

I-340 - AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL EM ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO POR FILTRAÇÃO DIRETA ASCENDENTE VISANDO À REMOÇÃO DE PRECURSORES DE SUBPRODUTOS DA DESINFECÇÃO

Marlon Vieira de Lima⁽¹⁾

Licenciado em Química pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Professor do IFCE e Químico da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece).

Rita Mickaela Barros de Andrade⁽²⁾

Química Industrial pela Universidade Federal de Ceará (UFC). Mestre em Química Analítica pela universidade de São Paulo (USP). Doutora em Química Analítica pela universidade de São Paulo (USP). Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

Manoel do Vale Sales⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande. Doutor em Engenharia Civil/Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Engenheiro da Companhia de água e Esgoto do Ceará (Cagece)

Endereço⁽¹⁾: Rua Goiás, 1466 – Demócrito Rocha - Fortaleza - CE - CEP: 60.440-085 - Brasil - Tel: (85) 3101-1895 - e-mail: marlon.vieira@cagece.com.br

RESUMO

Desde sua introdução, no início do século XX, a cloração tem sido muito eficiente para promover a segurança bacteriológica de águas destinadas ao abastecimento público. Entretanto, na década de 1970, alguns estudos produziram evidências de que a interação do cloro com parte da matéria orgânica constituinte da água *in natura*, propicia a formação de substâncias potencialmente cancerígenas, denominadas de subprodutos da desinfecção (SPDs). Uma vez que a matéria orgânica natural é o principal fator que influencia a formação desses compostos, vários processos têm sido propostos para removê-la. Dentre as alternativas destaca-se a coagulação intensificada, delineada pela Environmental Protection Agency dos Estados Unidos da América (USEPA), que, em essência, consiste em aperfeiçoar o processo de coagulação de modo que, além da redução de turbidez, seja também possível maximizar a remoção de precursores. No presente trabalho procurou-se avaliar a remoção desses precursores por meio da coagulação seguida de filtração direta ascendente (FDA), tendo como referência a coagulação intensificada e como indicador de eficiência o carbono orgânico total (COT). Foi realizada uma comparação entre os coagulantes cloreto de polialumínio e cloreto férrico, quanto à remoção de COT, tendo sido constatado uma maior eficiência deste último na faixa de pH entre 5,0 e 6,5. Foi também estabelecida, por meio de testes de jarros, uma meta de remoção de COT, obtendo-se o valor de 48%, que serviu de referência para a FDA. Os resultados obtidos na ETA-Piloto ficaram aquém da meta estabelecida. Não obstante, representam uma melhoria significativa quando comparados com os valores atualmente obtidos em escala real por meio da filtração direta descendente.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de água, Desinfecção, Matéria orgânica, Subprodutos da desinfecção, Coagulação, Coagulação Aprimorada.

INTRODUÇÃO

A década de 1970 marcou o início das investigações sobre uma nova questão no âmbito do saneamento, relacionada à presença de certas substâncias potencialmente prejudiciais à saúde humana em águas destinadas ao abastecimento público. Além dos já conhecidos organoclorados constituintes dos pesticidas, destacou-se uma classe de compostos químicos, denominada de subprodutos da desinfecção (SPD), cuja detecção e quantificação só se tornaram possíveis com o aperfeiçoamento de novas metodologias analíticas, como a cromatografia. Desde então, tais compostos têm demandado considerável preocupação para as autoridades sanitárias.

Os SPDs são constituídos de substâncias geradas pelas reações entre o agente desinfetante utilizado no tratamento e a matéria orgânica natural (MON) presente na água bruta. Dentre esses compostos, dois grupos de substâncias formadas quando se emprega o cloro como desinfetante têm merecido maior atenção: os trihalometanos (THMs) e os ácidos haloacéticos (AHAs).

Os THMs foram detectados em água potável pela primeira vez em 1974 por BELLAR et al nos EUA e por ROOK, na Holanda (MACÊDO, 2001). Pesquisas realizadas por BELLAR et al. (1974), BUN et al. (1975), STEVENS et al (1976), BALSTER e BORZELLECA (1982), MELNICK (1987) e MELNICK (1989), trouxeram à luz evidências da existência da correlação entre água clorada contendo THM e alguns tipos de câncer.

Um estudo posterior publicado pela Environmental Protection Agency dos Estados Unidos da América (USEPA) (JOHNSON e JENSEN, 1983), levou à fixação de valores limites para estes contaminantes em vários países. Desde então, as concentrações de alguns SPDs passaram a ser reguladas pelos órgãos encarregados de estabelecer e/ou fiscalizar o padrão de potabilidade das águas destinadas ao abastecimento público.

No Brasil, os THMs passaram a integrar o padrão de potabilidade somente em 1990, por meio da Portaria 36/90/GM, que em consonância com a Organização Mundial de Saúde (OMS) fixou seu teor máximo em 0,1 mg/L. Posteriormente, as revisões previstas no citado documento, que resultaram nas Portarias 1469/2000/MS e 518/2005/MS do Ministério da Saúde, ratificaram esse limite como valor máximo permitido (VMP), inclusive a versão atual, Portaria nº 2914/2011/MS, publicada em dezembro de 2011, que além disso, acrescentou os AHAs com VMP de 0,8 mg/L.

Historicamente, a moderna tecnologia de tratamento de água para consumo humano, desenvolvida a partir do final do século XIX, tem obtido êxito em promover a clarificação, bem como a eliminação de patógenos através de processos e operações que incluem a coagulação, floculação, decantação (ou flotação), filtração e desinfecção. Nessa perspectiva, o tratamento de águas de abastecimento sempre foi conduzido de modo que fossem atingidos os propósitos de remoção de material particulado e cor aparente, com produção de uma água final segura do ponto de vista microbiológico (FEREIRA FILHO, 2001). Por outro lado, foi essa mesma tecnologia que propiciou o aparecimento dos SPDs.

