíduos consistem na separação das fases líquida e sólida, aumentando a concentração dos sólidos por meio de clarificação/adensamento e desidratação. O sistema de tratamento dos resíduos depende das características quantitativas e qualitativas gerados pelas diferentes configurações de ETA e do destino que será dado ao efluente após o processo (Di Bernardo *et al.*, 2012). Os tipos de unidades de tratamento mais comuns para o tratamento são adensador e lagoa de sedimentação (USEPA, 2002). A lagoa de sedimentação permite a clarificação, adensamento e desaguamento do lodo da ETA (Di Bernardo *et al.*, 2012). Todavia, o maior tempo de detenção necessário pela lagoa pode alterar as características do lodo e facilitar a liberação de contaminantes para o sobrenadante (Cornwell & Lee, 1994) e, juntamente com a grande área necessária para a implantação, beneficia a proliferação de algas (Di Bernardo *et al.*, 2012).

A necessidade ou não de tratamento dos resíduos antes de recircular depende da capacidade da ETA em remover adequadamente a maior carga de partículas provocada pela introdução da ALF no início da ETA. Se os decantadores e os filtros atendem a essa sobrecarga de partículas, não é preciso clarificar os resíduos antes de recircular (Cornwell & MacPhee, 2001).

Cornwell & MacPhee (2001) avaliaram os efeitos causados nos processos de sedimentação e filtração com o aumento de partículas e (oo)cistos provocados pela recirculação de ALF. O estudo foi feito em instalação piloto convencional com água bruta de baixa turbidez (inferior a 5 unT). Os estudos sugerem que a recirculação de resíduos em água de baixa turbidez insere turbidez adicional à água bruta, a qual pode auxiliar no processo de tratamento, elevando a remoção de (oo)cistos de protozoários e de turbidez. As diferentes razões de recirculação testadas (2,3%, 10% e 20%) não influenciaram na concentração de *Cryptosporidium* da água filtrada. Nesse estudo, a clarificação dos resíduos antes da recirculação não foi necessária e mostrou-se essencial para obter um efluente final de melhor qualidade.

Os efeitos causados pela recirculação dos resíduos dependem, também, da configuração da ETA. Em águas de baixa turbidez, o processo de remoção das partículas é menos eficiente em relação a águas com turbidez mais elevadas (Xiao *et*

al. 2009; Souza, 2011). Isso ocorre devido a menor quantidade de espécies hidrolisadas formadas durante o processo de coagulação e a menor velocidade de sedimentação dos flocos (Xiao *et al.* 2009; Di Bernardo, Dantas & Voltan, 2011).

Em estações de filtração direta, a principal limitação da recirculação consiste na maior possibilidade de contaminação microbiológica do afluente, já que possuem uma unidade a menos de tratamento: a sedimentação (Libânio & Carneiro, 2001; Aboytes *et al.* 2004).

Cornwell & Lee (1994) analisaram a recirculação de ALF em ETA de filtração direta. Os estudos mostraram que apesar aumento de 2 até 5 vezes da quantidade de partículas com a recirculação, o efluente perdeu sua qualidade. Na verdade, a recirculação melhorou a eficiência na remoção de protozoários, apresentando concentrações ligeiramente inferiores na água filtrada.

Vários estudos (Cornwell & MacPhee 2001; Bourgeois *et al.* 2004, Bourgeois *et al.* 2004a; Braga *et al.* 2006; Raj *et al.* 2008; Gottfried *et al.*, 2008; Freitas *et al.* 2010; Suman *et al.*, 2012) destacam alguns fatores associados à reciclagem de águas de lavagem de filtro. Dentre esses fatores, destacam-se: a) Efeito na qualidade final da água tratada (Cornwell & Lee, 1994; Braga *et al.*, 2006; Freitas *et al.*, 2010; Zhou, *et al.* 2012); b) necessidade ou não de pré-tratamento dos resíduos (Cornwell & Lee, 1994; USEPA 2002; Freitas *et al.*, 2010; Zhou, *et al.* 2012); c) taxa de recirculação adequada (Gottfried *et al.*, 2008; Freitas *et al.*, 2010; Souza, 2011; Suman *et al.*, 2012; Zhou, *et al.* 2012).

Uma vez que o desempenho do tratamento com a recirculação depende da qualidade da água bruta, dos contaminantes existentes nas ALFs e das unidades de tratamento das ETAs (Tobiason *et al.*, 2003; Raj, *et al.*, 2008), devem fazer testes de tratabilidade para avaliar fatores como razão de recirculação, necessidade de pré-tratamento dos resíduos, com a intenção de se obter maior eficiência no tratamento ou que opere de modo que não deteriore a qualidade final da água, poupando recursos naturais, perdas de água e custo com coagulantes (Zhou, *et al.*, 2012).

O objetivo dessa pesquisa é avaliar o desempenho de distintas condições de recirculação de resíduos em água de baixa turbidez em uma ETA de filtração direta.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental

Para realização dessa pesquisa, foram realizados ensaios em jarteste para simular a ETA de Extremoz em escala de laboratório, operando segundo as concepções de tratamento de filtração direta e filtração direta em linha. Os experimentos testaram diferentes parâmetros a fim de encontrar a melhor condição operacional em relação ao percentual de recirculação de resíduos na entrada da ETA, resíduos utilizados (diferentes águas de lavagem de filtros) e dose de coagulante. Para definir a faixa de dose de coagulante a ser testada e a dose de pré-oxidante, foram realizados ensaios preliminares. Também foram realizados ensaios de controle, com a água bruta do manancial, sem recirculação de ALF.

Os produtos químicos e os gradientes de velocidade utilizados foram de acordo com as condições operacionais da ETA de Extremoz.

Os experimentos foram realizados em cinco fases, se diferenciando em relação a concentração dos produtos químicos utilizados e a execução ou não das etapas de oxidação e floculação. As etapas foram realizadas em sequência de modo que as condições operacionais da fase seguinte foram definidas de acordo com os resultados obtidos na fase anterior. A Tabela 1 resume as condições operacionais adotadas nos ensaios em cada uma das fases.

Tabela 1 - Resumo das condições operacionais adotadas em cada fase dos ensaios em jarteste

Fase	Oxidação		Coagulação	Floculação		Tipo de resíduo	TR (%).		
	Tc (min)	Dose (mg/L)	Dose (mg/L)	Tf (min)	G (s ⁻¹)				
1	-		1, 2 e 3	5	90	ALF _B ALF _{DEC} ALF _{LS} ED	0 ⁽¹⁾ 2 5 8		
				5	60				
				5	30				
2	10	2	4, 6 e 8	5	90			ALF _B ALF _{DEC} ALF _{LS} ED	0 ⁽¹⁾ 2 5 8
				5	60				
				5	30				
3	-		ALF _{LS} ED ALF _{DEC}	0 ⁽¹⁾ 5					
4	5 e 10	1 e 2			6 e 8	-			
5									

LEGENDA: Tc – Tempo de contato; Tf – Tempo de floculação; G – gradiente de velocidade; TR – Taxa de recirculação; ALF_B - amostra da ALF sem pré-tratamento; ALF_{DEC} - ALF após decantação em laboratório; ALF_{LS}ED - ALF após decantação na lagoa de sedimentação.

⁽¹⁾ Ensaios utilizando a água bruta da lagoa de Extremoz, sem recirculação de ALF.

Os ensaios seguiram um planejamento experimental para cada fase, a fim de avaliar as melhores condições operacionais que poderiam ser executadas em escala real. O planejamento adotado foi fatorial completo tipo n^k , em que “k” é o número de níveis e “n” é o número de fatores. Todos os ensaios foram realizados em duplicata, totalizando 226 ensaios. Além desses, também foram realizados 15 ensaios de controle, com a água bruta da lagoa de Extremoz, sem recirculação de ALF, seguindo as condições operacionais das fases 1, 2 e 3, totalizando, assim, 241 ensaios. Os testes estatísticos utilizados foram a análise de variância (anova) e o gráfico de Pareto de efeitos padronizados. Foi realizado um planejamento para cada fase da pesquisa, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores e níveis testados em cada uma das fases de ensaio

Fase	Fatores	Níveis	Nº de ensaios	
			Por fase	Total
1, 2 e 3	Tipo de resíduo	ALF _B , ALF _{DEC} , ALF _{LS} ED	k ^N = 3 ³ x 2 réplicas = 54 x 3 fases = 162 ensaios	226
	TR (%)	2, 5 e 8		
	Dose de coagulante (mg/L)	1, 2 e 3 (fase 1); ou 4, 6 e 8 (fase 2 e 3)		
4 e 5	TR (%)	0 e 5	2 ⁴ x 2 réplicas = 32 x 2 fases = 64 ensaios	
	Tempo de oxidação (min)	5 e 10		
	Dose do oxidante (mg/L)	1 e 2		
	Dose do coagulante (mg/L)	6 e 8		

LEGENDA: TR – Taxa de recirculação; ALF_B - amostra da ALF sem pré-tratamento; ALF_{DEC} - ALF após decantação em laboratório; ALF_{LS}ED - ALF após decantação na lagoa de sedimentação.

2.2 Local de estudo

As amostras de águas foram coletadas na lagoa de Extremoz e ETA Extremoz, no município de Extremoz, localizada na Região Metropolitana de Natal. A ETA foi inaugurada em 1992 com uma vazão de projeto de 500L/s, mas atualmente a estação funciona com uma vazão média de 650L/s.

A Lagoa de Extremoz apresenta capacidade volumétrica em torno de 11.019.525 m³ e sua água caracteriza-se pela baixa turbidez e cor média, os valores

médios obtidos durante o período de junho a setembro de 2016 foram de 1,85 unT e 21 uH, respectivamente.

A ETA foi projetada segundo a concepção em ciclo completo, contendo as unidades de mistura rápida hidráulica em calha *Parshall*, floculação mecanizada, decantação de alta taxa e filtração rápida descendente, além da possibilidade de aplicação de produtos químicos na pré-oxidação e desinfecção. Apesar de apresentar concepção convencional, em virtude da baixa turbidez, a coagulação é feita no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas e, conseqüentemente, não há formação de flocos. Por isso, os equipamentos de agitação dos floculadores foram removidos e, portanto, quase não há remoção de impurezas nos decantadores. Os decantadores foram cobertos para impedir a proliferação de algas, onde mesmo quase não retendo partículas, a água passa antes de se encaminhar aos filtros. A ETA opera, então, como filtração direta, contemplando apenas as etapas de pré-oxidação, coagulação, filtração e desinfecção. A Figura 2 e a Figura 3 mostram a atual configuração da ETA.

A ETA dispõe de quatro filtros rápidos descendentes com meio filtrante único de areia quartzosa. A lavagem contracorrente dos filtros é realizada apenas com água e dura em torno de 5 minutos. A lavagem de cada filtração é feita uma vez ao dia (carreira de filtração de 24h), não sendo utilizados os critérios de transpasse nem de perda de carga para controlar a duração da carreira de filtração. O índice de perdas da estação com a operação de lavagem dos filtros é cerca de 1,5%.

Após a lavagem, a ALF é encaminhada para um tanque de equalização e posteriormente é transferida para uma lagoa de sedimentação, essa lagoa possui uma comporta por meio da qual o efluente retorna para o canal de entrada dos floculadores. A lagoa de sedimentação ocupa uma área de 5.000 m² e o clima quente e ensolarado da região favorece a proliferação de algas.



Figura 1 - Unidades de tratamento da ETA e pontos de coleta das amostras

2.3 Procedimentos de coleta e análises das amostras

As coletas de amostras de AB e ALF (ALF_B , ALF_{DEC} , ALF_{LSED}) foram realizadas nos pontos indicados na Figura 2, detalhados a seguir:

- Água bruta (AB): foi coletada através de uma tubulação de derivação da adutora de água bruta localizada na entrada da ETA.
- Amostra composta da água de lavagem de filtro (ALF_B): foram coletadas amostras de dois litros a cada minuto durante a operação de lavagem, iniciando pelo minuto zero até o minuto 5, totalizando 6 amostras individuais. A amostra composta da ALF_B foi obtida através da mistura de alíquotas iguais de cada uma das amostras individuais.
- Amostra composta da água de lavagem de filtro decantada (ALF_{DEC}): as 6 amostras individuais de ALF_B foram clarificadas em cones *imhoff* e, alíquotas iguais dos sobrenadantes foram misturadas para formar uma amostra composta clarificada, representando todo o período de lavagem.
- Água da Lagoa de Sedimentação (ALF_{LSED}): foi coletada na saída da tubulação de recirculação do efluente da lagoa de sedimentação, na entrada da unidade de floculação.

Análises de pH, cor, turbidez e sólidos suspensos foram realizadas no mesmo dia de coleta em todas as águas coletadas. Sólidos sedimentáveis foram analisados na ALF_B enquanto que a clorofila "a" foi analisada no efluente da lagoa de sedimentação (ALF_{LSED}). Todas as análises foram realizadas seguindo os procedimentos padrões descritos em APHA *et al.* (2012), exceto sólidos suspensos, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3- Descrição dos parâmetros físico-químicos avaliados e metodologias adotadas

Variáveis	Método	Procolo
pH	Potenciométrico	4500 B (APHA, 2012)
Sólidos suspensos	Fotométrico	8006 (DR 5000) ¹
Sólidos sedimentáveis	Volumetria	2540 F (APHA, 2012)
Clorofila "a"	Espectrofotométrico	10200 H (APHA, 2012)
Turbidez	Nefelométrico	2130 B (APHA, 2012)
Cor	Colorimetria	2120 (APHA, 2012)

¹Modelo do espectrofotômetro utilizado, Hach DR 5000

2.4 Ensaios de tratabilidade

Os ensaios foram realizados em equipamento jarteste e reproduziram os processos de oxidação, coagulação, floculação e filtração. Alíquotas de aproximadamente 150 mL foram coletadas após a filtração para determinação dos parâmetros físico-químicos.

Em todas as cinco fases realizadas, o gradiente da velocidade mistura rápida foi de 1000 s^{-1} durante 30 segundos, enquanto que na mistura lenta, a variação foi gradativa, de 90 s^{-1} , 60 s^{-1} e 30 s^{-1} com duração de 5 minutos cada, de acordo com dados obtidos na literatura (Libânio, 2005; Baruth, 1969).

