

**AValiação Qualitativa e Econômica da Aplicação de  
Diferentes Agentes Coagulantes em uma Estação de  
Tratamento de Esgoto Sanitário da Modalidade Reator de  
Leito Móvel com Biofilme (MBBR)**

**Diego Brunelli Ghisi**

Engenheiro Sanitarista na Companhia Águas de Joinville, atualmente na função de Coordenador de Tratamento de Efluentes. Engenheiro Sanitarista e Ambiental e Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

**Jaime Manoel Miranda Filho**

Técnico em Saneamento na Companhia Águas de Joinville. Técnico em Saneamento pelo Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

**Tiago de Oliveira Andrioli**

Técnico em Química na Companhia Águas de Joinville. Técnico em Química e Engenheiro Químico pela Universidade Sociedade Educacional de Santa Catarina (UniSociesc).

**Janine Smania Alano**

Engenheira Sanitarista na Companhia Águas de Joinville, atualmente na função de Gerente de Esgoto. Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

**Endereço:** Rua Quinze de Novembro, 3950 – Bairro Glória - Joinville – Santa Catarina - CEP: 89216-202 - Brasil - Tel: +55 (47) 2105-1600 - e-mail: diego.ghisi@aguasdejoinville.com.br.

**RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi comparar aspectos econômicos e relativos à eficiência quanto à substituição do sulfato de alumínio por policloreto de alumínio (PAC) como agente coagulante na ETE Morro do Amaral, cuja tecnologia empregada é MBBR (Reator de Leito Móvel com Biofilme), em Joinville, Santa Catarina. Por meio de testes de jarros, foram realizados testes com o próprio esgoto bruto da comunidade com ambas substâncias coagulantes, com mesmo gradiente de velocidade e tempo para sedimentação, em diferentes épocas dos anos 2018 e 2019. Os resultados em bancada indicaram que, para um resultado semelhante de turbidez remanescente, o consumo de PAC seria 25% menor em relação ao de sulfato de alumínio. Partiu-se, então, para sua aplicação em escala real. Foram comparados dois períodos semelhantes do ano, de julho de 2018 a fevereiro de 2018 (com  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) e de julho de 2019 a fevereiro de 2020 (com PAC). Constatou-se, então, que turbidez média remanescente no primeiro período foi de 25,2 UT e no segundo período foi igual a 17,0 UT, isto é, uma redução de 32,5%. Ainda, por meio de uma avaliação econômica, concluiu-se que houve uma redução média de R\$ 0,17 por metro cúbico de esgoto tratado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento de esgoto, MBBR, Coagulação.

**INTRODUÇÃO**

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, no ano de 2018, cerca de 46,8% dos brasileiros não tinham acesso a sistemas de coleta de esgoto e apenas 46,3% do esgoto gerado no Brasil era tratado. O acesso aos serviços de saneamento básico é condição necessária à dignidade da pessoa humana, e o acesso universal aos serviços de água e de esgoto é um objetivo legítimo das políticas públicas por possuir impactos importantes sobre a saúde, o ambiente e a cidadania (GALVÃO JÚNIOR, 2009).

A ETE Morro do Amaral emprega a modalidade de tratamento de MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactors*, ou Reator de Leito Móvel com Biofilme) seguido de decantação mediante aplicação automatizada de coagulante.

O processo MBBR tem como base a combinação de biomassa em suspensão e biomassa aderida (biofilme). O biofilme cresce em pequenos elementos suportes, os quais se movem livremente no meio reacional (ROGERS; ZHAN, 2003). Este processo de tratamento reúne as melhores características dos processos de lodos ativados incrementados às melhores características do processo com biofiltros, podendo ser empregado tanto para novas ETES, quanto de forma adaptada ao processo de lodos ativados de estações de tratamento existentes (RUSTEN et al., 2006).

Em contraponto ao processo de lodos ativados, o processo MBBR não utiliza a recirculação do lodo secundário para o reator biológico, exceto quando o sistema foi configurado para realizar a pré-desnitrificação (DOS REIS, 2007).

Devido à baixa concentração de sólidos que deixa o reator com o efluente tratado, as taxas de aplicação de sólidos para os decantadores são significativamente reduzidas quando comparadas as taxas do sistema de lodo ativado (FUJII, 2011). Esta característica também permite que sejam empregadas diferentes técnicas de separação sólido-líquido, não limitando o processo ao uso de decantadores convencionais (WATER ENVIRONMENT FEDERATION, 2011).