Assim, a constatação da existência de substâncias prejudiciais à saúde, produzidas pela reação do cloro com determinadas estruturas orgânicas, chamadas precursoras, constituintes da MON presente na água *in natura*, contribuiu substancialmente para que o processo tradicional de potabilização de água tivesse que ser reavaliado, de forma a incorporar novas metas, tanto para o projeto como para operação das estações de tratamento de água (ETAs) e sistemas de distribuição de água potável, colaborando desta forma para a melhoria do padrão de qualidade da água fornecida às populações.

Dentre os esforços envidados no sentido de contemplar essa necessidade, destaca-se o manual da USEPA, referente à aplicação da técnica denominada de *Enhanced Coagulation* (coagulação aprimorada), que pode ser definida como a “otimização do processo de coagulação visando à remoção de precursores de SPD em uma planta convencional de tratamento de água” (USEPA, 1999).

Segundo o referido manual, a remoção da MON em processos de tratamento de água por meio da coagulação pode ser viabilizada tanto através de ensaios de laboratório (testes de bancada), como em plantas-piloto, sendo o carbono orgânico total (COT) o indicador mais empregado para avaliar a eficiência de remoção da MON, e, por conseguinte de precursores dos SPDs, obtendo-se assim uma ampla gama de respostas ao tratamento com coagulantes, principalmente à base de alumínio e de ferro.

No presente trabalho, procurou-se desenvolver um procedimento análogo à coagulação aprimorada, visando também à maximização da remoção de precursores de SPD, tendo como sistema de estudo uma planta-piloto de filtração direta ascendente.

A premissa considerada para realização desta pesquisa baseia-se principalmente no estado atual de degradação de nossos mananciais, decorrente do acelerado processo de eutrofização. O horizonte que se vislumbra é a possibilidade de apresentar uma contribuição relevante para a melhoria das ETAs operadas pela Companhia de

Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), que em sua maioria exibem a configuração de Filtração Direta (FD), especialmente os dois sistemas produtores que abastecem a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), ETA-Oeste (recentemente inaugurada) e ETA-Gavião, que juntas atendem a uma população de aproximadamente 2.700.000 habitantes.

No que tange à ETA-Oeste, cujo projeto contempla a Dupla Filtração, o presente trabalho encerra uma estratégia de otimização do processo, mais especificamente da filtração ascendente. Já com realação à ETA-Gavião, a Filtração Direta Descendente (FDD), que há anos vem funcionando com considerável eficiência, já não se apresenta mais com a mesma robustez, requisitando em curto prazo uma revisão de todo o processo de tratamento. Assim, espera-se que os resultados obtidos nessa pesquisa possam servir de subsídio ao projeto de atualização da tecnologia da referida estação.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada tendo como fonte de água *in natura* o açude gavião, localizado no município de Pacatuba-Ce. O manancial, cuja capacidade é 33 milhões de metros cúbicos, supre as duas unidades produtoras de água potável da Cagece que abastecem a RMF: ETA-Gavião, cuja vazão é 8 m³/s, opera com filtração direta descendente (FDD) e a ETA-Oeste, projetada para dupla filtração (DF) com vazão de 0,85 m³/s.

A água bruta captada no açude Gavião exibe características bem peculiares, dentre as quais destacamos os acentuados valores de pH, alcalinidade, dureza, cloretos cor aparente e COT. As amplitudes de variação ao longo de um ano das principais características que serviram de base para a presente pesquisa estão relacionadas na tabela 1.

Tabela 1: Características da água do açude Gavião.

	pH	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Dureza total (mgCaCO ₃ /L)	Cloreto (mg Cl ⁻ /L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	COT (mg C/L)
Mínimo	7,5	80	80	90	4,7	40	9,0
Máximo	8,5	120	140	180	8,2	50	11,0
Médio	8,0	110	132	130	6,4	40	9,5

A investigação experimental relativa a essa pesquisa envolveu as seguintes etapas:

- Primeira Etapa - Comparação entre cloreto férrico e cloreto de polialumínio (PAC) quanto à eficiência para remoção de COT.
- Segunda Etapa – Estabelecimento da meta de remoção de acordo o guia da USEPA
- Terceira Etapa – Ensaio em ETA-piloto visando atingir a meta estabelecida.

PRIMEIRA ETAPA - COMPARAÇÃO ENTRE PAC e FeCl₃

A primeira etapa da pesquisa consistiu em avaliar, por meio de teste de jarros, o desempenho quanto à remoção de COT de dois coagulantes amplamente empregados em tratamento de água: cloreto de polialumínio (PAC) e cloreto férrico (FeCl₃.6H₂O). A tabela 2 contém as principais informações relativas a esses dois produtos.

Tabela 2: Características do PAC e FeCl₃.

PAC-23	Marca ALUCLOR, fórmula Al ₂ (OH) _{4,5} Cl _{1,5} , massa específica 1,310 g/mL (20 °C), 23% de Al ₂ O ₃ , 19% de OH ⁻ , estado líquido.
Cloreto férrico	Marca VETEC, fórmula FeCl ₃ .6H ₂ O, PA (pureza 99±2%), estado sólido.

Os ensaios foram realizados em um aparelho de teste de jarros, marca Nova Ética, modelo 218 MDB.

O procedimento consistiu em aplicar, em ensaios distintos, dosagens crescentes dos respectivos coagulantes em diferentes valores do pH, ajustados por adição de ácido sulfúrico grau analítico (PA) (pureza de 98% em massa, densidade 1,84g/mL, marca VETEC) e coletar as amostras para medição do COT remanescente logo após o término do tempo de sedimentação. Os parâmetros operacionais aplicados nos dois ensaios estão especificados na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros operacionais do teste de jarros.