O jarteste utilizado, apresentado na Figura 3, é composto por 6 jarros com capacidade de 2 litros cada, em acrílico transparente. Foram acoplados ao equipamento 6 filtros de laboratório de areia (FLA), com camada de areia de 15 cm, foram selecionados grãos da areia coletada na faixa de tamanho de 0,30 mm a 0,60 mm de diâmetro, apresentando um diâmetro efetivo de 0,37 mm, de acordo com recomendações do Di Bernardo *et al.* (2011). O material filtrante adotado para os filtros foi coletado à beira mar e caracterizado em laboratório, conforme mostra a curva granulométrica representada na Figura 4. O ensaio granulométrico foi realizado em aproximadamente 1,20 kg do material e selecionada a faixa de 0,6 e 0,3mm. A curva apresentada refere-se apenas a faixa selecionada como material filtrante, de 0,6 a 0,3mm.



Figura 3- Equipamento de jarteste fabricado pela Marconi utilizado nos ensaios

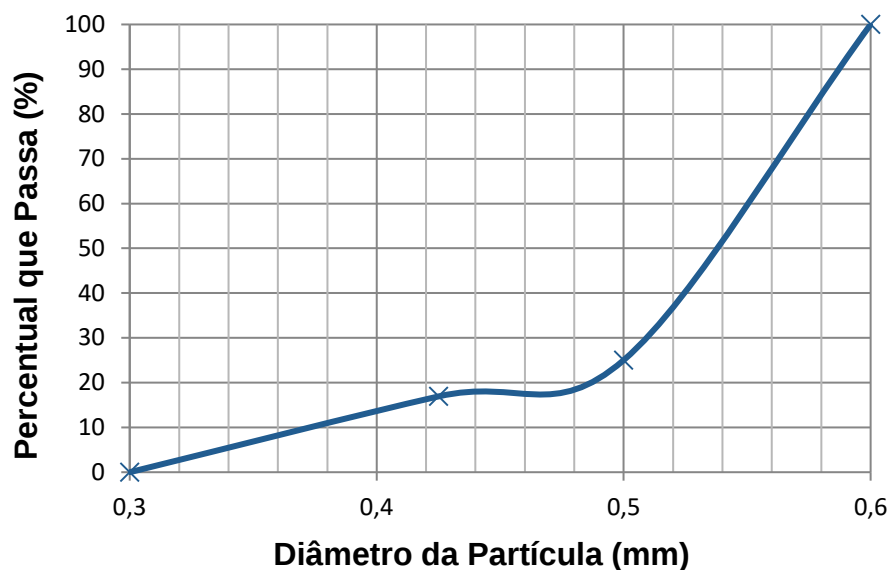


Figura 4 - Curva granulométrica do material filtrante utilizado nos experimentos

Após cada experimento, foi realizada a retrolavagem dos filtros acoplado-se uma mangueira no dispositivo de saída dos filtros, executando-se, assim, um fluxo ascendente e a expansão do leito de areia. Para lavagem, foi utilizada água potável e durou em torno de um minuto. Após a lavagem, o filtro foi preenchido com água destilada para substituir a água remanescente da lavagem.

Os produtos químicos utilizados foram os mesmos utilizados na ETA. Para a oxidação, utilizou-se hipoclorito de cálcio - $\text{Ca}(\text{ClO})_2$, com 65% de cloro ativo. O coagulante utilizado foi o hidroxicloreto de alumínio (HCA – PAC) com 23% de alumínio. Todos os experimentos foram realizados com o pH natural das amostras.

A Tabela 4 resume os principais parâmetros utilizados em cada etapa do tratamento durante os ensaios.

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros operacionais adotados nos ensaios em jarreste

Oxidação	Ca(ClO) ₂ - Hipoclorito de Cálcio	
	Gradiente: 10s ⁻¹	
Coagulação	HCA – Hidroxicloreto de Alumínio	
	Gradiente: 1000 s ⁻¹	
	Tempo: 30s	
Floculação	Gradiente 1: 90 s ⁻¹ ;	Tempo 1: 5 min
	Gradiente 2: 60 s ⁻¹ ;	Tempo 2: 5 min
	Gradiente 3: 30 s ⁻¹ ;	Tempo 3: 5 min
Filtração	0,3 mm – 0,6 mm	
	D ₁₀ = 0,37 mm	
	Coeficiente de desuniformidade (Cd) = 1,49	

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da água bruta e das ALFs

As características da água bruta e dos resíduos coletados durante o período de pesquisa estão reunidas na Tabela 5, mostram os valores máximos e mínimos dos parâmetros analisados.

Tabela 5 - Características físico-químicas da água bruta da lagoa de Extremoz e dos resíduos (ALFs) utilizados nos experimentos, no período de junho a setembro/2016

Amostra	Cor aparente (uH)	Turbidez (unT)	SST (mg/L)	pH
AB (lagoa Extremoz)	19 - 24	1,3 - 2,4	1 - 4	7,36 - 7,72
ALF _B	107 - 150	20,2 - 28,0	15 - 20	-
ALF _{DEC}	104 - 114	15,1 - 18,0	14 - 20	-
ALF _{LSED}	73 - 106	11,7 - 16,5	2 - 19	-

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos nos ensaios de controle (sem recirculação) realizados na água bruta nos tratamentos: filtração direta (fase 2) e filtração direta em linha (fase 3).

Tabela 6- Ensaios de controle (sem recirculação) realizados com a AB

Tratamento	Toxi (min)	Doxi (mg/L)	DHCA (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uH)	pH	SST (mg/L)
2	10	2	4	0,61	7,9	7,47	0,8
			6	0,47	5,9	7,47	0,2
			8	0,39	4,5	7,5	0,2
3			4	0,97	10,5	7,68	0,3
			6	0,45	6,5	7,61	0,1
			8	0,3	5,1	7,61	0,1

LEGENDA: T_{OXI} - tempo de oxidação; D_{OXI} - dose de oxidante; D_{HCA} - dose de coagulante.

Dados da AB: turbidez - 1,28 unT; cor - 21 uH; pH - 7,58; SST - 1mg/L

A Figura 5 mostra a média dos resultados obtidos para sólidos sedimentáveis analisados nos cones *Imhoff* e a concentração de SST, enquanto que a concentração média de cor e turbidez da ALF_B no período da pesquisa estão na Figura 6. As figuras mostram que nos tempos de lavagem entre minutos 2 e 3 são os que apresentam maior volume de sólidos e maior concentração de SST, cor e turbidez, e os demais minutos apresentaram volumes de sólidos sedimentáveis próximos a zero. Esses resultados permitem sugerir que o tempo de lavagem de filtros da ETA Extremoz poderia ser reduzido para 4 minutos, reduzindo o volume de água tratada utilizado na operação e, conseqüentemente, diminuindo o volume de resíduos.

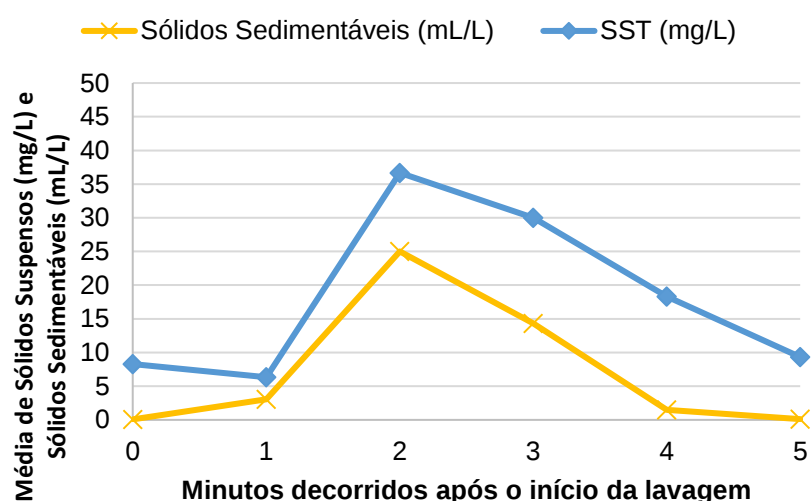


Figura 5 - Volume de sólidos sedimentáveis e concentração de SST na ALF durante o período de lavagem de filtros na ETA Extremoz

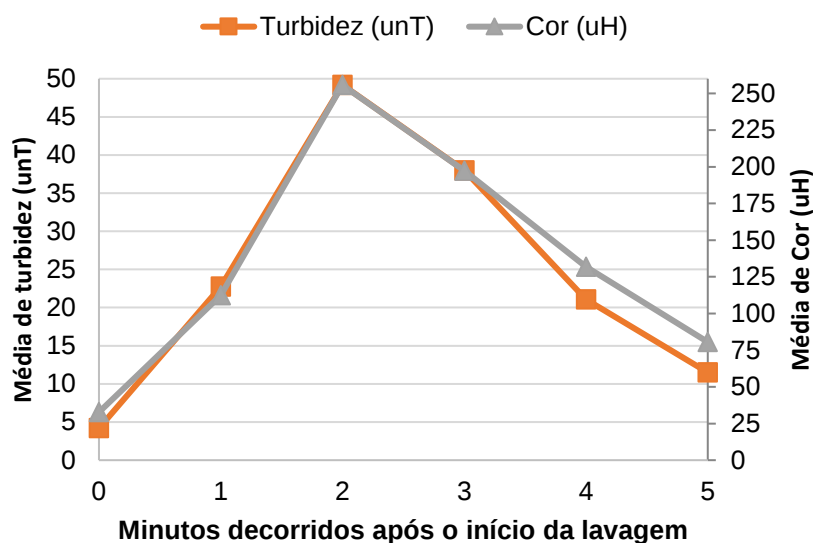


Figura 6 – Concentração média de turbidez e cor ALF durante o período de lavagem de filtros na ETA Extremoz

Os resultados de pH em todos os experimentos realizados nesse trabalho variaram entre 7,24 a 7,88, e, portanto, dentro da faixa recomendada pela Portaria nº 2914/2011 que recomenda que o pH se mantenha entre 6,0 e 9,5. Não foi feita correção de pH em virtude do pH natural ter se mostrado o mais adequado para o tratamento.

3.2 Fase 1 – Filtração direta

A fase 1 compreendeu as etapas de coagulação, floculação e filtração. As concentrações do coagulante testadas variaram de 1 mg/L a 3 mg/L, definida de acordo com a operação da ETA na época dos ensaios (junho a setembro de 2016), que utiliza 1 mg/L de hidroxícloreto de alumínio com 23%.

Nessa fase, também foi realizada a oxidação com NaClO, utilizando a mesma concentração adotada na ETA – 1mg/L de cloro com o tempo de contato de 5 minutos. Entretanto, posteriormente, observou-se que o oxidante utilizado estava fora do prazo de validade, e, portanto, não surtiu efeito. Por isso, não foi considerada a realização da etapa de oxidação na fase 1.

Nos experimentos, a água bruta com turbidez entre 2,1 a 2,37 unT. Após o tratamento, a turbidez situou-se na faixa de 1,46 a 2,40 unT. O melhor resultado obtido foi com 2% de recirculação de ALF_{DEC} e uma concentração de 3mg/L de HCA 23,

conforme mostra a Tabela 10, no Apêndice A. As médias dos resultados para turbidez e cor estão nas Figura 7 e Figura 8.

A cor da água bruta apresentava concentrações de 23 uH e, após os ensaios de tratabilidade, alcançou uma faixa de 19 uH a 26 uH.

Os resultados obtidos não atenderam os padrões de potabilidade previsto na Portaria nº 2914/2011 para cor e turbidez, cujos valores máximos permitidos (VMP) são de 15 uH e 0,5 unT, respectivamente. Pelos resultados, observa-se que as doses de coagulante adotadas foram insuficientes para o tratamento e a necessidade da etapa de oxidação para remoção da cor.

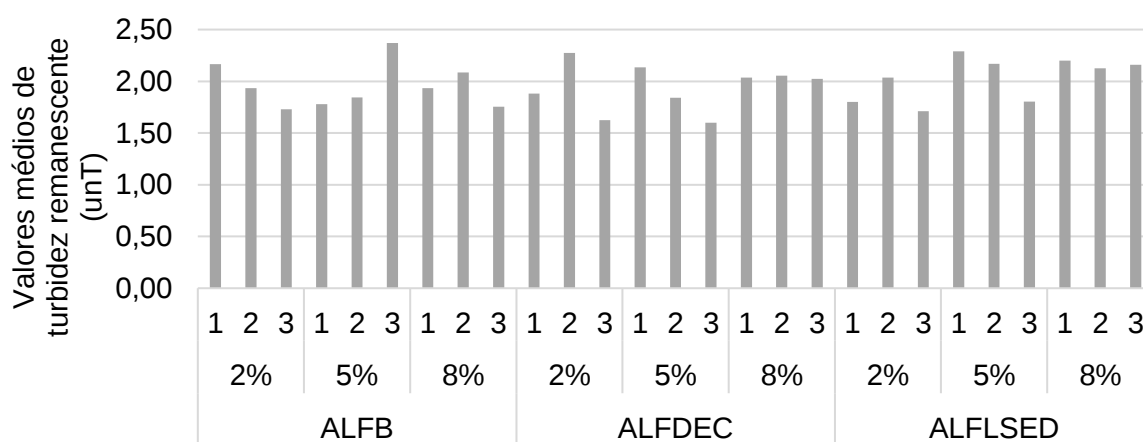


Figura 7 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), percentual de recirculação e tipo de água de lavagem

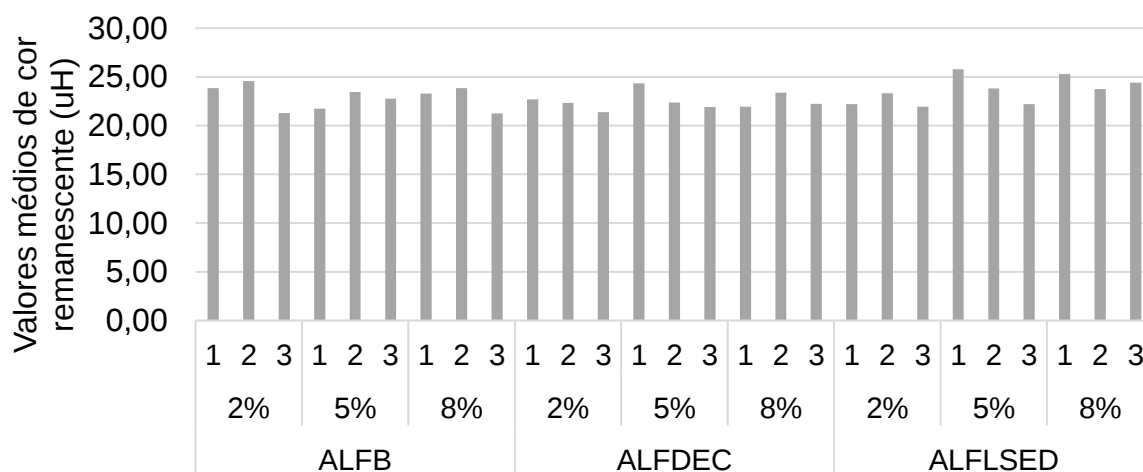


Figura 8 - Variação dos valores médios de cor em função da dose de coagulante (mg/L), percentual de recirculação e tipo de água de lavagem

A Figura 9 mostra a média das concentrações remanescentes de cor e turbidez em relação as variáveis testadas – tipo de resíduo, razão de recirculação e dose de

coagulante - em todos os 54 experimentos realizados. Os gráficos mostrados na Figura 9 e nas demais figuras similares apresentadas nesse trabalho foram elaboradas a partir da análise de variância (anova). As barras que não fazem intersecção denotam que as médias são diferentes entre si, do ponto de vista estatístico, ao nível de significância de 95%.