O sulfato de alumínio é comumente aplicado e estudado segundo duas fórmulas químicas:  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  (AGUIAR et al., 2005) e  $Al_2(SO_4)_3$  (CARLOS E. SANTO et al. 2012).

O Policloreto de Alumínio é um coagulante produzido num processo industrial, de fórmula química geral  $[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$  com  $1 \leq n \leq 5$ ,  $m \leq 5$  (CHATTERJEE et al., 2009). A fórmula química específica do Policloreto de Alumínio varia entre fornecedores, pelo que é importante ter em atenção os diferentes coagulantes de Policloreto de Alumínio disponíveis no mercado e a variação de cada espécie nos resultados, face à água específica a ser tratada.

Devido à sua localização geográfica ao nível do mar e proximidade com a Baía da Babitonga, Joinville sofre com a oscilação de maré e com os altos índices pluviométricos, o que potencializa a entrada de águas indesejáveis e não dimensionadas na rede coletora de efluente doméstico. Os principais pontos de entradas destas águas ocorrem pela interconexão das redes de drenagem e de esgoto, e ainda através das ligações domiciliares pluviais no sistema público de esgotamento sanitário. Estando a comunidade do Morro do Amaral em contato direto com esta baía, as oscilações de maré afetam diretamente na qualidade do esgoto a ser tratado na estação de tratamento, fator corroborado por resultados de sólidos dissolvidos totais acima de 5.000 mg/L no esgoto bruto.

Existem vários tipos de tratamento possíveis para clarificar e limpar o efluente de acordo com os padrões legislativos de descarga, em qualquer lado no Mundo. Desde o tipo biológico ao quimicamente assistido, existem diferentes opções que são selecionadas para cada estação de tratamento, de acordo com a área disponível e a necessária ao tratamento, caudal de esgoto recebido, necessidades de tratamento dependendo das características de entrada do efluente bruto, e recursos monetários disponíveis (METCALF & EDDY, 1991)

Devido à elevada concentração de material dissolvido e coloidal, tornou-se necessária a inserção do processo de mistura rápida, na ETE Morro do Amaral, com a adição de agente coagulante. Desta forma, potencializa-se a sedimentação dos sólidos no decantador secundário e asseguram-se os resultados de qualidade do efluente tratado.

A busca pela maior eficiência do tratamento de esgoto, assim como a otimização dos processos e redução dos custos operacionais, são aspectos centrais da operação desses sistemas. Na ETE Morro do Amaral, um dos processos unitários de alto impacto na qualidade do efluente tratado e nos custos de operação consiste na coagulação. Desde o início da aplicação de coagulação ao processo da ETE Morro do Amaral, utilizou-se solução de Sulfato de Alumínio. Diante dos custos envolvidos nesta etapa, a equipe de operação dos sistemas de tratamento de esgoto da Companhia Águas de Joinville realizou testes ao longo do ano de 2018 e 2019, em que foram comparados resultados e a viabilidade entre o uso do coagulante já empregado e o uso de policloreto de alumínio (PAC), também na forma líquida.

## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi comparar aspectos econômicos e relativos à eficiência quanto à substituição do sulfato de alumínio por policloreto de alumínio (PAC) como agente coagulante na ETE Morro do Amaral, cuja tecnologia empregada é MBBR (Reator de Leito Móvel com Biofilme), em Joinville, Santa Catarina.

## METODOLOGIA UTILIZADA

### Área de estudo

A comunidade Morro do Amaral, localizada a sudeste da cidade de Joinville, SC, é contemplada por sistema de esgotamento sanitário. Esse sistema consiste em uma rede de coleta e transporte de esgoto com extensão total de 3.582 m e uma estação de tratamento de esgoto, a ETE Morro do Amaral. A ETE Morro do Amaral é composta por uma unidade de tratamento primário, um reator biológico, uma etapa de decantação mediante aplicação automatizada de coagulante e, por fim, uma etapa de desinfecção. Sua vazão média de projeto e de operação na fase desse estudo é igual a 1,60 L/s.