Mistura Rápida (coagulação)	Rotação: 120 rpm – tempo de mistura: 3 min
Mistura Lenta (floculação)	Rotação: 20 rpm – tempo de floculação: 10 min
Decantação	Tempo de sedimentação: 3,5 min Taxa de aplicação superficial = 28,8 m ³ /m ² /dia Velocidade de sedimentação = 2cm/min Tempo de sedimentação = 3,5 min

SEGUNDA ETAPA – ESTABELECIMENTO DA META DE REMOÇÃO DE COT

Uma vez definido qual coagulante apresentou melhor desempenho para a água em estudo, foi procedida a segunda etapa da pesquisa que consistiu na aplicação do protocolo estabelecido no “passo 2” do guia da USEPA.

Em um novo teste de jarros, foram adicionados à água em estudo incrementos de 9,0 mg/L de cloreto férrico (dosagem equivalente a 10 mg/L de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, adotado como referência pelo guia, conforme a tabela 10), até um máximo de 162 mg/L, sendo o pH final devido somente à hidrólise do cloreto férrico, ou seja sem adição de ácido. Os parâmetros operacionais foram os mesmos aplicados na primeira etapa. Da mesma forma, foram coletadas amostras 3,5 min após o término da mistura lenta para medição do COT remanescente. Em seguida, com base nos resultados obtidos, foi construída a curva de dosagem de $FeCl_3$ versus COT remanescente, a partir da qual foi possível estabelecer a meta de remoção de COT.

TERCEIRA ETAPA - ENSAIOS EM ETA-PILOTO VISANDO ATINGIR A META DE REMOÇÃO DE COT

Estabelecida a meta de remoção de COT, e, tendo em vista o objetivo de atingir a referida meta por meio de coagulação seguida de filtração direta ascendente, foram procedidos ensaios em uma ETA-Piloto, cujo esquema é apresentado na figura 1, mediante as seguintes condições:

- Coagulante: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$
- Mecanismo predominante: adsorção-neutralização de cargas
- Adição de polímero catiônico (Policloreto de dialildimetilamônio - PoliDADMAC)
- Faixa de pH: 5,0 a 6,5, ajustado com ácido nítrico comercial (50% de pureza, densidade 1,44 g/ml, marca PLURIQUÍMICA).

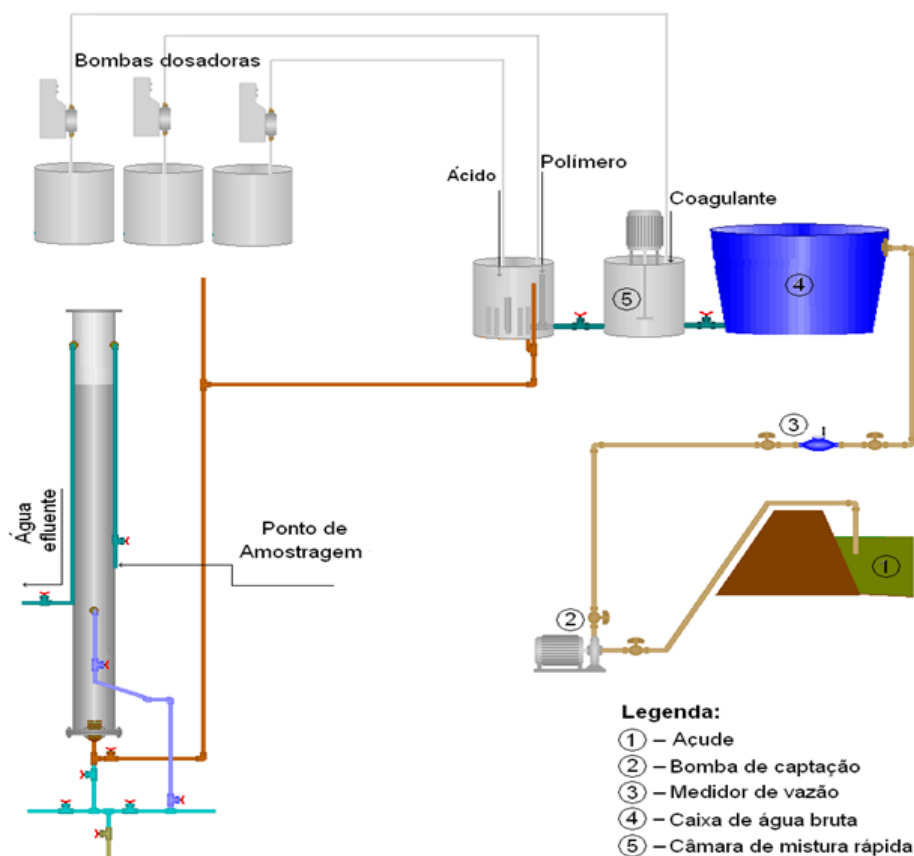


Figura 1: Esquema da ETA-Piloto.

Os parâmetros operacionais aplicados na ETA-Piloto estão relacionados na tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros operacionais da ETA-Piloto

Vazão da ETA Piloto	300 L/h
Vazão inicial no Filtro (Q_F)	240 L/h
Taxa de Filtração (T_F)	186 m ³ /m ² /dia
Carreira de filtração	3h

Foram testadas quatro combinações de dosagens de coagulante e polímero catiônico, especificadas na tabela 5. Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), com o intuito de averiguar a influência das variáveis controladas (dosagem de $FeCl_3$ e dosagem de polímero catiônico) na resposta final obtida (remoção de COT).

Tabela 5: Combinações de dosagens de coagulante e polímero

Ensaio	Dosagens	
	$FeCl_3$	Polímero
1	10	1
2	10	2
3	20	1
4	20	2

MEDIÇÕES ANALÍTICAS

As medições analíticas foram realizadas no laboratório do centro de pesquisa em água da Coordenadoria de Pesquisa e Desenvolvimento (COPEDE) da Cagece e no laboratório de processos da ETA-Gavião, estando todas de acordo com a 22ª edição do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. As referências metodológicas estão apresentadas na tabela 6.

Tabela 6: Referências metodológicas das análises

Parâmetro	Método
pH	Eletrométrico (4500-H ⁺)
Cor Aparente	Comparação visual (2120 B)
Turbidez	Nefelométrico (2130 B)
Alcalinidade	Titulométrico (2230 B)
Carbono Orgânico Total (COT)	Combustão/IV (5310 B)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

PRIMEIRA ETAPA - COMPARAÇÃO ENTRE CLORETO FÉRRICO E POLICLORETO DE ALUMÍNIO QUANTO À EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE COT.