Nota-se pela Figura 9 que os melhores resultados foram para aqueles experimentos nos quais se utilizaram a menor taxa de recirculação (2%), a maior dose de coagulante (3mg/L) e ALF_{DEC} .

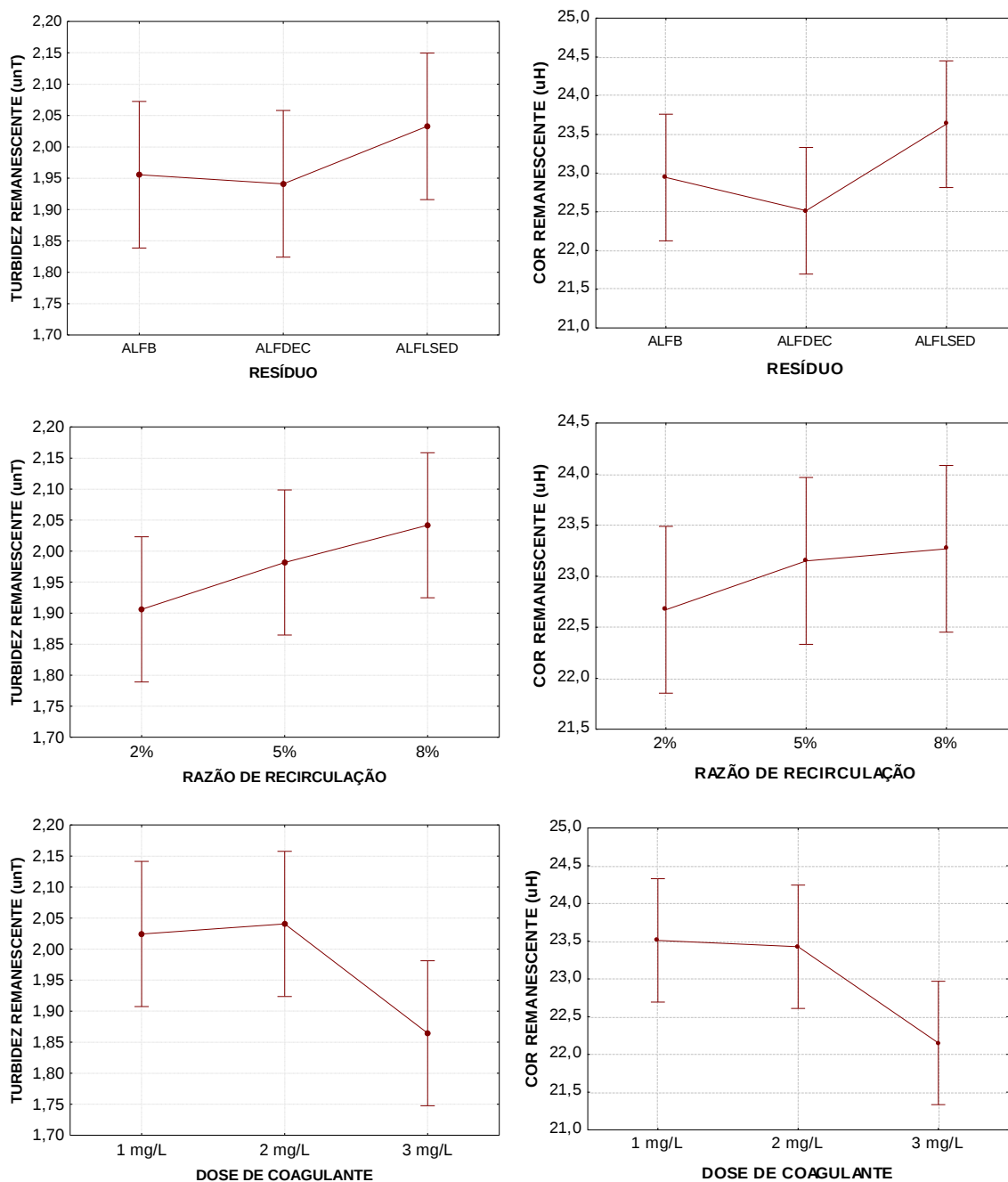


Figura 9 – Comparação entre as médias de cor e turbidez de todos os experimentos realizados em função das diferentes variáveis testadas: resíduo, razão de recirculação e dose de coagulante

O Diagrama de Pareto (Figura 10) foi utilizado para observar a influência dos fatores que afetaram na remoção dos parâmetros analisados.

No gráfico, as letras "L" e "Q" após cada fator indicam se o fator obedece a uma função linear (L) ou quadrática (Q), permitindo distinguir se o fator avaliado tem relação linear ou não com as variáveis independentes. O sinal de cada número localizado no final das barras indica se a função é positiva ou negativa. As barras que

ultrapassam a linha vertical mostram os fatores que, para um nível de confiança de 95%, influenciam significativamente na variação dos parâmetros analisados.

Observa-se na Figura 10 que apenas as doses de coagulante testadas influenciaram na cor e na turbidez do efluente. As demais variáveis testadas – taxa de recirculação e tipo de resíduo – não interferiram de maneira significativa na qualidade da água produzida.

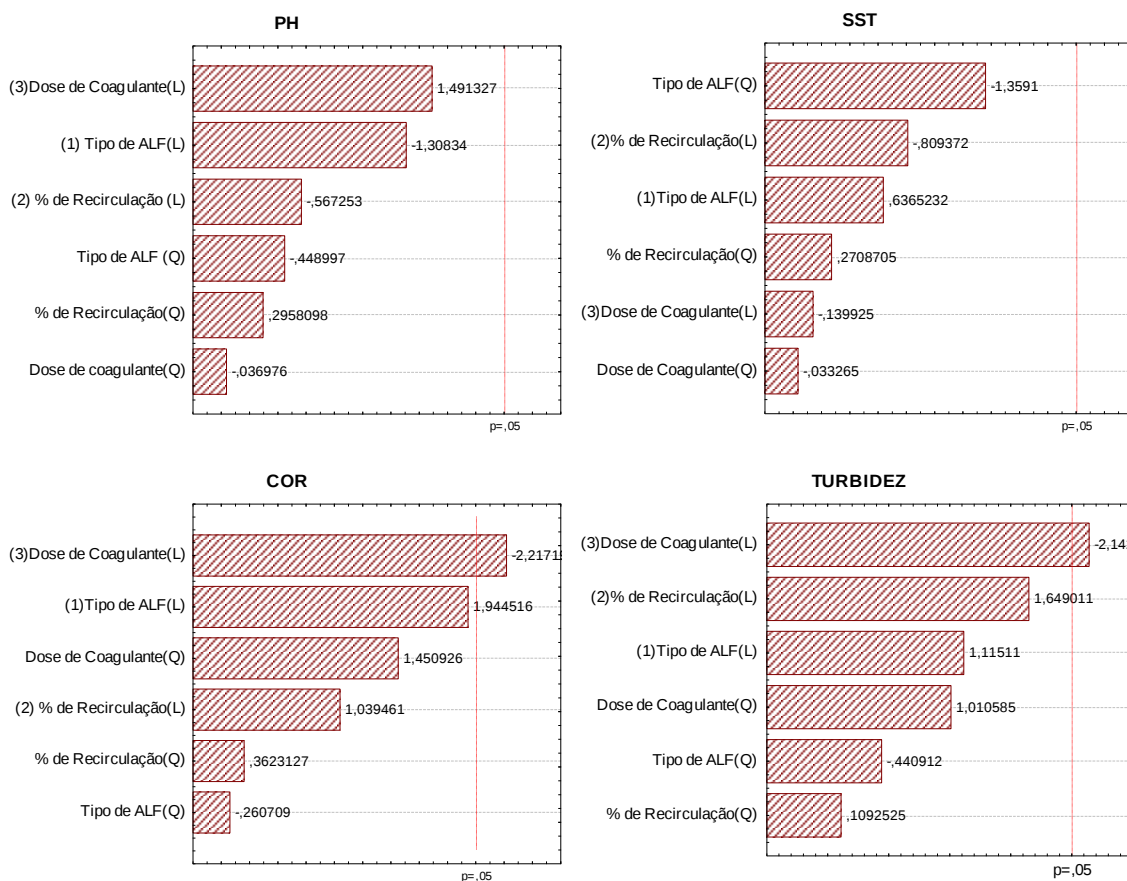


Figura 10 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 1

3.3 Fase 2 – Filtração direta com pré-oxidação

Na fase 2, as etapas de pré-oxidação e coagulação foram ajustadas para melhorar o tratamento uma vez que os procedimentos e doses adotados na fase anterior não forneceram resultados satisfatórios.

Foram realizados experimentos auxiliares variando o tempo de oxidação em 10, 15 e 20 minutos para as concentrações de 2, 3 e 4 mg/L de cloro, utilizando o $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ (Tabela 7). Após definir a dose de 2mg/L de oxidante em tempo de contato

de 10 minutos, foram feitos ensaios auxiliares para determinar uma nova faixa de coagulante, testando concentrações de 0, 2, 4, 6 e 8mg/L (Tabela 8).

Tabela 7 - Ensaios auxiliares com água bruta¹, sem recirculação, em jarreste para definir nova dose e tempo de oxidação

Tempo de Oxidação (min)	Dose de Oxidante (mg/L)	Turbidez remanescente (unT)	Cor aparente remanescente (uH)
10	2	1,37	12
	3	1,43	12
	4	1,36	9
15	2	1,39	13
	3	1,69	14
	4	1,35	13
20	2	1,60	13
	3	1,45	13
	4	1,38	13

¹Dados da água bruta: turbidez 1,8 unT e cor aparente 21 uH

Tabela 8 - Ensaios auxiliares com água bruta¹, sem recirculação, em jarreste para definir novas doses de coagulantes

Tempo de Oxidação (min)	Dose de Oxidante (mg/L)	Dose de Coagulante	Turbidez remanescente (unT)	Cor aparente remanescente (uH)
10	2	0	1,33	15
		2	1,81	16
		4	1,02	12
		6	0,77	9
		8	0,76	7
		10	0,53	5

¹Dados da água bruta: turbidez 2,93 unT e cor 30 uH

A etapa da pré-oxidação permitiu que fosse atendido o VMP para cor (<15 uH) na maioria dos experimentos. Apenas em três ensaios – todos com a dose de 4mg/L de coagulante não foi atingido o valor desejado. Dois casos foram durante a recirculação com 8% de ALF_{LS}ED e com 5% de ALF_{DEC}, atingindo 19 uH.

Para a turbidez, o padrão de 0,5 unT foi atendido em apenas 11% dos experimentos. A melhor condição encontrada foi para a taxa de recirculação de 2% e a maior dose de coagulante – 8mg/L, em que os resultados estiveram em torno de 0,51 unT. A pior condição encontrada – 8% de recirculação e 4mg/L de coagulante –

a média da turbidez remanescente foi de 1,27 unT. O pior caso analisado resultou em uma turbidez de 2,63 unT, utilizando a ALFLSED. Os resultados de todos os ensaios estão na Tabela 11, no Apêndice A. A Figura 11 e a Figura 12 mostram as médias dos resultados para turbidez e cor.

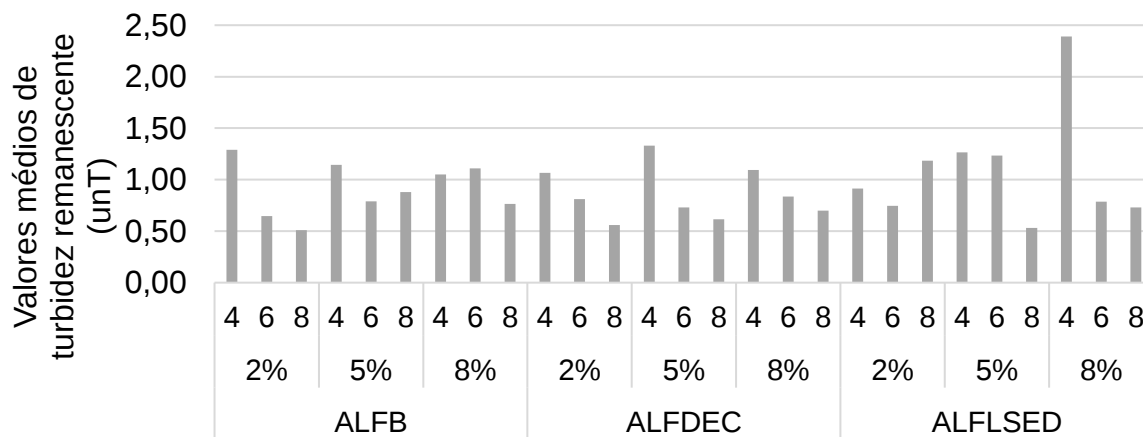


Figura 11 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), percentual de recirculação e tipo de água de lavagem

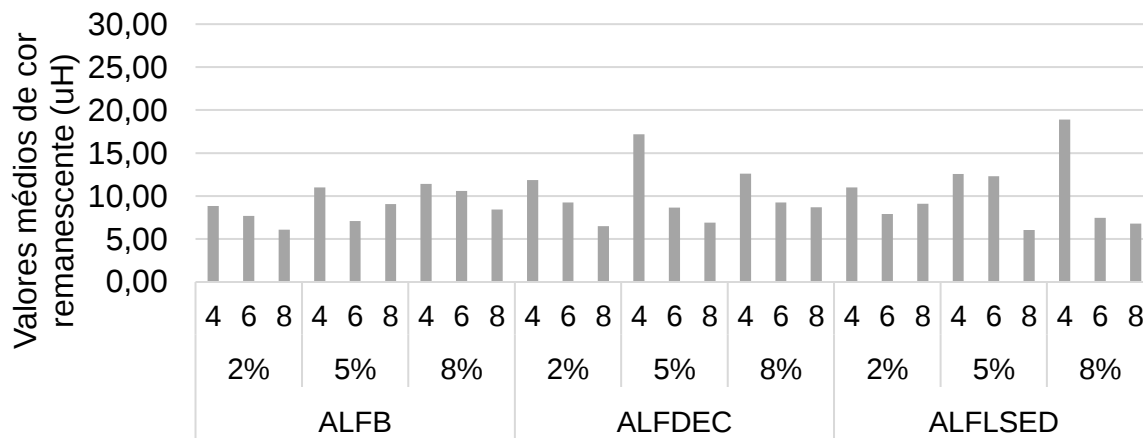


Figura 12 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), percentual de recirculação e tipo de água de lavagem

A Figura 13 mostra a média remanescente das variáveis respostas em relação aos fatores analisados.