A etapa de tratamento primário conta com o processo de sedimentação de sólidos suspensos e flotação de gorduras e óleos, ambos os processos realizados fisicamente, em um tanque de fibra de vidro. O efluente desta etapa é bombeado

ao reator biológico, o qual emprega a modalidade de tratamento de MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactors*, ou Reator de Leito Móvel com Biofilme). Neste tanque há a presença de biomédeas de polietileno com uma superfície específica de  $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , sendo que o tanque é preenchido com as mesmas em 50% do seu volume total. A figura 1 ilustra biomédeas empregadas na estação de tratamento em questão, inclusive com o biofilme que as envolvem. O sistema é aerado e homogeneizado permanentemente. Após a reação biológica, o líquido flui para dois vertedores, onde é aplicada solução de coagulante de forma automatizada, etapa ilustrada na figura 2. Há uma linha de aeração neste compartimento dos vertedores, de forma a promover a mistura e homogeneização do coagulante com o líquido. Em seguida, ocorre a sedimentação em um decantador de alta taxa, em formato retangular e com placas planas paralelas em uma inclinação de  $60^\circ$ . A reação biológica, a mistura rápida e a decantação ocorrem em um mesmo contêiner metálico, devidamente dividido entre tais etapas. Finalmente, o líquido clarificado flui para o tanque de contato, onde recebe aplicação de hipoclorito de sódio e é desinfetado antes do seu descarte no corpo receptor. O lodo sedimentado no decantador é bombeado ao sedimentador primário, unidade drenada e limpa periodicamente por serviço de hidrovácuo. A vista frontal da estação, contendo a indicação de suas unidades componentes, pode ser visualizada na figura 3.



**Figura 1: Biomédeas utilizadas no processo MBBR da ETE Morro do Amaral.**



**Figura 2: Mistura rápida, com aplicação de coagulante em vertedor triagular.**



**Figura 3: Vista frontal da Estação de Tratamento Morro do Amaral e indicação de suas unidades.**

Por meio de amostragens quinzenais por laboratório externo, ao longo do ano de 2018, foram amostrados o esgoto bruto e o líquido presente no reator biológico no ponto imediatamente anterior à aplicação do coagulante. Os parâmetros considerados para este estudo, os pontos de amostragem, assim como seus respectivos métodos de análise, estão dispostos na tabela 1.

**Tabela 1: Caracterização do esgoto bruto e amostras do reator ao longo de 2018.**

PARÂMETRO	MÉTODO DE ANÁLISE	ESGOTO BRUTO	REATOR (PRÉ-COAGULAÇÃO)
Cloretos	Íon Seletivo	X	
Condutividade	Potenciométrico	X	
DBO	Respirométrico	X	X
Sólidos Dissolvidos Totais	Gravimétrico	X	X
Sólidos Suspensos Totais	Gravimétrico	X	X

### Experimentos de Bancada

Os experimentos de bancada utilizando cada um dos dois coagulantes estudados foram realizados em equipamento de teste de jarros da marca Milan modelo JT303M/6, composto por jarros de volume igual a 2 L. Foi empregada a rotação de 100 rpm ( $80 \text{ s}^{-1}$ ) para a mistura. Utilizaram-se amostras do reator biológico, coletadas ao mesmo tempo, para os testes com sulfato de alumínio (50%) e PAC (18%). Após a aplicação da concentração de coagulante, variável em cada amostra, foi realizada a mistura rápida do coagulante por 20 segundos. Em seguida ao processo de mistura rápida, o gradiente de mistura foi reduzido para 60 rpm ( $40 \text{ s}^{-1}$ ) por 10 minutos, sendo então efetuada a aferição do pH de coagulação em cada um dos jarros. Após decantação de 10 minutos foram retiradas alíquotas de 50 ml de cada jarro para realização do ensaio de turbidez, sendo o ensaio realizado no equipamento da marca Policontrol modelo AP2000W.

### Experimentos em escala real

Após a definição da melhor dosagem de PAC para a área do estudo, por meio dos testes de bancada, partiu-se para sua aplicação em escala real, na estação de tratamento. O produto foi recebido na forma líquida, em solução a 18%. A equipe de operação efetuou a diluição do produto em água em um tanque de 400 L. A solução resultante foi transferida para o processo por meio do uso de bomba dosadora modelo EMEC FEC0110.

## RESULTADOS OBTIDOS

### Caracterização do esgoto bruto e amostras do reator biológico

Os resultados do monitoramento quinzenal do esgoto bruto e do líquido presente no reator biológico – anteriormente ao vertedor onde é dosado o coagulante, ao longo do ano de 2018, constam na tabela 2.