Os testes de jarros realizados com FeCl₃ e PAC, permitiram avaliar a extensão da remoção de COT pela ação desses dois coagulantes. A tabela 7 contém os valores de percentagem de remoção referentes às combinações de dosagem e pH aplicadas no ensaio com cloreto férrico.

Tabela 7: % Remoção de COT - FeCl₃

pH						
Dosagem	4,5	5	5,5	6	6,5	7
25	26,41	38,81	28,53	14,53	13,15	14,53
30	35,21	39,77	21,74	18,77	18,77	14,85
35	36,90	42,74	28,42	17,82	17,82	16,33
40	42,71	43,19	40,72	27,17	27,17	17,89

Analogamente, a tabela 8 exibe os resultados referentes ao ensaio com PAC.

Tabela 8: % Remoção de COT – PAC

pH						
Dosagem	4,5	5	5,5	6	6,5	7
25	8,66	27,37	24,36	26,76	26,10	27,18
30	14,35	24,02	26,06	26,33	27,53	28,39
35	19,69	27,59	27,42	26,38	28,37	29,39
40	21,90	27,93	27,72	26,89	28,68	30,12

Visando a uma melhor visualização dos resultados, foram construídos gráficos tridimensionais referentes às respostas (percentagem de remoção de COT) obtidas com o cloreto férrico e com o PAC, conforme apresentado na figura 2.

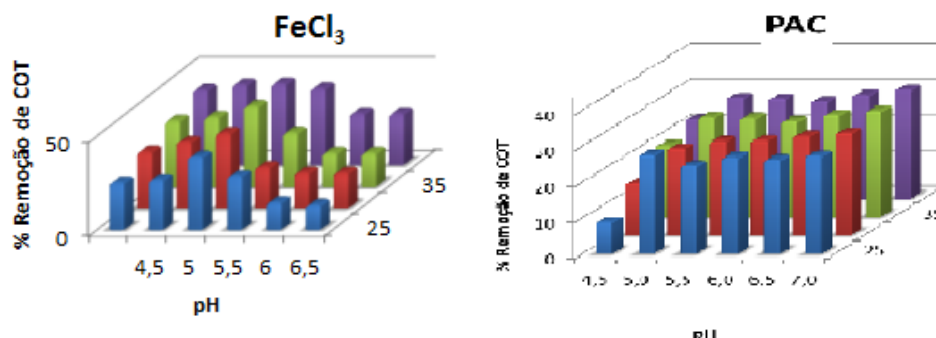


Figura 2: Remoção de COT

A análise dos gráficos permite inferir que o cloreto férrico apresentou melhor desempenho quanto à remoção de COT, exibindo valores de remoção superiores a 40%, notadamente na faixa de pH entre 4,5 e 6,0 e associado à dosagens mais elevadas (35 a 40 mg/L), sendo esse resultado, compatível com o aumento da capacidade de desestabilização das estruturas dos ácidos húmicos e fúlvicos por meio das interações do carbono orgânico dissolvido (COD) com os íons H⁺ e com os produtos de hidrólise do ferro.

Com respeito ao PAC, observa-se que os melhores resultados foram obtidos também a dosagens mais altas (35 a 40 mg/L) e na faixa de pH entre 5,0 e 7,0, que é normalmente a faixa ótima de desempenho desse produto. Essa constatação é corroborada pelo fato de serem exatamente essas as combinações de dosagem e pH mais favoráveis ao mecanismo de coagulação por varredura.

Assim, com base nos resultados verificados, elegemos o cloreto férrico o coagulante mais efetivo e, portanto, o mais adequado ao estabelecimento da meta de remoção de COT prevista no “passo 2” do guia da USEPA.

SEGUNDA ETAPA - ESTABELECIMENTO DA META DE REMOÇÃO DE COT

A aplicação do procedimento estabelecido no “passo 2” do guia da USEPA, gerou os dados apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Resultados dos testes de jarros

Dosagem De FeCl ₃ (mg/L)	COT remanescente (mg/L)	Redução De COT (mg/L)	Inclinação da curva	Remoção de COT %
0	9,54			
9	8,65	0,89	0,0887	9,05
18	8,27	0,39	0,0387	12,99
27	7,89	0,38	0,0376	16,82
36	7,53	0,36	0,0364	20,54
45	7,17	0,35	0,0353	24,14
54	6,83	0,34	0,0342	27,62
63	6,50	0,33	0,0330	30,99
72	6,18	0,32	0,0319	34,24
81	5,87	0,31	0,0308	37,38
90	5,58	0,30	0,0296	40,40
99	5,29	0,29	0,0285	43,30
108	5,02	0,27	0,0274	46,09
117	4,76	0,26	0,0262	48,77
126	4,50	0,25	0,0251	51,33
135	4,27	0,24	0,0240	53,77
144	4,04	0,23	0,0228	56,10
153	3,82	0,22	0,0217	58,31
162	3,61	0,21	0,0206	60,40

A partir dos resultados obtidos, foi possível traçar a curva dosagem de FeCl_3 versus COT remanescente apresentada na figura 4.