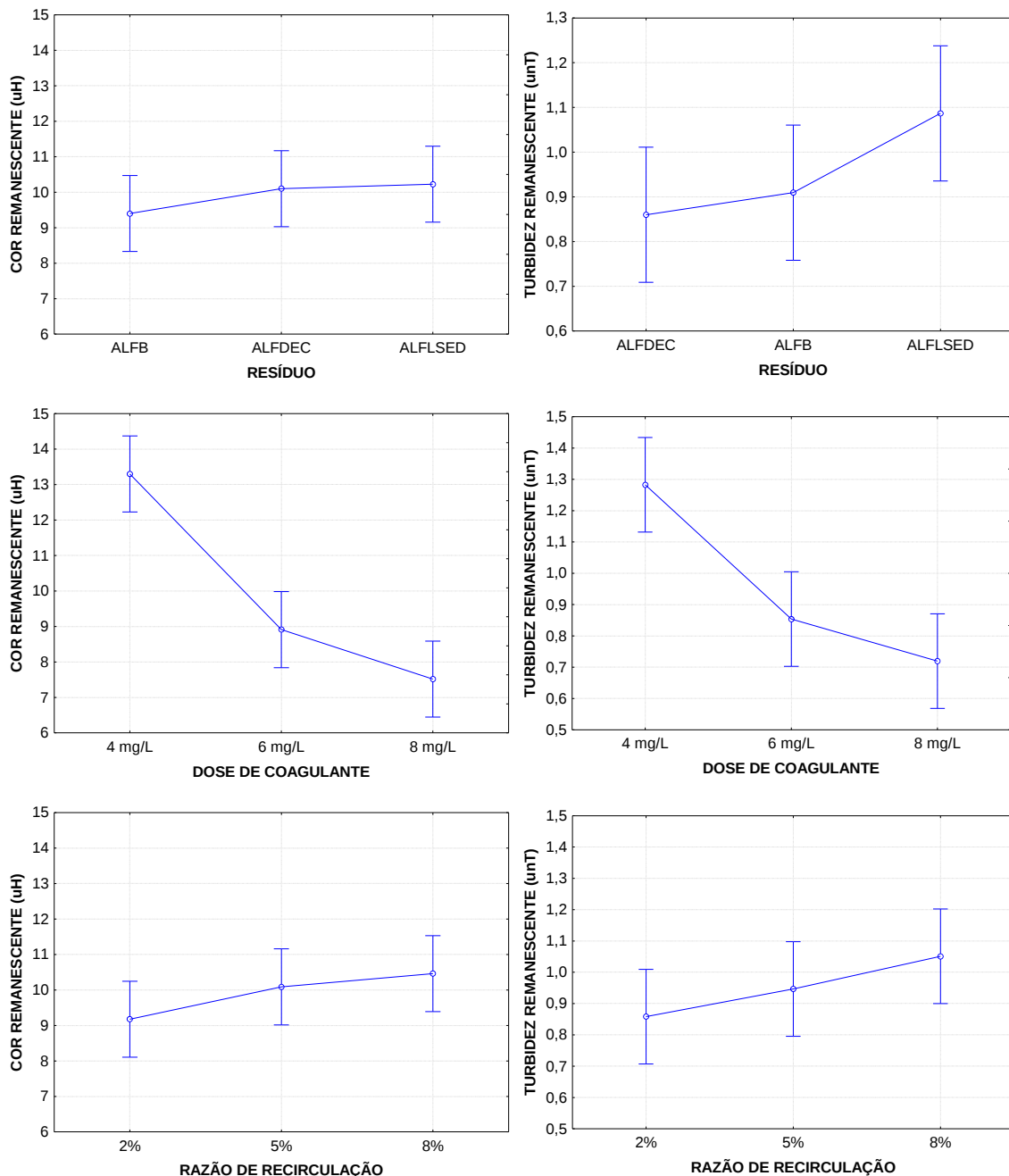


Figura 13 – Comparação entre médias de turbidez em função dos fatores analisados: resíduos, dose de coagulante e razões de recirculação

O tipo de água recirculada – ALFB, ALFDEC ou ALFLSED –, de acordo com o Diagrama de Pareto, interferiu no tratamento em relação a turbidez e SST (Figura 14). Ensaio utilizando ALFDEC resultaram nos melhores resultados e, embora a ALFLSED possuísse a menor turbidez em relação aos outros resíduos, obteve a maior concentração de turbidez no efluente.

A dose de coagulante continuou sendo o fator de maior influência na remoção dos parâmetros de cor, turbidez e SST, conforme mostra a Figura 14. Quanto maior a dose de HCA, melhor a eficiência obtida.

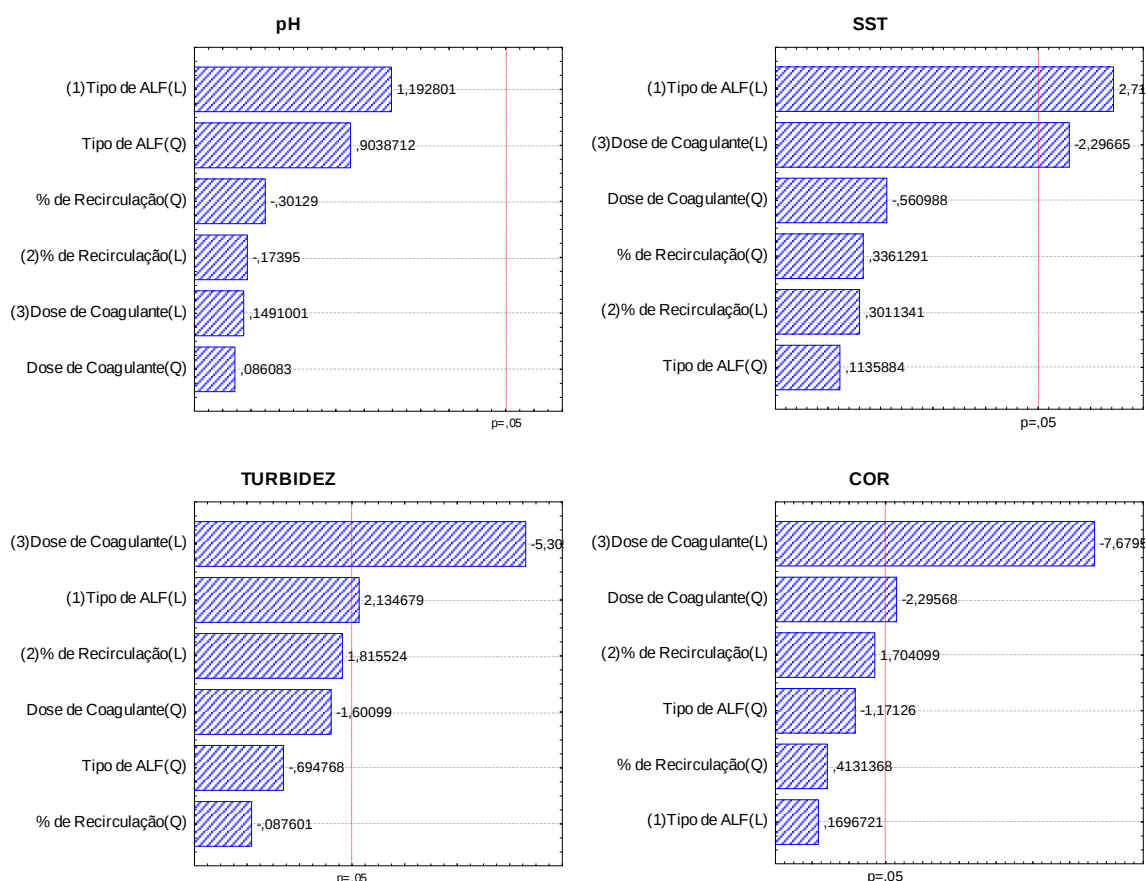


Figura 14 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 2

3.4 Fase 3 – Filtração direta em linha com pré-oxidação

A fase 3 reproduziu as mesmas etapas de tratamento e condições operacionais realizados na fase 2, excluindo a etapa de floculação.

A turbidez atendeu o VMP em cerca de 13% dos experimentos, variando na faixa de 0,42 a 1,70 unT. O melhor resultado foi para 2% de ALF_{DEC} com 8mg/L de coagulante, enquanto que a maior concentração remanescente de turbidez (1,70 unT) foi para a ALF_{LSED}, com 4 mg/L de HCA e razão de recirculação de 5%. Em relação a cor, o parâmetro não atendeu o VMP em apenas um ensaio, para a ALF_{LSED}, com 4mg/L de coagulante, 8% de recirculação, onde a cor remanescente alcançou o valor de 17 uH. Os resultados dessa fase estão reunidos na Tabela 12, no Apêndice A.

A Figura 15 mostra o comportamento da turbidez e da cor aparente remanescentes em função da dose de coagulante, taxa de recirculação e tipo de resíduo adotado. Assim como na fase anterior, quanto maior a dose de coagulante e menor a razão de recirculação, melhor foi a eficiência do experimento.

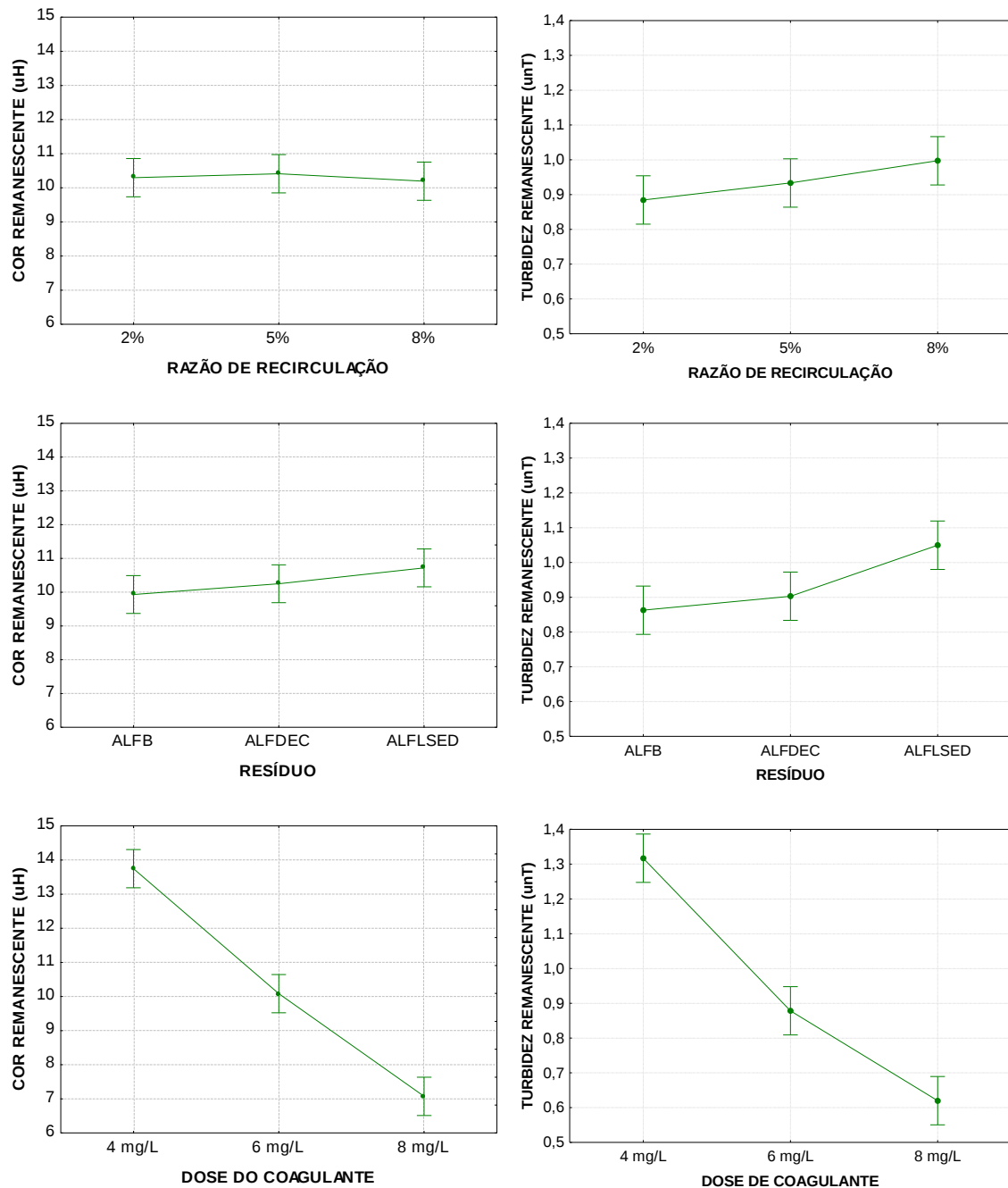


Figura 15 - Concentrações de cor e turbidez em função das diferentes variáveis testadas: resíduo, razão de recirculação e dose de coagulante

Assim como nas fases anteriores, observamos pelo diagrama de Pareto (Figura 16) que a dose utilizada do coagulante foi a variável que mais influenciou na remoção da cor, turbidez e SST.