**Tabela 2: Resultados da caracterização do esgoto bruto e amostras do reator - previamente à coagulação - ao longo de 2018.**

PARÂMETRO	ESGOTO BRUTO	REATOR (PRÉ-COAGULAÇÃO)
Cloretos	183 ± 157,6	-
Condutividade	1192 ± 486,7	-
DBO	304,0 ± 130,4	220,0 ± 87,5
Sólidos Dissolvidos Totais	590,0 ± 262,6	705,4 ± 378,0
Sólidos Suspensos Totais	185,9 ± 114,5	364,5 ± 114,5

### Experimentos de Bancada

Os resultados dos testes de jarros, utilizando cada um dos coagulantes, constam nas tabelas 3 e 4.

**Tabela 3: Resultados do teste de jarros utilizando como coagulante o Sulfato de Alumínio.**

Sulfato de Alumínio	Branco	Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3	Jarro 4	Jarro 5	Jarro 6
Dosagem (mg/L)	0	20	40	60	80	100	120
pH inicial	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45
pH final	7,45	6,48	6,47	6,35	6,25	6,16	6,01
Turbidez final	70,4	53,3	26,1	18,6	17,4	17,1	16,7

**Tabela 4: Resultados do teste de jarros utilizando como coagulante o PAC.**

PAC	Branco	Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3	Jarro 4	Jarro 5	Jarro 6
Dosagem (mg/L)	0	20	40	60	80	100	120
pH inicial	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45
pH final	7,45	6,85	6,75	6,63	6,56	6,48	6,38
Turbidez final	70,4	13,3	11,3	11	11,1	10,7	10,7

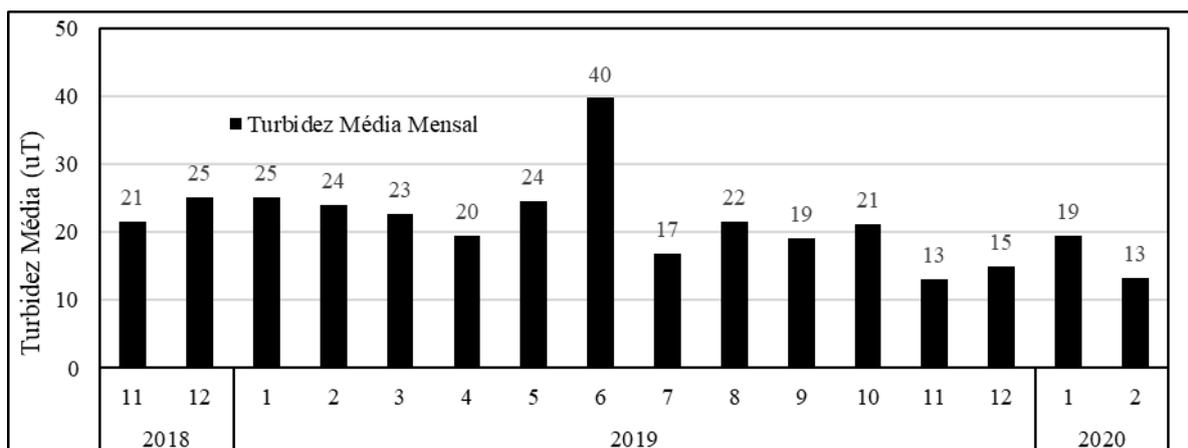
Ressalta-se que a amostra “Branco” permaneceu no modo sedimentação pelo mesmo período das demais amostras.

### Experimentos em escala real

Constatou-se, através de análises feitas em testes de jarros e tratamento estatístico, que a solução preparada com o produto recebido a ser aplicada na estação de tratamento passou de 30% para 50% de diluição. Após constatação da eficácia e viabilidade da utilização do PAC em escala experimental, iniciou-se a aplicação direta na estação.