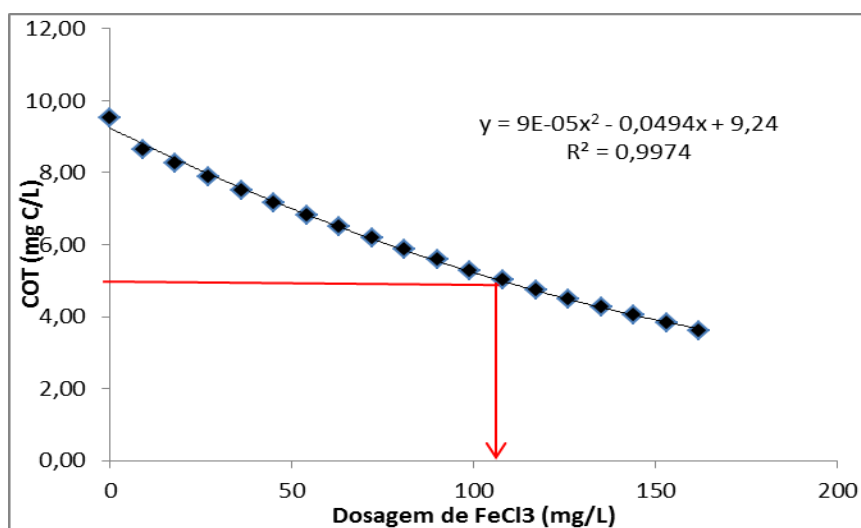


Figura 3: COT remanescente versus dosagem de cloreto férrico

Conforme se pode verificar no gráfico, o ajuste da curva dosagem versus COT remanescente originou a função polinomial $y = 9 \cdot 10^{-5} x^2 - 0,0494x + 9,24$, cuja derivada é $dy/dx = 1,8 \cdot 10^{-4} x - 0,0494$. Segundo o guia da USEPA, a meta de remoção é estabelecida exatamente no ponto em que a inclinação, dada pelo coeficiente angular da curva, muda de um valor maior que 0,03 (em módulo) para um valor menor que este. Assim, calculando-se a primeira derivada da curva e fazendo esta igual à -0,03 (o sinal negativo é devido à variação decrescente), encontra-se o ponto onde ocorre a mudança de inclinação estipulada, ou seja, substituindo-se $\frac{dy}{dx}$ por -0,03, ponto onde deve ocorrer a variação da inclinação associada ao estabelecimento da meta, e substituindo o valor de COT encontrado na equação que descreve a curva dosagem de FeCl_3 versus COT remanescente, constatamos que a meta de remoção corresponde à dosagem de 107,8 mg/L, que equivale a uma percentagem de remoção de COT igual a 48%, que constitui a meta a ser atingida na terceira etapa.

TERCEIRA ETAPA - ENSAIOS EM ETA-PILOTO PARA CONSECUÇÃO DA META DE REMOÇÃO DE COT

Os ensaios realizados na ETA-Piloto visando atingir a meta estabelecida na segunda etapa, produziram os resultados apresentados nas tabelas 10 a 13.

A partir dos resultados contidos nas referidas tabelas, foram construídos dois tipos de gráficos: variação do pH, turbidez e COT remanescente ao longo da carreira de filtração e percentual de remoção de COT ao longo da carreira de filtração.

As informações evidenciadas nos gráficos mencionados, apresentados nas figuras 4 a 11, permitiram estimar a extensão da remoção de COT e de precursores de SPD, bem como verificar o atingimento da meta de remoção de COT.

Tabela 10: Resultados do ensaio 1

Tempo (min)	Turbidez (uT)	pH	COT (mg/L)	Remoção de COT (%)
30	0,83	6,01	6,04	42,59
60	0,78	5,87	6,51	38,12
90	1,01	5,53	7,39	29,75
120	2,61	6,1	10,5	0,19
150	2,31	6,14	10,06	4,37
180	2,23	6,21	9,63	8,46
210	2,42	6,23	9,52	9,51
240	2,49	6,94	9,21	12,45
270	2,01	6,95	8,67	17,59
300	1,87	6,98	8,72	17,11
330	1,94	6,89	8,89	15,49
360	2,38	6,99	8,74	16,92

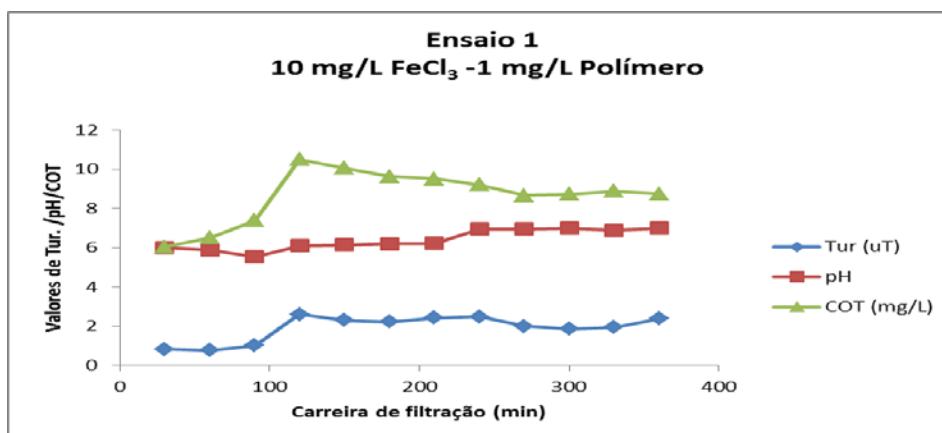


Figura 4: Ensaio 1 (10 mg/L FeCl₃ - 1 mg/L Polímero)