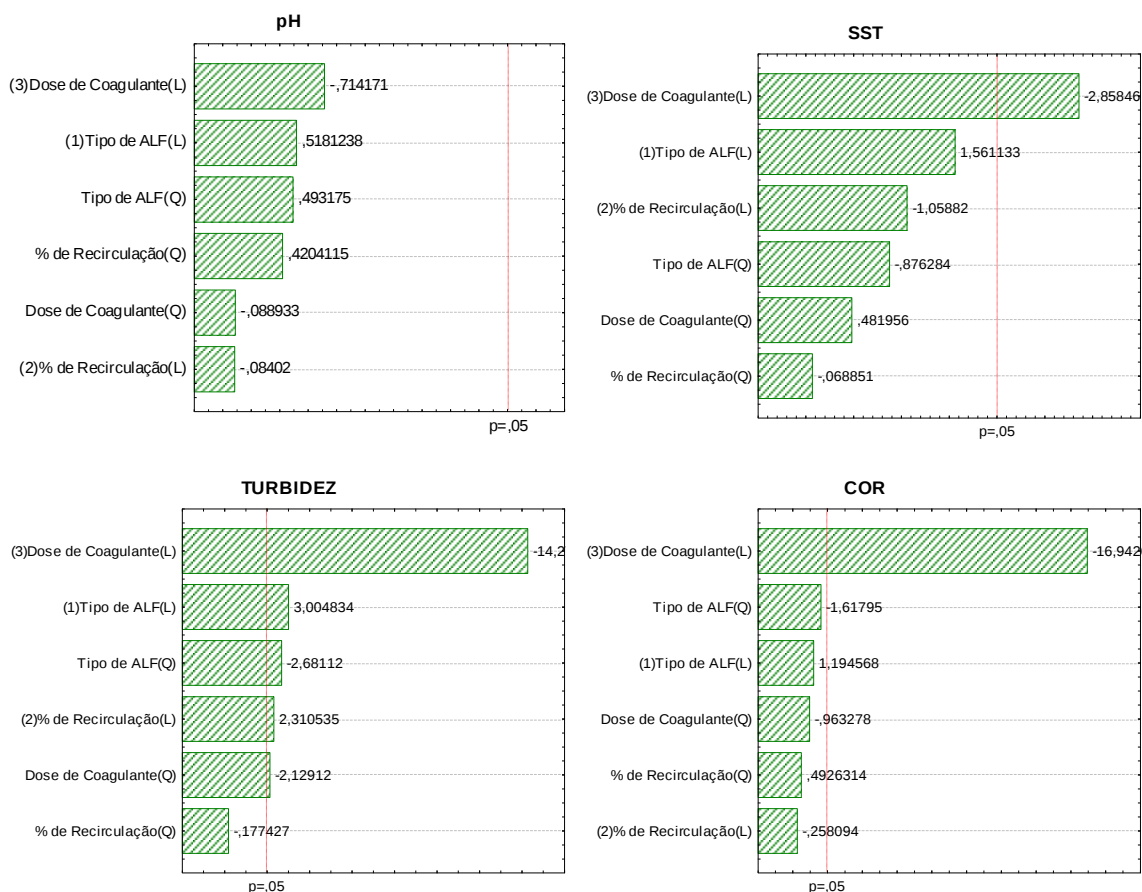


Figura 16 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 3

Campos (2014) avaliou a recirculação de ALF nas taxas de 0, 2, 4, 6, 8 e 10%. Os valores de turbidez mantiveram-se dentro de um mesmo padrão, variando no máximo 0,4 unT de um ensaio para outro. A turbidez da água bruta variou entre 11,4 a 162 unT e da ALF de 49 a 584 unT.

Cornwell & MacPhee (2001) avaliaram os efeitos provocados pela recirculação de ALF, utilizando água bruta com turbidez inferior a 5uT e foram testadas recirculações de 2%, 10% e 20%. Os estudos sugerem que a recirculação dos resíduos em água de baixa turbidez insere uma turbidez adicional à água bruta, podendo auxiliar o processo de tratamento, elevando a remoção de microrganismos e turbidez. Durante o período de recirculação, a turbidez afluyente alcançou picos de 40-50 unT.

De acordo com Di Bernardo (2008), a turbidez de ALF varia na faixa de 58 a 171 unT e SST de 59 a 250 mg/L. Esses valores, porém, podem variar extensivamente, a depender da configuração da ETA, das características da água bruta, entre outros aspectos. No presente estudo, conforme pode se observar na Tabela 5, a turbidez e os SST são inferiores ao exposto por Campos (2014), Cornwell & McPhee (2001) e Di Bernardo (2008), em virtude da boa qualidade da água bruta. De acordo com Souza (2011), uma maior turbidez na AB possibilita a aplicação do resíduo da ETA mais concentrado em termos de SST. Isso porque água com alta turbidez gera flocos pesados que sedimentam mais rapidamente em relação a água com turbidez reduzida. No presente estudo, porém, mesmo com a recirculação, a turbidez inicial da mistura afluenta ainda é baixa, inferior a 10uT.

Obseva-se pela Figura 17 que, independentemente do processo adotado – seja com ou sem a etapa de floculação –, a recirculação da ALF_{LS} proporcionou resultados ligeiramente maiores de cor, SST e turbidez em relação aos demais resíduos utilizados. Isso se deve provavelmente a presença de algas que proliferam nas lagoas de sedimentação, estimulada pela exposição solar e presença de nutrientes. A dificuldade na remoção de algas em sistemas de tratamento de água, pode causar problemas como sabor, odor, entupimento em filtros e promover o surgimento de precursores de subprodutos de desinfecção (trihalometanos, principalmente), deteriorando a qualidade da água potável (Veneu *et al.*, 2015).

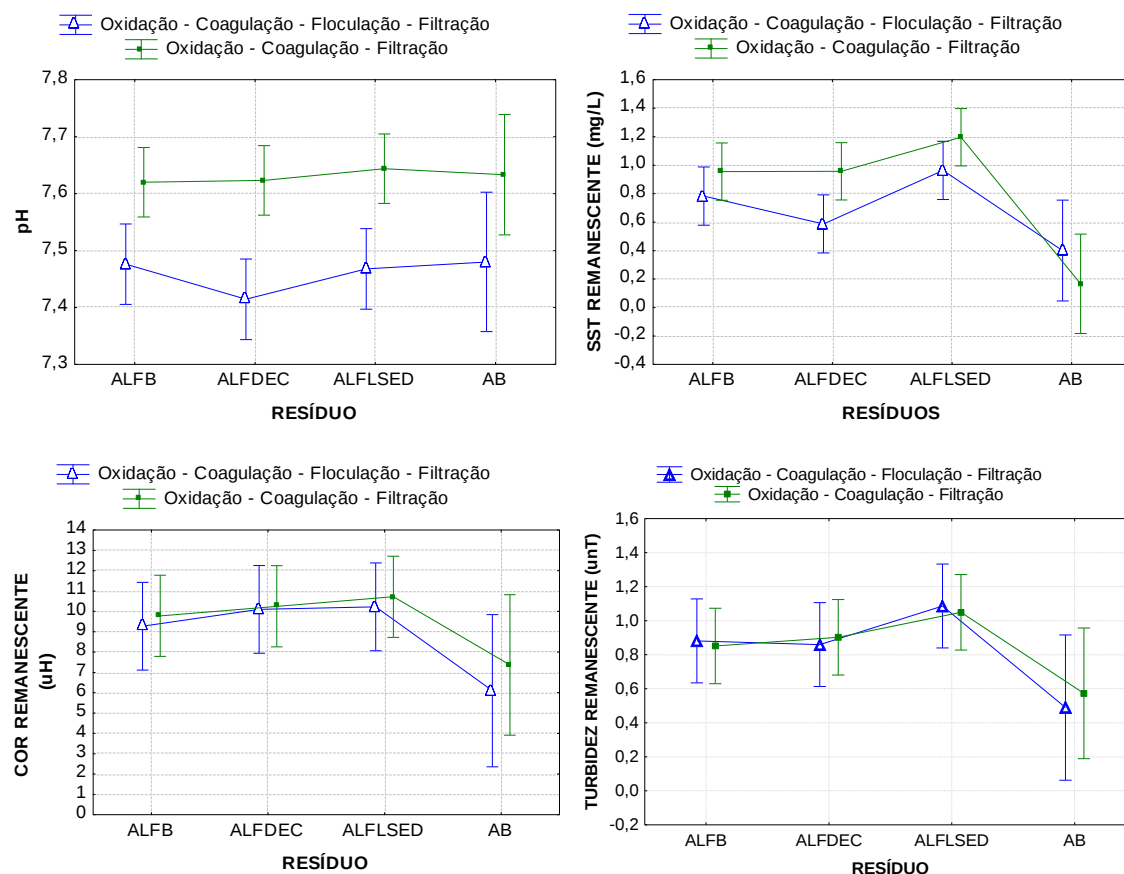


Figura 17 - Comparação entre as médias de pH, SST, cor e turbidez em função tipos de resíduos analisados

O tratamento sem a recirculação, conforme mostra a Figura 17, apresentou resultados melhores em relação ao tratamento com a recirculação de resíduos, entretanto, a diferença não foi significativa. Além disso, como os gráficos representam a média de todos os experimentos realizados em cada fase, as condições operacionais podem ser ajustadas aumentando, por exemplo, a dose de coagulante e diminuindo a taxa de recirculação, de modo a resultar em remoções maiores e melhores resultados.

Pela Figura 18, observa-se que as fases 2 e 3 apresentaram comportamentos semelhantes, indicando que a ausência da etapa da floculação não prejudicou o processo de tratamento. Comparando-se as fases 2 e 3 com a fase 1, nota-se que a presença da etapa da oxidação e ajuste na dose de coagulante foram mais decisivos nos resultados dos experimentos do que a floculação, que pouco interferiu no processo.

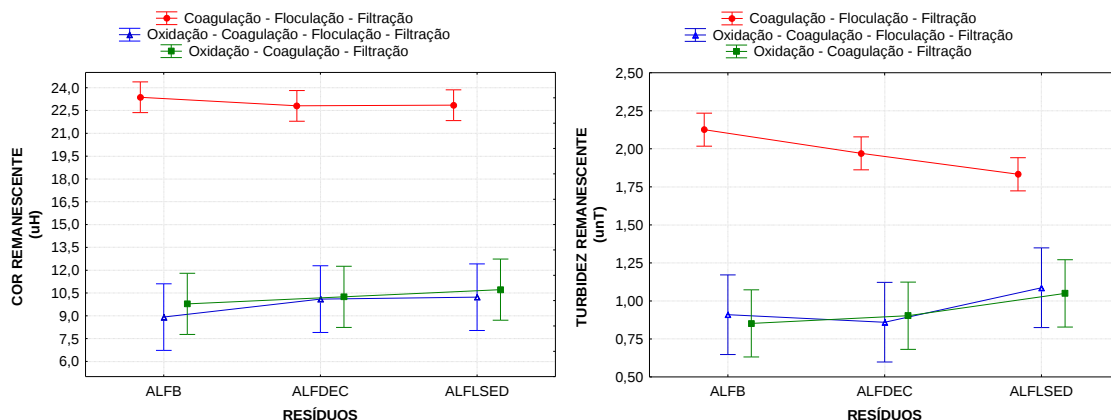


Figura 18 - Médias de cor e turbidez das fases 1, 2 e 3 em função tipos de resíduos analisados

As próximas fases - 4 e 5 - foram testadas a redução do tempo de oxidação de 10 para 5 minutos, e da dose de oxidante de 2 mg/L para 1 mg/L, conforme mostrado na

Tabela 2. Não foi realizada a mistura lenta, em virtude de os resultados anteriores mostrarem que a etapa não influenciou significativamente no tratamento. As concentrações de coagulante adotadas (6 e 8mg/L) foram as que obtiveram melhor resultado nas fases anteriores.

As fases 4 e 5 diferem apenas em relação ao resíduo utilizado: ALFLSED e a ALFDEC, respectivamente. A ALFB não foi testada por razões de proteção sanitária, uma vez que a sedimentação diminui o risco microbiológico de contaminação.

3.5 Fase 4 – Filtração direta em linha com pré-oxidação, utilizando a ALFLSED

A Figura 19 e a Figura 20 mostram as médias dos resultados dos ensaios realizados. Todos os experimentos atenderam ao VMP de 15 uH em relação a cor, sendo o maior valor encontrado de 13 uH. A maior concentração de turbidez remanescente encontrada foi de 1,09 unT com a ALFLSED, dosando 6mg/L de HCA, 2mg/L de cloro em um tempo de contato de 5 minutos, conforme mostra a Tabela 13, no Apêndice A. Observou-se que nos ensaios sem recirculação a turbidez atingiu o VMP de 0,5 unT em 56% dos casos, porém, com a recirculação, nenhum ensaio atendeu ao VMP.

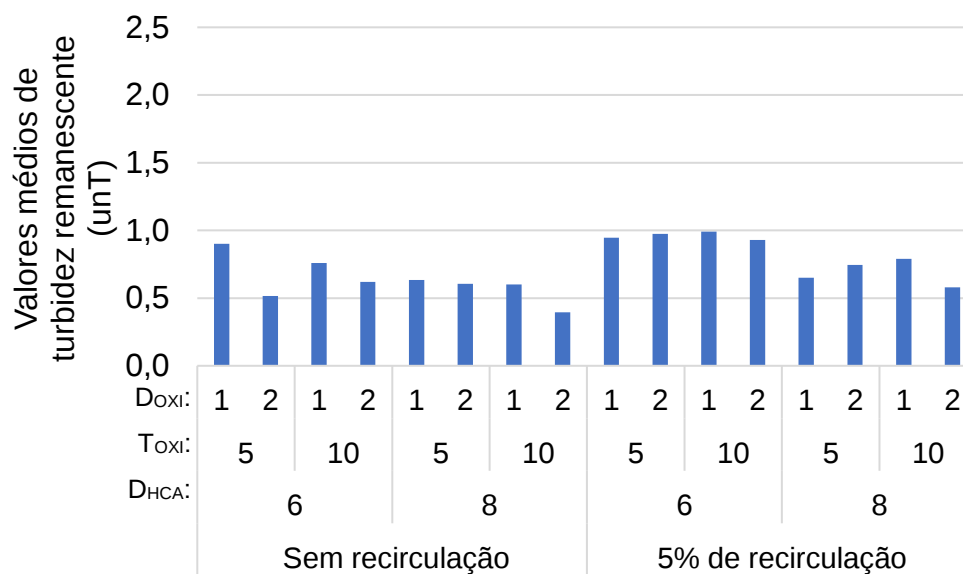


Figura 19 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), tempo de oxidação (minutos) e dose de oxidante (mg/L)

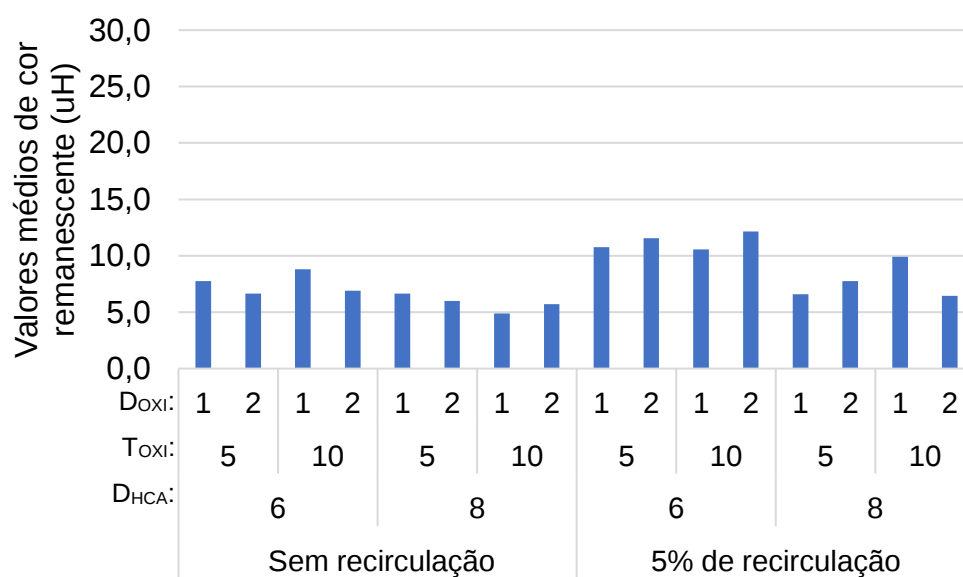


Figura 20 - Variação dos valores médios de cor em função da dose de coagulante (mg/L), tempo de oxidação (minutos) e dose de oxidante (mg/L)

A Figura 21 mostra as concentrações de cor e turbidez em função das variáveis testadas nessa série de experimentos – dose de oxidante e tempo de oxidação.