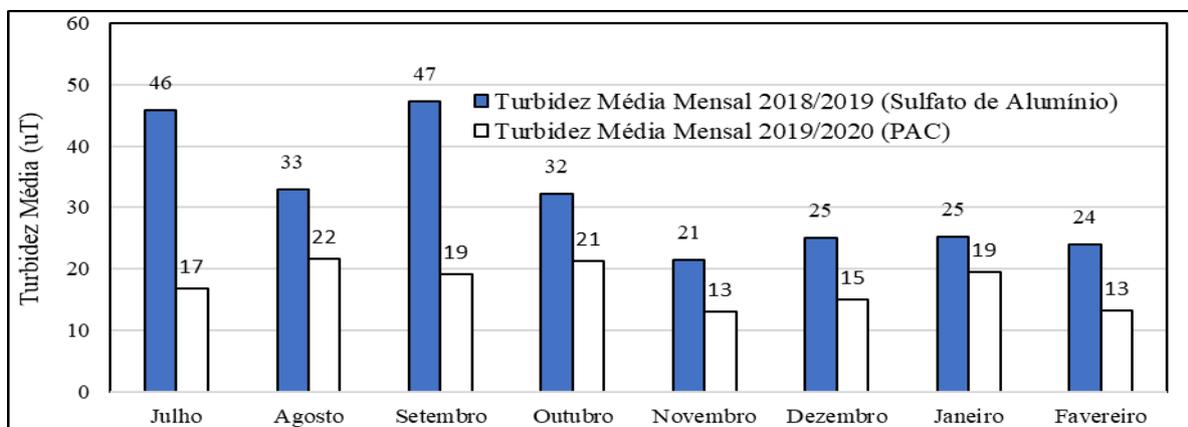
Com as informações obtidas nos ensaios de jar test, podem ser construídos diagramas de coagulação, nos quais os valores de dosagem de coagulante, pH de coagulação e eficiência de remoção de turbidez são plotados (RÔLA et al., 2016; DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Foi constatado que o resultado médio de turbidez no período do estudo em que se empregou Sulfato de Alumínio foi igual a 25,2 NTU, já com a utilização do PAC a turbidez média foi de 17 NTU, ou seja, 32,5% de redução. Os resultados podem ser visualizados na figura 4, em que se pode observar a redução da turbidez a partir do mês em que foi substituído o coagulante.



**Figura 4: Turbidez média mensal (em uT) de novembro de 2018 até fevereiro de 2020.**

Visando eliminar qualquer interferência de fatores sazonais, fez-se também uma comparação entre os mesmos meses, em período em que se dosava sulfato de alumínio, de julho de 2018 a fevereiro de 2019, e do período com dosagem de PAC, de julho de 2019 a fevereiro de 2020, e constatou-se que no período em que se utilizava sulfato de alumínio a turbidez média mensal era de 32 NTU, já com PAC a turbidez média mensal foi de 17 NTU. Uma redução de 46,9%.



**Figura 5: Turbidez média (em uT) comparando meses de julho 2018 a fevereiro de 2019 e julho 2019 a fevereiro de 2020.**

### Avaliação econômica

Com o intuito de avaliar o custo benefício da aplicação do PAC no processo de tratamento, foi realizada uma análise de custo simples atrelado à preparação do produto e volume tratado.

Considerando os custos diretamente envolvidos na aplicação dos diferentes coagulantes ETE Morro do Amaral, a utilização do PAC proporcionou uma economia média de R\$ 0,17 por m<sup>3</sup> de esgoto tratado, além de permitir aumentar o volume de esgoto recebido na ETE, conforme pode ser observado nas tabelas 5 e 6:

**Tabela 5: Dados Operacionais com Aplicação de Sulfato de Alumínio.**

MÊS	SULFATO (KG)	Valor (R\$/KG)	CUSTO (R\$)	CONSUMO DE ÁGUA (M <sup>3</sup> )	CUSTO RELATIVO (R\$/M <sup>3</sup> )	VOLUME TRATADO (M <sup>3</sup> )	CUSTO TOTAL POR M <sup>3</sup>
11/18	1220	0,82	1000,40	20	36,60	3310,5	0,52
12/18	2000	0,82	1640,00	21	36,60	3620,30	0,67
01/19	2000	0,82	1640,00	22	36,60	3463,80	0,71
02/19	1340	0,82	1098,8	17	36,60	3883,30	0,30
03/19	2660	0,82	2181,2	12	36,60	3979,00	0,56
04/19	1340	0,82	1098,8	10	36,60	3165,50	0,36
05/19	1340	0,82	1098,8	11	36,60	2727,20	0,42
06/19	1340	0,82	1098,8	10	36,60	2942,40	0,38
MÉDIA							0,49

**Tabela 6: Dados Operacionais com Aplicação de PAC.**

MÊS	SULFATO (KG)	Valor (R\$/KG)	CUSTO (R\$)	CONSUMO DE ÁGUA (M <sup>3</sup> )	CUSTO RELATIVO (R\$/M <sup>3</sup> )	VOLUME TRATADO (M <sup>3</sup> )	CUSTO TOTAL POR M <sup>3</sup>
07/19	650	1,58	1027,00	11	36,60	3139,20	0,34
08/19	650	1,58	1027,00	10	36,60	3920,20	0,27
09/19	350	1,58	553,00	12	36,60	4297,40	0,22
10/19	420	1,58	663,60	10	36,60	4304,80	0,24
11/19	1110	1,58	1753,80	12	36,60	4511,00	0,34
12/19	650	1,58	1027,00	14	36,60	4418,00	0,35
01/20	650	1,58	1027,00	15	36,60	3558,00	0,44
02/20	580	1,58	916,40	14	36,60	4316,90	0,33
MÉDIA							0,32