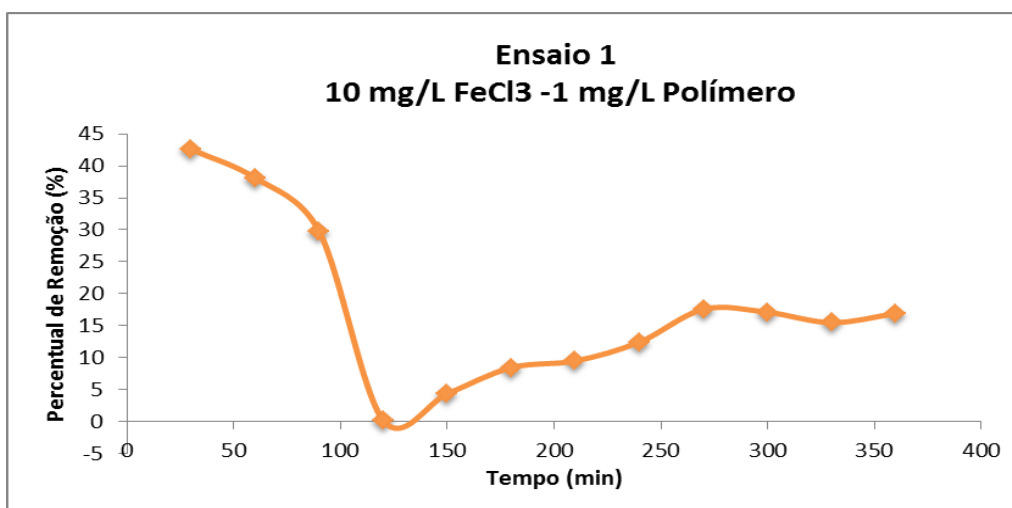


Figura 5: Percentual de remoção de COT – Ensaio 1

Tabela 11: Resultados do ensaio 2

Tempo (min)	Turbidez (uT)	pH	COT (mg/L)	Remoção de COT (%)
30	1,72	5,02	8,12	23,11
60	1,11	5,04	7,6	28,03
90	1,14	5,09	7,81	26,04
120	1,18	5,17	7,16	32,20
150	1	5,2	8,17	22,63
180	1,15	5,22	7,76	26,52
210	1,16	5,27	7,64	27,65
240	0,98	5,55	7,78	26,33
270	0,87	5,56	7,92	25,00
300	0,81	5,75	7,07	33,05
330	0,82	5,83	7,8	26,14
360	0,76	5,96	7,91	25,09

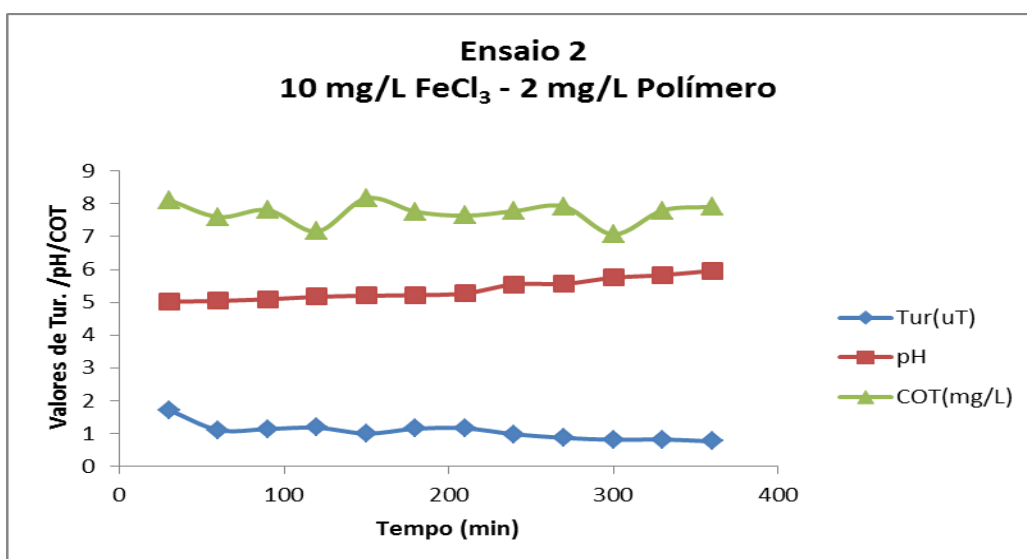


Figura 6: Ensaio 2 (10 mg/L FeCl₃ - 2 mg/L Polímero)

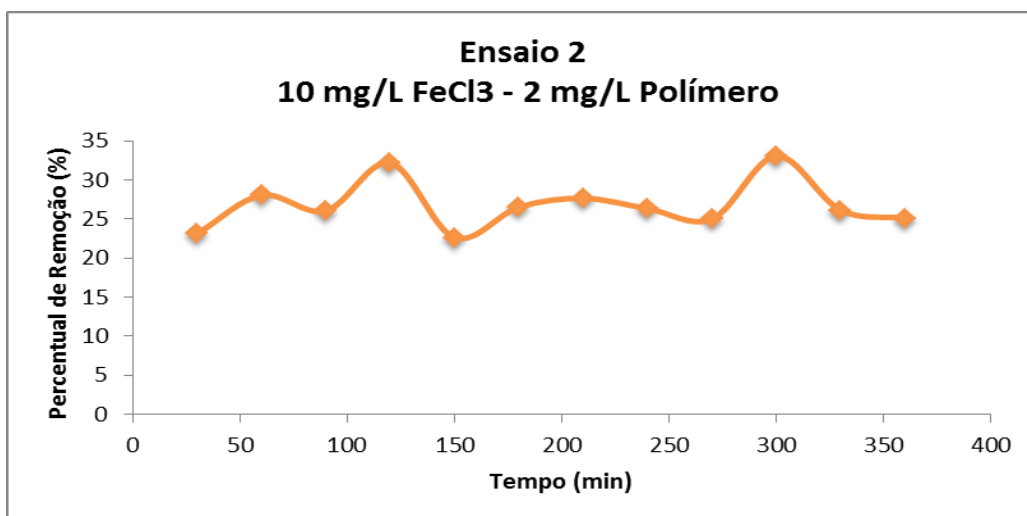


Figura 7: Percentual de remoção de COT – Ensaio 2

Tabela 12: Resultados do ensaio 3

Tempo (min)	Turbidez (uT)	pH	COT (mg/L)	Remoção de COT (%)
30	0,77	5,66	5,34	43,91
60	1,7	4,74	7,13	25,11
90	2,01	6,3	9,18	3,57
120	1,81	6,24	7,58	20,38
150	1,83	6,26	7,56	20,59
180	1,86	6,15	7,44	21,85
210	2,01	5,98	7,64	19,75
240	1,94	6,34	7,17	24,68
270	1,89	5,96	7,07	25,74
300	1,95	5,75	7,15	24,89
330	1,77	5,87	7,94	16,60
360	3,14	5,93	8,43	11,45