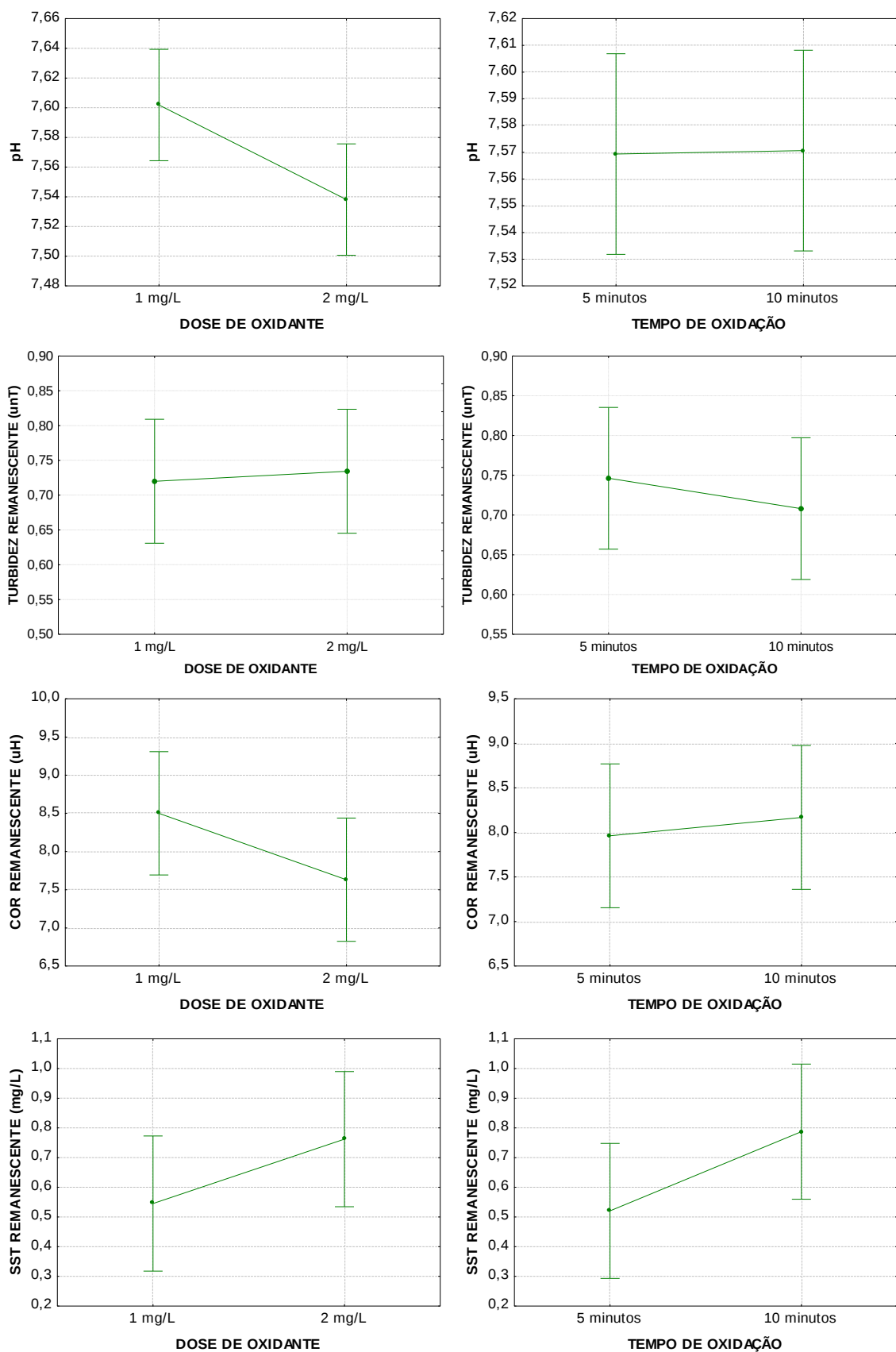


Figura 21 - Comparação entre as médias de cor e turbidez em função da dose de oxidante e do tempo de oxidação

A recirculação influenciou em todos os parâmetros analisados, conforme mostra o Diagrama de Pareto (Figura 22). Para cor e turbidez, além da taxa de recirculação, a dose de coagulante utilizada também foi um fator de interferência significativa.

Os Diagramas de Pareto (Figura 22) mostram que os fatores tempo e dose de oxidação não influenciaram no tratamento. Concluindo-se, assim, que a redução da concentração de cloro de 2mg/L para 1mg/L assim como a redução do tempo de contato de 10 minutos para 5 minutos, não prejudicou o tratamento realizado. Para cor e turbidez, além do percentual de recirculação, a dose de coagulante utilizada também foi um fator de interferência significativa.

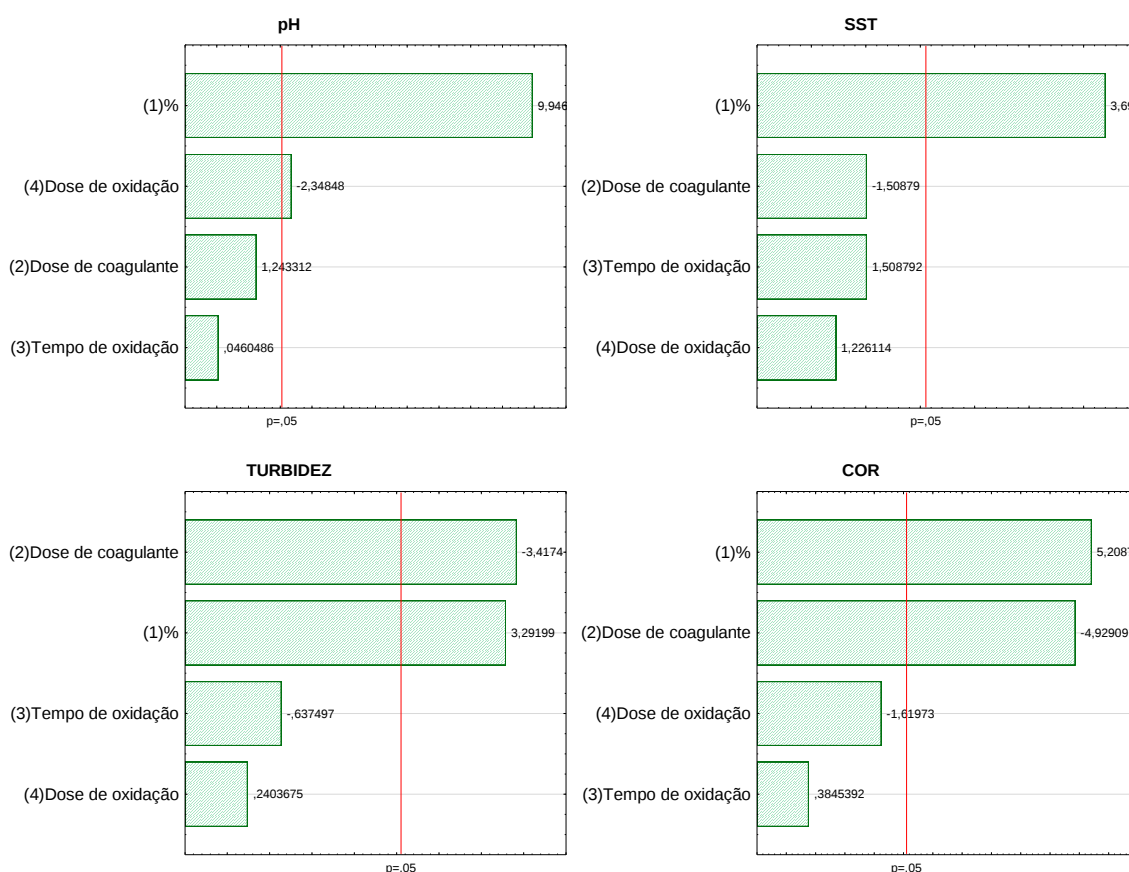


Figura 22 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta e parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 4

3.6 Fase 5 – Filtração direta em linha com pré-oxidação, utilizando a ALF_{DEC}

A fase 5 é similar à fase 4, diferindo apenas em relação ao resíduo utilizado: ALF_{DEC}. Todos os resultados dessa fase estão na Tabela 14, no Apêndice A. A turbidez remanescente nessa fase variou entre 0,5 a 1,3 unT. Só foi atendido o VMP estabelecido pela legislação em 9 dos 32 casos, todos sem recirculação de ALF_{DEC}. O maior valor encontrado para cor foi de 13 uH, atendendo assim ao limite de 15 uH definido pela Portaria nº 2914/2011.

A Figura 23 e a Figura 24 mostram as médias dos resultados dos ensaios realizados.

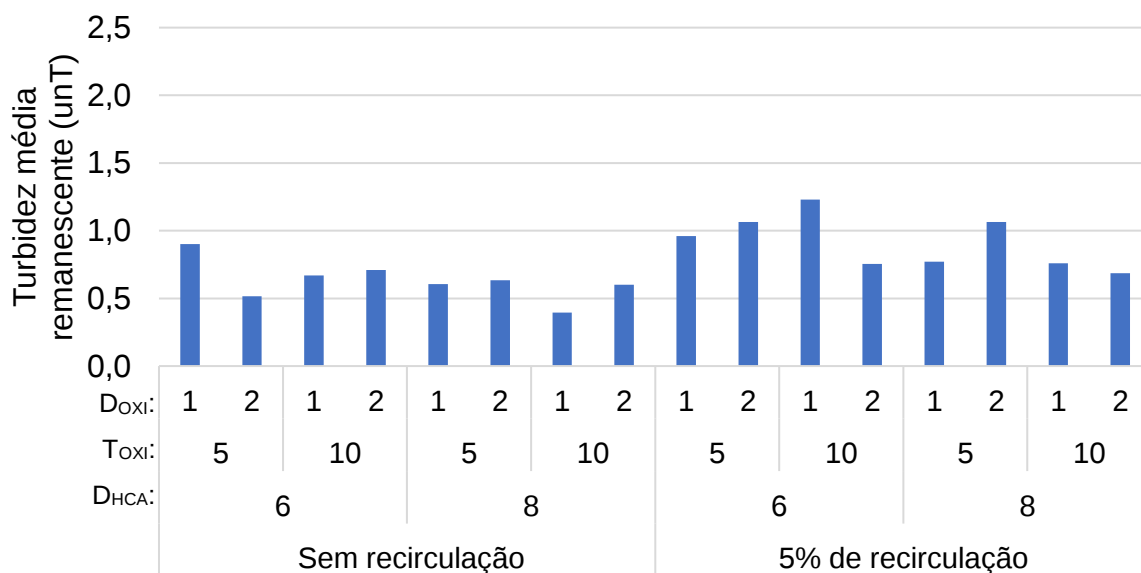


Figura 23 - Variação dos valores médios de turbidez em função da dose de coagulante (mg/L), tempo de oxidação (minutos) e dose de oxidante (mg/L)

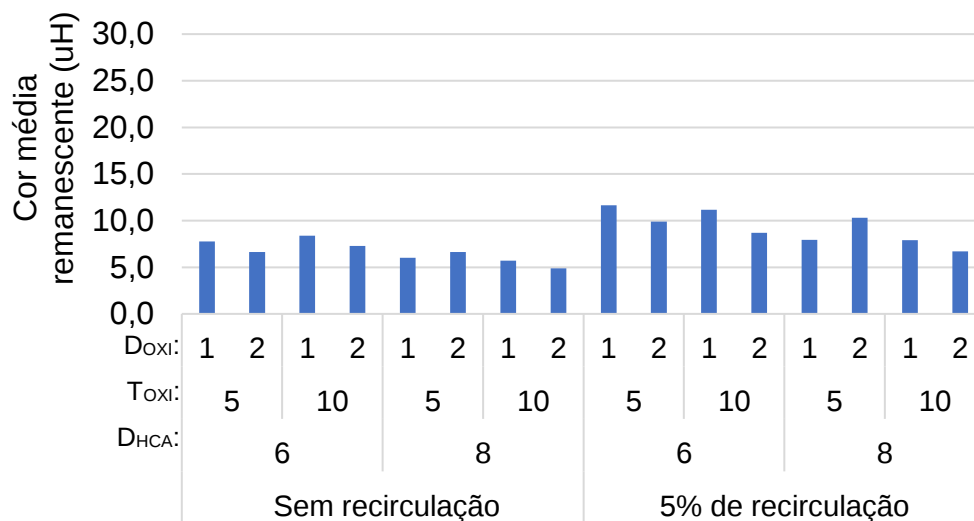


Figura 24 - Variação dos valores médios de cor em função da dose de coagulante (mg/L), tempo de oxidação (minutos) e dose de oxidante (mg/L)

Pelo diagrama de Pareto (Figura 25) observa-se que a taxa de recirculação foi o fator de maior influência no tratamento e o valor positivo no gráfico indica que quanto menor a razão de recirculação, menor a concentração remanescente da variável resposta.