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram feitas comparações dos resultados obtidos entre esses produtos no aspecto técnico e econômico, no período de 2018 até fevereiro de 2020. Fazendo-se a média mensal das análises de turbidez, assim como a variação do consumo de produtos químicos e de água utilizada no processo de produção.

O custo médio operacional acumulado com a aplicação do PAC diminuiu R\$ 0,17 por m<sup>3</sup> de esgoto tratado, em relação à média do período analisado com aplicação de Sulfato de Alumínio. Isso representa uma economia de aproximadamente R\$ 3.200,00 desde o início da aplicação até fevereiro de 2020.

Analisando tecnicamente o PAC apresentou resultados melhores que o Sulfato de Alumínio com relação à qualidade do esgoto tratado, melhorando de forma significativa os níveis de turbidez.

Observou-se também uma redução na dosagem de coagulante, aumentando assim, a autonomia dos reservatórios, prolongando a capacidade de abastecimento e armazenagem.

Avaliando o processo verificou-se que com o uso do PAC era possível obter valores menores de turbidez e menor tempo de decantação, associados ao menor custo operacional. (RODRIGUES, 2014) constatou que a utilização de PAC como coagulante permitiu uma economia mensal de 57% em relação ao sulfato de alumínio, no tratamento de efluente têxtil.

Ramalho (2013) obteve resultados melhores quanto à remoção de turbidez com o uso de PAC em comparação à aplicação de sulfato de alumínio em seu estudo em uma estação de tratamento de esgoto sanitário.

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que, considerando-se os critérios técnicos e econômicos, o PAC se mostrou como coagulante mais adequado para o sistema de tratamento da ETE Morro do Amaral, em comparação ao sulfato de alumínio e no período analisado.

Posteriormente pretende-se realizar a análise de custo de forma a contemplar um período mais longo, eliminando a sazonalidade, bem como considerar a alteração na frequência de visitas operacionais por conta da maior estabilidade do processo de decantação, que se reflete em maior garantia da qualidade.

Fica como sugestão um novo estudo para avaliar o aumento do pH visando a redução no tempo de decantação e aumento das dimensões dos flocos formados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUIAR, M.I. et al. *Improvement of coagulation-flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid*. Chemosphere, Elsevier, 2005. 58: p. 47-56.
2. CARLOS E SANTO, et al., *Optimization of coagulation-flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant*. Chemical Engineering Journal, Elsevier, 2012. 183: p. 117-123.
3. CHATTERJEE T., et al., *Coagulation of soil suspensions containing nonionic or anionic surfactants using chitosan, polyacrylamide, and polyaluminium chloride*. Chemosphere, Elsevier, 2009. 75.
4. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. Ed. São Carlos: Rima, 2005. 1656 p. 2 v.
5. DOS REIS, G.G.. *Influência da carga orgânica no desempenho de reatores de leito móvel com biofilme (MBBR)*. Rio de Janeiro, 2007. Dissertação de mestrado-Ciências em Engenharia Química-Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
6. GALVÃO JUNIOR, A.C. *Desafios para a universalização dos serviços de água e esgoto no Brasil*. Rev Panam Salud Publica. 2009;25(6):548-56.
7. METCALF & EDDY, Inc. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse". McGraw-Hill International Editions, 3rd ed., New York, 1991.
8. RAMALHO, M. J. A. C. *Otimização de um processo de coagulação-floculação na ETE de Icaraí, Niterói*. Porto, 2013. Dissertação de mestrado-Faculdade de Engenharia-Universidade do Porto, 2013.
9. RÔLA, A.K.K., et al. *Avaliação da eficiência de coagulantes comerciais para aplicação em sistemas de tratamento de água*. The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 2, n. 3, p. 014-033, 14 set. 2016.
10. RUSTEN, B. et al. *Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactor*, Aquacultural Engineering, v. 34, p. 322-331, 2006.
11. WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Biofilm reactors: WEF manual of practice no. 35*. Alexandria: McGraw Hill, 2011. 608 p.