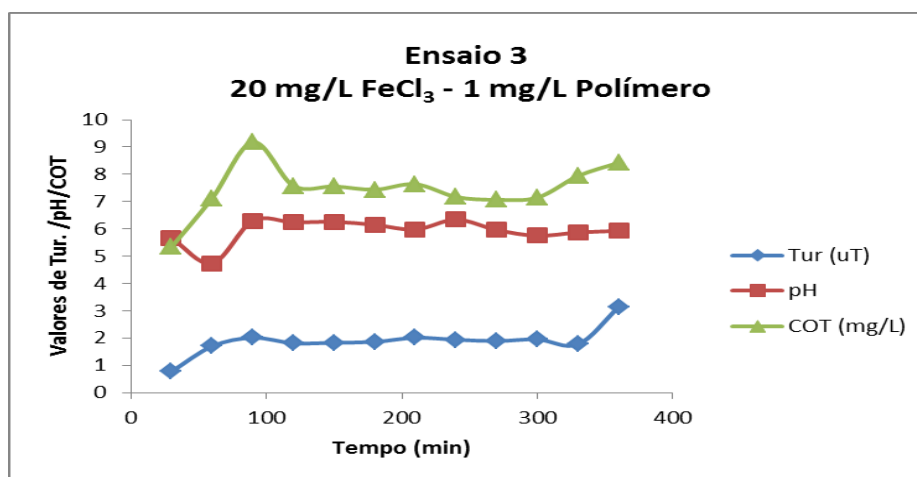


Figura 8: Ensaio 3 (20 mg/L FeCl₃ - 1 mg/L Polímero)

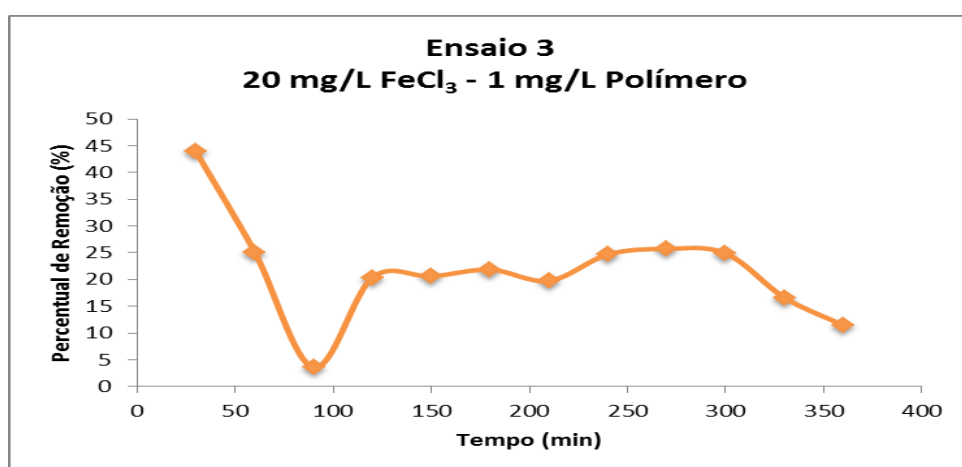


Figura 9: Percentual de remoção de COT – Ensaio 3

Tabela 13: Resultados do ensaio 4

Tempo (min)	Turbidez (uT)	pH	COT (mg/L)	Remoção de COT (%)
30	2,77	6,19	7,52	21,42
60	1,89	6,26	7,84	18,08
90	1,9	6,27	6,64	30,62
120	1,88	6,28	7,65	20,06
150	1,79	6,35	7,66	19,96
180	0,69	5,58	7,81	18,39
210	0,71	5,55	5,86	38,77
240	0,58	5,34	5,96	37,72
270	0,64	5,29	6,29	34,27
300	0,73	5,42	6,47	32,39
330	0,77	5,21	6,97	27,17
360	0,78	5,28	7,12	25,60

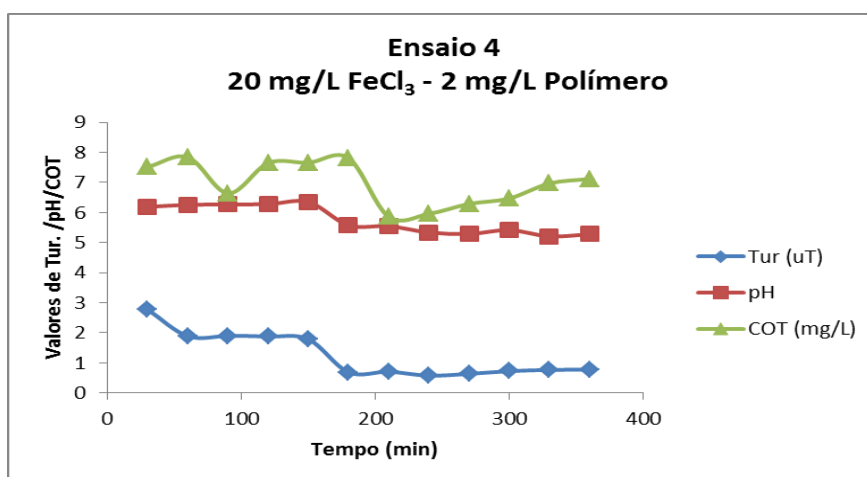


Figura 10: Ensaio 4 (20 mg/L FeCl₃ - 2 mg/L Polímero)