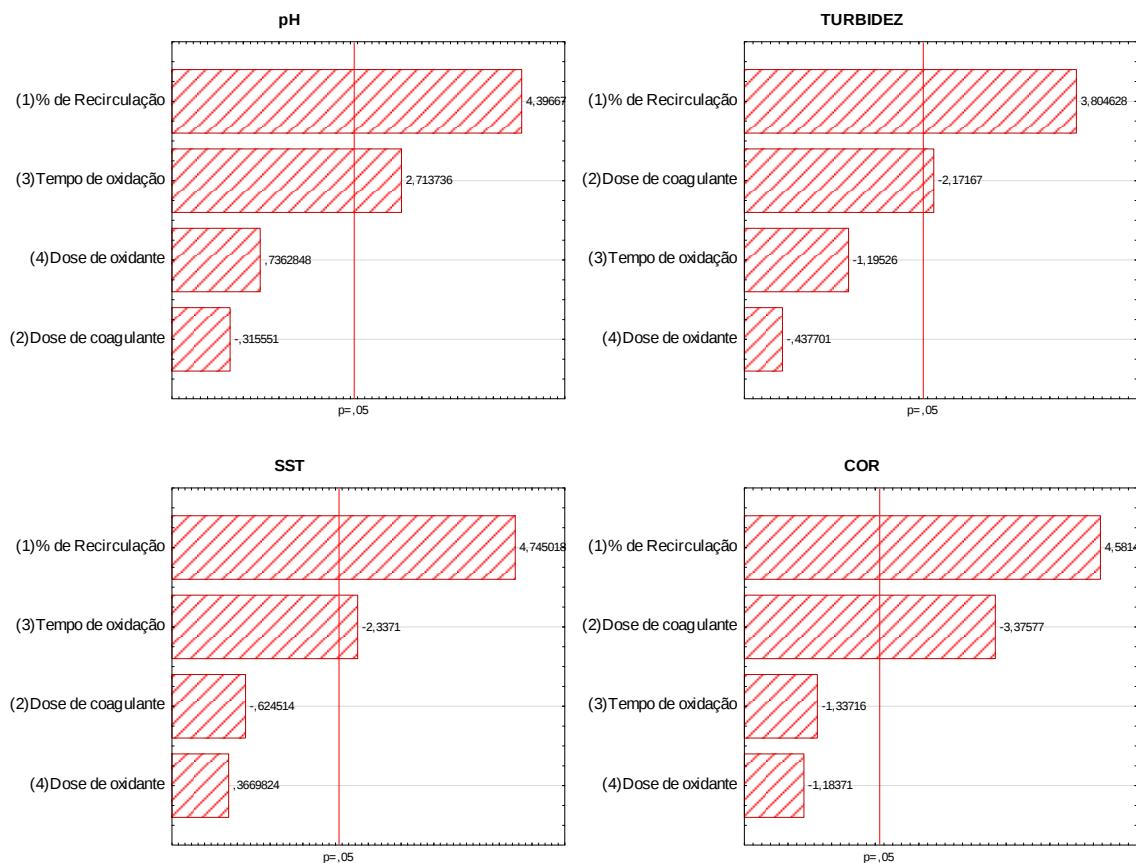


Figura 25 - Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x parâmetros operacionais para a recirculação de ALF na fase 5

Comparando-se os resultados das fases 4 e 5 (Figura 26) por análise de variância, nota-se que a diferença entre os tratamentos com a ALF_{DEC} e a ALF_{LSED} não foi significativa, entretanto, a ALF_{DEC} teve uma menor concentração remanescente em relação aos parâmetros cor e SST, enquanto a ALF_{LSED} teve um desempenho ligeiramente melhor na remoção da turbidez. Esse resultado difere do observado nas fases 2 e 3, onde a ALF_{LSED} resultou as menores remoções em todos os parâmetros. Isso pode ter ocorrido em razão das características da ALF_{LSED} coletada para a realização desse experimento apresentar características diferentes daquela utilizada durante as fases 1, 2 e 3 – conforme visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Características físico-químicas da ALF_{LSED} e ALF_{DEC} utilizadas em cada fase de ensaios

Fase	Resíduo	Cor aparente remanescente (uH)	Turbidez remanescente (unT)	SST (mg/L)
1, 2, 3	ALF _{DEC}	114	18	17
4,5		104	15,1	14
1,2,3	ALF _{LSED}	106	16,5	17
4,5		73	11,7	19

Pelos gráficos mostrados na Figura 26, observa-se que a mudança no tempo e dose durante a etapa de oxidação pouco influenciou a variação da turbidez, ganhando destaque a taxa de recirculação e a dose de coagulante como fatores mais importantes.

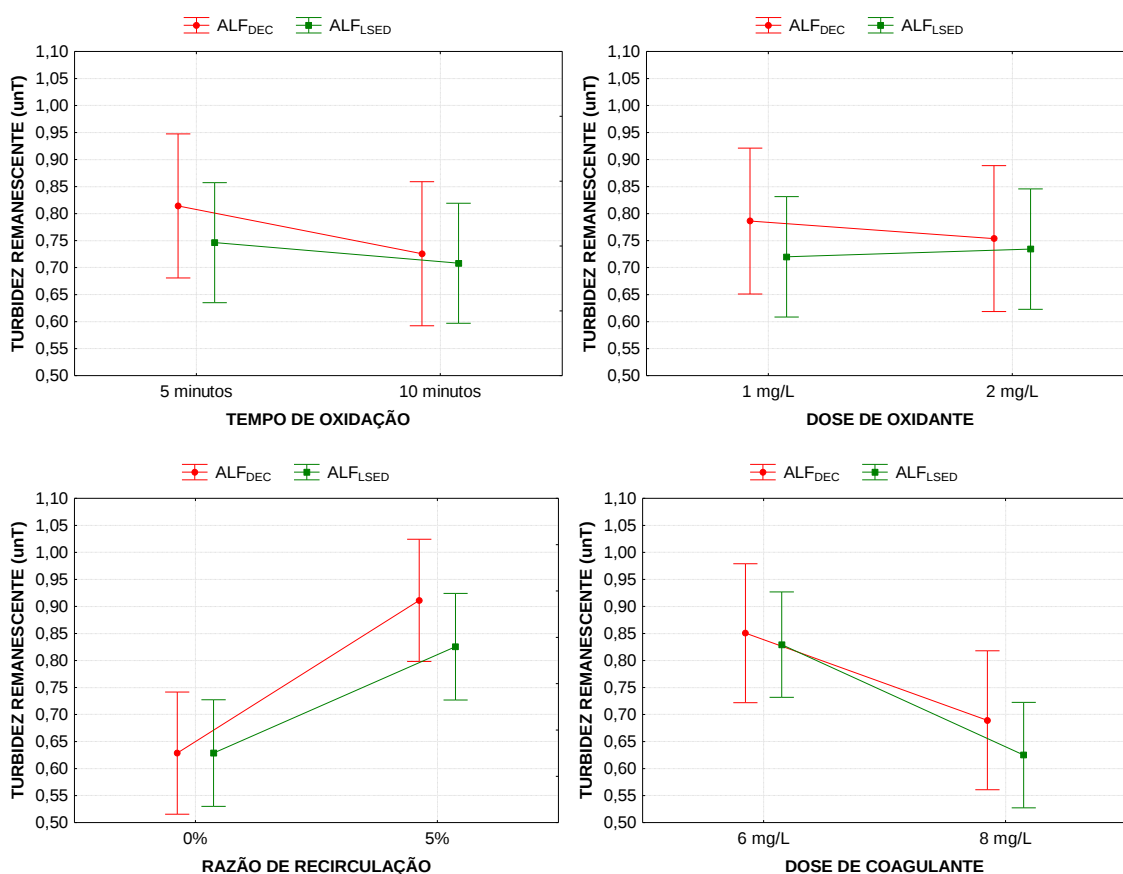


Figura 26 - Comparação das médias de turbidez em função das diferentes variáveis testadas: tempo de oxidação e dose de coagulante

4 CONCLUSÕES

Em todas as fases, a doses de Hidróxicloreto de Alumínio (HCA) foi o fator mais importante na remoção de cor, SST e turbidez que também aumenta com o aumento da dose. A introdução da pré-oxidação permitiu alcançar o VMP pela Portaria nº 2914/2011 para cor aparente. A filtração direta com floculação mostrou-se desnecessária durante os experimentos, uma vez que pouco influenciou nos resultados obtidos.

As etapas de tratamento – oxidação e coagulação – exerceu maior influência no desempenho do tratamento e na qualidade da água final em termos de turbidez, cor aparente e sólidos suspensos totais do que a recirculação dos resíduos. A recirculação da ALF, em diferentes vazões, com ou sem tratamento, não influenciou significativamente no processo de tratamento.

Os estudos mostraram que não houve diferença significativa entre os tipos de resíduos nem entre as taxas de recirculação adotadas, entretanto, quanto menor for a taxa de recirculação, melhor tendem a ser os resultados.

O estudo comprova que a recirculação não acarretou prejuízos ao tratamento da água, podendo ser realizada em ETA de filtração direta. Constitui, portanto, alternativa para minimizar o uso dos recursos hídricos, evitar o lançamento de resíduos de ETA nos corpos de água e diminuir o consumo de energia no processo de tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (30 de 12 de 1988). NBR 10561: Águas - Determinação de resíduo sedimentável (sólidos sedimentáveis) - Método do cone de Imhoff - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação.

Aboytes, B. R., Di Giovanni, G. D., Abrams, A. F., Rheinecker, C., Mceloroy, W., Show, N., & LeChevallier, M. (2004). Detection of infectious *Cryptosporidium* in filtered drinking water. *Journal AWWA - American Water Works Association*.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - AWWA, & WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater*. Hardcover.

Arora, H., Di Giovanni, G., & LeChevallier, M. (2001). Spent filter backwash water contaminants and treatment strategies. *Journal AWWA - American Water Works Association*.

Baruth, E. E. (2005). *Water Treatment Plant Design Fourth Edition*. New York, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill.

Bourgeois, J. C., Walsh, M. E., & Gagnon, G. A. (2004). Treatment of drinking water residuals: comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratios. *Water Research*.

Bourgeois, J. C., Walsh, M. E., & Gagnon, G. A. (2004a). Comparison of process options for treatment of water treatment residual streams. *Journal of Environmental Engineering and Science*.

Braga, M. D., Bevilacqua, P. D., Bastos, R. K., Freitas, A. G., & Ferreira, G. M. (2006). Caracterização microbiológica da água de lavagem de filtros e avaliação de diferentes cenários de recirculação. In *Rescatando antiguos principios para los nuevos desafíos del milenio* (pp. 1-8). AIDIS.

BRASIL. *Lei Nº 12305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos de 02 de agosto de 2010*.

BRASIL, Portaria nº 2914/2011, do Ministério da Saúde. *Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. Brasília: Diário Oficial da União.

Campos, M. C. (2014). Influência da recirculação de água de lavagem de filtros na qualidade da água para consumo humano. *Dissertação de Mestrado*. Campinas, SP, Brasil.

Cerqueira, A. D. (2008). Remoção de oocistos de *Cryptosporidium parvum* e de indicadores no tratamento de água por ciclo completo, filtração direta descendente e dupla filtração, em escala piloto. *Tese de Doutorado*.

Cornwell, D. A., & Lee, R. G. (1994). Waste stream recycling: its effect on water quality. *Journal American Water Works Association*.

Cornwell, D. A., & MacPhee, M. J. (2001). Effects of spent filter backwash recycle on *Cryptosporidium* removal. *Journal AWWA - American Water Works Association*.

Di Bernardo, L., & Scalize, H. C. (1999). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. *Projeto PROSAB*. Rio de Janeiro, RJ: ABES.

Di Bernardo, L., & Paz, L. S. (2008). *Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água* (Vol. 1). São Carlos: LDiBe.

Di Bernardo, L., & Paz, L. S. (2008). *Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água* (Vol. 2). São Carlos: LDiBe.

Di Bernardo, L., Dantas, A. D., & Voltan, P. N. (2011). *Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. São Carlos: LDiBe.

Di Bernardo, L., Dantas, A. D., & Voltan, P. N. (2012). *Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. São Carlos: LDiBe.

Disposição de resíduos de ETA. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE: www.ibge.com.br. Acessado em: 20 de outubro de 2016.

Freitas, A. G., Bastos, R. K., Bevilacqua, P. D., Pádua, V. L., Pimenta, J. d., & Andrade, R. C. (2010). Recirculação de água de lavagem de filtros e perigos associados a protozoários. *Engenharia Sanitária e Ambiental*.

Gottfried, A., Shepard, A. D., Hardiman, K., & Walsh, M. E. (2008). Impact of recycling filter backwash water on organic removal in coagulation–sedimentation processes. *Water research*.

Heller, L., Bastos, R. K., Vieira, M. B., Bevilacqua, P. D., Brito, L. L., Mota, S. M., . . . Cardoso, A. B. (2004). Oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*: circulação no ambiente e riscos à saúde humana. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*.

Libânio, M. (2005). Fundamentos de qualidade e tratamento de água. Campinas, SP: Átomo.

Libânio, M., & Carneiro, L. G. (2001). As perspectivas da recirculação da água de lavagem de filtros em estações de tratamento de água. *Sanare - Revista técnica da Sanepar*.

Raj, C. C., Kwong, T. E., Wong, Cheng, W. W., Fong, L. M., Tiong, S. H., & Klose, P. S. (2008). Wash water in waterworks: contaminants and process options for reclamation. *Journal of Environmental Sciences*.

Situação Volumétrica – Lagoa de Extremoz. Fonte: Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – SEMARH: www.semarh.rn.gov.br. Acessado em: 07 de fevereiro de 2017.

Smith, H. V., & Grimason, A. M. (2003). *Giardia and Cryptosporidium in water and wastewater*. Oxford, UK: Elsevier.

Souza, L. M. (2011). Estudo da aplicação do resíduo de decantador de ETA como auxiliar de floculação no tratamento de água. *Dissertação de Mestrado*. Goiânia, Brasil.

Suman, S., Singh, N. P., & Sulekh, C. (2012). Effect of Filter Backwash Water when lends with Raw Water on Total Organic Carbon and Dissolve Organic Carbon Removal. *Research Journal of Chemical Sciences*.

Tobiason, J. E., Edzwald, J. K., Levesque, B. R., Kaminski, G. K., Dunn, H. J., & Galant, P. B. (2003). Full-scale assessment of waste filter backwash recycle. *Journal AWWA - American Water Works Association*.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2000). National primary drinking water regulations.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2002). Filter Backwash Recycling Rule: Technical Guidance Manual.

Veneu, D. M., Silva, M. M., Di Salvio, A., & Delphino, I. A. (junho de 2015). Tratamento de água eutrofizada através dos processos de pré-oxidação, coagulação e floculação. *ENGEVISTA*, 17, 175-186.