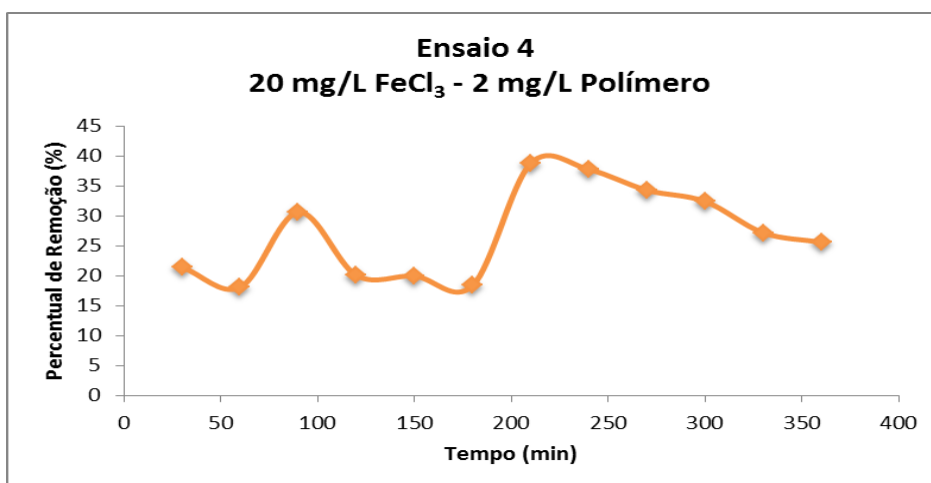


Figura 11: Percentual de remoção de COT – Ensaio 4

A análise dos gráficos permite constatar que a maior eficiência de remoção de COT (32, 39 a 38,77%) associada à menor turbidez (0,58 a 0,73 uT) foi obtida no ensaio 4, com dosagens mais elevadas, tanto de FeCl_3 como de polímero, onde os níveis de remoção de COT se situaram em torno de 36%, na faixa de pH entre 5,5 e 6,5.

A análise de variância (ANOVA) apresentada na tabela 14, revela que os dois fatores controlados (dosagem de FeCl_3 e de polímero), contribuem efetivamente para a remoção de COT, porém o polímero influencia menos. Tal efeito é, provavelmente, devido ao fato de que em virtude de sua natureza orgânica, o aumento da dosagem de polímero pode propiciar residuais que falseiam (aumentando) o COT remanescente.

Tabela 14: ANOVA de dois fatores para ensaios em filtro piloto

	Polímero	FeCl ₃	
		10	20
1		42,59	43,91
2		33,05	34,27

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
1	2	86,5	43,25	0,87
2	2	67,32	33,66	0,74
10	2	75,64	37,82	45,51
20	2	78,18	39,09	46,46

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	91,97	1	91,97	36787,2	0,00	161,45
Colunas	1,61	1	1,61	645,2	0,03	161,45
Erro	0,00	1	0,00			
Total	93,58	3				

CONCLUSÕES

Uma avaliação geral dos resultados obtidos nos permite emitir as seguintes conclusões:

- Com respeito à comparação entre os coagulantes selecionados, os testes de jarros definiram que o cloreto férrico apresenta melhor desempenho que o PAC, quanto à remoção de COT para a água em estudo, principalmente em pH mais baixo.
- A aplicação do procedimento descrito no “passo 2” do guia da USEPA revelou uma extensão de redução de COT bastante ampla, possibilitando até 60% de remoção com cloreto férrico, estabelecendo uma meta de 48% de remoção de COT para a água em estudo.
- As combinações de coagulante e polímero não produziram redução de COT maior ou pelo menos igual à meta estipulada. Os melhores resultados, obtidos no ensaio 4, giram em torno de 36%. Não obstante, esse valor é bastante significativo, correspondendo aproximadamente 75% da meta.
- Os valores pontuais destacados, especialmente os superiores a 35%, representam uma informação significativa em termos da possibilidade de aperfeiçoar o processo de forma que a meta possa ser atingida em curto prazo.

- Embora a meta não tenha sido atingida, o nível médio de remoção obtido (36%) no ensaio 4, comparado aos valores praticados atualmente em escala real nas ETAs Gavião e Oeste, representa uma melhoria significativa, o que torna a proposta desta pesquisa bastante promissora no que tange à atualização desses sistemas, especialmente a ETA-Gavião.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BALSTER, R. L., BORZELLECA, J. F. Behavioral toxicity of trihalomethane contaminants of drinking water in mice. *Environmental Health Perspectives*, v.46, p.127-136, 1982.
2. BELLAR, T. A., LICHTENBERG, J. J., KRONER, R. C. The occurrence of organohalides in chlorinated drinking waters. **Journal American Water Works Association**, v.66, n.12; p.703-706, Dec. 1974.
3. BRASIL. Portaria 2914, de 11 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil**. Brasília, 2011.
4. BUN, W. W., HASS, B. B., DEANE, E. R. et al. Formation of trihalomethanes by chlorination of surface water, *Environmental Letters*, v.10, n.3, p.205-213.1975.
5. JOHNSON, J. D., JENSEN, J. THM and toxicity formation – toutes, rates and precursors. In: **AWWA – SEMINAR PROCEEDINGS – STRATEGIES FOR THE CONTROL OF TRIHALOMETHANES**, 1983, Las Vegas: American Waters Works Association – AWWA, 1983. p.1-21.
6. FERREIRA FILHO, S. S. **Remoção de compostos orgânicos precursores de subprodutos da desinfecção e seu impacto na formação de trihalometanos em águas de abastecimento**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.6,n1 e 2, p. 53-60, junho 2001.
7. MACÊDO, J. A. B. Subprodutos do processo de desinfecção de água pelo uso de derivados clorados - disinfection byproducts. Juiz de Fora: DBP, 2001. 87p
8. MELNICK, R. L. **Toxicology and carcinogenesis studies or bromodichloromethane**. Washington, D. C.: U. S. Departament of Health and Human Services, 1987. 182p.
9. MELNICK, R. L. **Toxicology and carcinogenesis studies or tribromomethane (bromofórmio)**. Washington, D. C.: U. S. Departament of Health and Human Services, 1989. 194p.
10. STEVENS, A. A., SLOCUM, C. J., SEEGER, D. R., ROBECK, G. G., Clorination of organics in drinking water. *Journal American Water Works Association*, N.68, p.615-620, 1976.
11. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Enhanced Coagulation and Enhanced Precipitative Softening Guidance Manual**, 1999. Disponível em: <<http://www.epa.gov/safewater/mdbp/coaguide.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2013.