Xiao, F., Zhang, B.-j., Ma, J., Yi, P., & Cui, C.-w. (2009). Effects of low temperature on floc fractal dimensions and shape factors during alum coagulation. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*.

Zhou, Z., Yang, Y., Li, X., Gao, W., Liang, H., & Li, G. (2012). Coagulation efficiency and flocs characteristics of recycling sludge during tratment of low temperature and micro-polluted water. *Journal of Environmental Sciences*

APÊNDICE A - Resultados dos ensaios em jarreste com recirculação de resíduos

Tabela 10 - Resultados dos ensaios em jarreste na fase 1

ALF	%	D _{HCA}	pH	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Cor (uH)	Clorofila (µf/L)
ALF _B	2%	1 mg/L	7,43	2,07	2,00	23	-
			7,36	2,26	3,00	25	-
		2 mg/L	7,51	2,22	1,75	22	-
			7,12	1,65	1,49	27	-
		3 mg/L	7,38	1,64	1,00	23	-
			7,54	1,82	2,15	20	-
	5%	1 mg/L	7,64	1,90	1,60	22	-
			7,25	1,66	1,65	22	-
		2 mg/L	7,29	2,03	1,00	23	-
			7,27	1,66	1,60	23	-
		3 mg/L	7,43	2,37	4,00	23	-
			7,34	2,37	2,00	22	-
	8%	1 mg/L	7,3	2,08	1,00	25	-
			7,38	1,79	1,55	22	-
		2 mg/L	7,44	2,10	3,00	24	-
			7,41	2,07	1,00	24	-
		3 mg/L	7,39	1,61	1,40	20	-
			7,2	1,90	0,77	23	-
ALF _{DEC}	2%	1 mg/L	7,31	1,92	2,00	25	-
			7,52	1,84	1,80	20	-
		2 mg/L	7,53	2,15	2,00	22	-
			7,33	2,40	3,00	22	-
		3 mg/L	7,4	1,79	1,65	20	-
			7,4	1,46	2,61	23	-
	5%	1 mg/L	7,44	2,12	2,00	23	-
			7,55	2,15	2,00	25	-
		2 mg/L	7,51	1,90	1,85	22	-
			7,11	1,78	2,38	23	-
		3 mg/L	8,29	1,63	1,00	22	-

ALF	%	D _{HCA}	pH	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Cor (uH)	Clorofila (µf/L)
	8%	1 mg/L	7,36	1,57	1,60	21	-
			7,51	2,01	1,57	21	-
		2 mg/L	7,14	2,06	1,92	23	-
			7,37	2,06	2,00	23	-
		3 mg/L	7,13	2,05	1,71	23	-
			7,46	2,20	2,00	24	-
			7,46	1,85	2,00	21	-
ALF _{LSED}	2%	1 mg/L	7,46	1,73	1,55	20	9,10
			7,3	1,87	1,44	24	2,73
		2 mg/L	7,23	2,39	2,69	26	5,46
			7,46	1,68	1,88	20	6,37
		3 mg/L	7,48	1,56	2,00	21	6,37
			7,42	1,86	2,00	23	6,37
	5%	1 mg/L	7,2	2,32	2,52	27	10,92
			7,28	2,26	2,15	25	7,28
		2 mg/L	7,1	2,37	1,60	25	7,28
			7,49	1,97	2,00	23	10,01
		3 mg/L	7,45	2,07	2,15	21	7,28
			7,15	1,54	2,29	23	-
	8%	1 mg/L	7,31	2,11	3,00	25	10,92
			7,56	2,29	2,00	26	14,56
		2 mg/L	7,47	2,14	2,17	23	10,01
			7,39	2,11	1,99	24	10,01
		3 mg/L	7,31	2,03	1,78	25	7,28
			7,33	2,29	2,2	24	11,83

LEGENDA: D_{HCA} - dose de coagulante.

Dados da AB: pH 7,44; turbidez 2,17 unT; SST 2,75 mg/L; cor 23,28 uH

Tabela 11 - Resultados dos ensaios em jarreste na fase 2

ALF	%	D _{HCA}	pH	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Cor (uH)	Clorofila (µf/L)
ALF _B	2%	4 mg/L	7,44	1,56	1,08	16	-
			7,3	1,02	0,81	10	-
		6 mg/L	7,67	0,77	0,49	8	-
			7,39	0,52	0,7	8	-
		8 mg/L	7,59	0,64	1,1	7	-
			7,58	0,38	0,28	5	-
	5%	4 mg/L	7,62	1,30	1,09	12	-
			7,45	0,99	2,26	10	-
		6 mg/L	7,48	0,86	0,47	5	-
			7,63	0,72	0,6	8	-
		8 mg/L	7,37	0,95	0,55	9	-
			7,29	0,81	0,76	9	-
	8%	4 mg/L	7,61	1,25	0,37	13	-
			7,58	0,85	0,4	9	-
		6 mg/L	7,33	1,28	1,47	11	-
			7,28	0,94	0,65	10	-
		8 mg/L	7,56	0,72	0,72	7	-
			7,4	0,81	0,4	10	-
ALF _{DEC}	2%	4 mg/L	7,56	0,99	1,19	11	-
			7,42	1,14	0,6	12	-
		6 mg/L	7,26	0,85	0,59	9	-
			7,24	0,77	0,49	9	-
		8 mg/L	7,57	0,58	0,8	6	-
			7,42	0,54	0,2	7	-
	5%	4 mg/L	7,27	1,10	0,89	15	-
			7,26	1,56	0,56	19	-
		6 mg/L	7,68	0,70	0,9	8	-
			7,43	0,76	0,2	9	-
		8 mg/L	7,53	0,67	0,14	7	-
			7,38	0,56	0,1	6	-
	8%	4 mg/L	7,6	1,02	0,75	12	-

ALF	%	D _{HCA}	pH	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Cor (uH)	Clorofila (µf/L)
			7,37	1,17	0,7	13	-
		6 mg/L	7,49	0,98	0,58	9	-
			7,37	0,69	0,2	9	-
		8 mg/L	7,32	0,79	0,56	10	-
			7,29	0,61	1,12	7	-
ALF _{LSED}	2%	4 mg/L	7,58	1,06	1,15	12	0,91
			7,37	0,77	0,4	10	1,82
		6 mg/L	7,56	0,80	1,55	8	0,91
			7,61	0,69	0,56	8	-
		8 mg/L	7,47	1,58	1,18	10	0,00
			7,26	0,79	0,25	8	9,10
	5%	4 mg/L	7,51	1,32	1,5	13	6,37
			7,42	1,21	0,98	12	1,82
		6 mg/L	7,37	0,98	0,94	11	-
			7,29	1,49	1,2	13	40,04
		8 mg/L	7,62	0,52	0,88	5	1,82
			7,41	0,54	0,5	7	5,46
	8%	4 mg/L	7,44	2,15	1,95	19	-
			7,27	2,63	0,62	19	3,64
		6 mg/L	7,64	0,89	1,05	9	1,82
			7,47	0,68	0,59	6	0,91
		8 mg/L	7,53	0,82	1,24	7	3,64
			7,6	0,64	0,8	7	-

LEGENDA: D_{HCA} - dose de coagulante

Dados da AB: pH 7,41; turbidez 1,67 unT; SST 1,75 mg/L; cor 22,95 uH

Tabela 12 - Resultados dos ensaios em jarreste na fase 3

ALF	%	D _{HCA}	pH	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Cor (uH)	Clorofila (µf/L)
ALF _B	2%	4 mg/L	7,71	0,98	1,20	12	-
			7,58	1,11	0,90	13	-
		6 mg/L	7,57	0,79	1,10	9	-
			7,75	0,94	0,70	11	-
		8 mg/L	7,49	0,54	0,80	8	-
			7,81	0,89	1,50	8	-
	5%	4 mg/L	7,63	1,08	1,30	13	-
			7,84	1,28	1,30	13	-
		6 mg/L	7,51	0,59	0,31	7	-
			7,75	0,80	1,50	11	-
		8 mg/L	7,59	0,47	0,60	7	-
			7,78	0,51	0,90	6	-
	8%	4 mg/L	7,67	1,16	0,87	13	-
			7,76	1,36	1,60	14	-
		6 mg/L	7,54	0,84	0,60	10	-
			7,61	1,03	0,90	10	-
		8 mg/L	7,54	0,57	0,60	7	-
			7,58	0,59	0,60	8	-
ALF _{DEC}	2%	4 mg/L	7,86	1,26	1,10	14	-
			7,51	1,34	1,10	13	-
		6 mg/L	7,44	0,62	2,50	9	-
			7,59	0,97	0,90	11	-
		8 mg/L	7,58	0,43	0,7	7	-
			7,51	0,52	0,70	8	-
	5%	4 mg/L	7,58	1,30	1,10	14	-
			7,58	1,54	1,30	16	-
		6 mg/L	7,6	0,62	0,90	9	-
			7,68	0,98	1,00	13	-
		8 mg/L	7,59	0,42	0,28	6	-
			7,82	0,83	0,90	8	-
	8%	4 mg/L	7,64	1,11	0,80	13	-

ALF	%	D _{HCA}	pH	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Cor (uH)	Clorofila (µf/L)
			7,79	1,38	1,10	13	-
		6 mg/L	7,54	0,80	0,44	8	-
			7,8	0,86	1,60	12	-
		8 mg/L	7,57	0,61	0,40	6	-
			7,54	0,66	0,40	5	-
ALF _{LSED}	2%	4 mg/L	7,71	1,26	2,10	14	0,91
			7,6	1,29	0,70	14	10,01
		6 mg/L	7,79	0,92	1,20	11	0,91
			7,69	0,96	0,80	11	0,91
		8 mg/L	7,7	0,52	1,90	6	3,64
			7,56	0,58	0,30	7	0,91
	5%	4 mg/L	7,55	1,35	0,78	12	5,46
			7,78	1,70	1,50	17	1,82
		6 mg/L	7,58	0,91	0,90	10	2,73
			7,49	0,94	2,00	10	0,91
		8 mg/L	7,6	0,58	1,2	8	0,91
			7,73	0,90	0,80	8	1,82
	8%	4 mg/L	7,44	1,52	1,90	14	1,82
			7,55	1,68	1,60	15	5,46
		6 mg/L	7,85	1,08	1,20	10	2,73
			7,69	1,16	0,90	11	4,55
		8 mg/L	7,52	0,74	0,36	6	1,82
			7,76	0,80	1,40	9	-

LEGENDA: D_{HCA} - dose de coagulante

Dados da AB: pH 7,66; turbidez 1,5 unT; SST 1,3 mg/L; cor 21,69 uH

Tabela 13 - Resultados dos ensaios em jarteste na fase 4

%	D _{HCA}	T _{OXI}	D _{OXI}	pH	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Cor (uH)
0	6 mg/L	5 min	1 mg/L	7,4	0,5	0,10	5
				7,43	1,3	0,70	10
			2 mg/L	7,41	0,53	0,30	7
				7,49	0,5	0,40	6
		10 min	1 mg/L	7,45	0,8	0,40	9
				7,46	0,72	0,30	8
			2 mg/L	7,4	0,7	0,10	6
				7,4	0,54	0,10	7
	8 mg/L	5 min	1 mg/L	7,47	0,50	0,20	8
				7,43	0,77	0,50	5
			2 mg/L	7,45	0,67	0,30	7
				7,45	0,54	0,33	5
		10 min	1 mg/L	7,41	0,53	0,30	4
				7,4	0,67	0,50	6
			2 mg/L	7,4	0,38	0,10	5
				7,51	0,41	0,60	6
5	6 mg/L	5 min	1 mg/L	7,7	0,93	0,70	12
				7,68	0,96	0,80	10
			2 mg/L	7,74	0,86	0,30	12
				7,55	1,09	0,90	11
		10 min	1 mg/L	7,67	1,06	2,90	11
				7,64	0,92	1,70	10
			2 mg/L	7,65	0,93	1,60	13
				7,78	0,93	1,30	11
	8 mg/L	5 min	1 mg/L	7,69	0,67	0,40	7
				7,48	0,63	1,00	6
			2 mg/L	7,86	0,78	0,60	9
				7,88	0,71	0,80	6
		10 min	1 mg/L	7,67	0,69	0,70	9
				7,64	0,89	1,70	10
			2 mg/L	7,86	0,55	0,10	7
				7,79	0,61	0,20	6

LEGENDA: T_{OXI} – tempo de oxidação; D_{OXI} - dose de oxidante; D_{HCA} - dose de coagulante.

Dados da AB: pH 7,40; turbidez 1,68 unT; SST 1,60 mg/L; cor 20,95 uH

Tabela 14 - Resultados dos ensaios em jarteste na fase 5

%	D _{HCA}	T _{OXI}	D _{OXI}	pH	Turbidez	SST	Cor
0	6 mg/L	5 min	1 mg/L	7,4	0,5	0,10	5
				7,43	1,3	0,70	10
			2 mg/L	7,41	0,53	0,30	7
				7,49	0,5	0,40	6
		10 min	1 mg/L	7,45	0,8	0,40	9
				7,4	0,54	0,10	7
			2 mg/L	7,46	0,72	0,30	8
				7,4	0,7	0,10	6
	8 mg/L	5 min	1 mg/L	7,45	0,67	0,30	7
				7,45	0,54	0,33	5
			2 mg/L	7,47	0,50	0,20	8
				7,43	0,77	0,50	5
		10 min	1 mg/L	7,4	0,38	0,10	5
				7,51	0,41	0,60	6
			2 mg/L	7,41	0,53	0,30	4
				7,4	0,67	0,50	6
5	6 mg/L	5 min	1 mg/L	7,45	0,75	1,20	11
				7,44	1,17	1,10	12
			2 mg/L	7,46	1,03	1,00	11
				7,48	1,1	0,90	9
		10 min	1 mg/L	7,67	1,17	1,00	10
				7,77	1,29	0,10	12
			2 mg/L	7,68	0,65	0,50	8
				7,69	0,86	1,20	9
	8 mg/L	5 min	1 mg/L	7,49	0,71	0,50	7
				7,49	0,83	1,20	8
			2 mg/L	7,44	1,27	0,90	13
				7,58	0,86	1,10	8
		10 min	1 mg/L	7,64	0,82	0,30	8
				7,39	0,7	0,60	8
			2 mg/L	7,64	0,71	0,70	6
				7,74	0,66	0,30	7

LEGENDA: T_{OXI} – tempo de oxidação; D_{OXI} - dose de oxidante; D_{HCA} - dose de coagulante.

Dados da AB: pH 7,54; turbidez 1,53 unT; SST 1,10 mg/L; cor 21,43 uH