

II-259 - PÓS-TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO OBJETIVANDO A REMOÇÃO DE FÓSFORO EM EFLUENTES SANITÁRIOS

Caio Cardinali Rebouças⁽¹⁾

Analista Químico da Empresa Municipal de Água e Saneamento de Balneário Camboriú (EMASA). Bacharel em Química (UFES), Especialista em Engenharia de Produção, Processo e Qualidade (Univali), Mestre em Química Analítica Ambiental (UFPR).

Arieleen Reis da Silva⁽²⁾

Engenheira Sanitarista pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Mestranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e pós-graduanda em Saneamento e Saúde Ambiental pela Universidade Federal de Goiás (UFG).

Tiago José Belli⁽³⁾

Professor do curso de Engenharia Sanitária na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e no programa de pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA) na Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Endereço⁽¹⁾: R. São Paulo, 250. São Judas. Itajaí – Santa Catarina - CEP: 88.303-330 - Brasil. E-mail: caio.cardinali@emasa.com.br

RESUMO

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Jaí Noel Gaya, localizada no município de Balneário Camboriú, apresenta como sistema de tratamento um reator integrado, composto por um compartimento anaeróbio (UASB) seguido de um compartimento aeróbio (Lodos Ativos). Devido ao layout da estação, atualmente o processo de remoção de fósforo não ocorre de forma eficiente, fator que pode acarretar inúmeros problemas e desequilíbrios ambientais ao ponto de descarte do efluente, a Lagoa de Taquaras. Tendo em vista esta problemática, este trabalho analisou-se em escala de bancada a aplicação de um pós-tratamento físico-químico com os processos de coagulação, floculação e sedimentação. Foram testados dois coagulantes, o Cloreto Férrico e o Policloreto de Alumínio, mediante ensaios de Jar-test. Tanto o Cloreto Férrico quanto o Policloreto de Alumínio, apresentaram satisfatória eficiência de remoção do fósforo, sendo de 99,3% para o Cloreto férrico e de 99,2% para o Policloreto de Alumínio, resultando em valores de fósforo total residual inferiores a 1 mg.L^{-1} . Porém tendo em vista as melhores eficiências de remoção nos outros parâmetros analisados e também a menor geração de lodo químico, sugere-se como melhor opção de aplicação na ETE o coagulante Policloreto de Alumínio.

PALAVRAS-CHAVE: Estação de Tratamento de Esgoto, UASB, Lodos Ativos, Pós-tratamento físico-químico, Remoção de fósforo.

INTRODUÇÃO

Os serviços de saneamento têm grande importância para a qualidade de vida da população, e a ausência de um sistema adequado de coleta e tratamento de efluentes contribui diretamente com a disseminação de doenças e a proliferação de vetores, além de ocasionar a degradação da qualidade ambiental, principalmente no que se refere a descaracterização dos recursos hídricos.

O saneamento básico no Brasil apresentou importantes avanços nos últimos anos, porém, muitas localidades ainda carecem de sistemas de tratamento de esgoto, abastecimento de água, coleta de resíduos sólidos e drenagem urbana. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2015), tendo como base o volume de água consumido, em média 42,2% dos esgotos gerados no país, foram submetidos a algum tipo de tratamento, percentual crescente quando comparado ao ano anterior, que apresentava uma média nacional de 40,8% de tratamento aos efluentes.

Santa Catarina se apresenta entre o grupo de estados brasileiros que dispõe de 20 a 40% de atendimento urbano com rede coletora de esgotos. Se referindo ao percentual de esgoto tratado, baseado na quantidade de

água consumida, o estado trata apenas 24,3% dos seus efluentes, um cenário preocupante frente aos problemas gerados pela ausência desse serviço (SNIS, 2015).

Balneário Camboriú, um município de Santa Catarina que apresenta mais de 108 mil habitantes e uma área relativamente pequena de pouco mais de 46 km², se mantém muito acima das médias nacionais relacionadas ao saneamento básico, pois apresenta coleta e tratamento de esgoto para mais de 90% da cidade. Dentre essa realidade, o município dispõe atualmente de duas estações de tratamento de afluentes, sendo a ETE Nova Esperança, que opera com o sistema de Lodos Ativados de aeração prolongada, tratando a maior parte do esgoto gerado no município e a ETE Jaí Noel Gaya, localizada na praia de Taquaras e construída com a intenção de tratar o efluente gerado nas praias agrestes da cidade (EMASA, 2017).

A Estação de Tratamento de Esgotos Jaí Noel Gaya opera com um sistema de reator integrado – UBOX®, abrangendo os processos anaeróbios, seguido de processos aeróbios de tratamento de efluentes. Tendo em vista suas particularidades de layout e operação, atualmente a estação não realiza com eficiência o processo de remoção do fósforo, gerando baixa estabilidade na eficiência de remoção perante as concentrações exigidas pela legislação vigente Lei estadual nº 14.675/2009.

Neste contexto, o presente trabalho propõe a análise em escala de bancada de um pós-tratamento físico-químico, mediante os processos de coagulação, floculação e sedimentação, testando a eficiência de remoção de turbidez e fósforo total entre dois coagulantes, o Cloreto Férrico e o Policloreto de Alumínio, visando a adequação do efluente ETE e a conservação da Lagoa de Taquaras, ponto de despejo dos efluentes.

O tratamento de esgotos tem sido composto tradicionalmente por processos biológicos, sendo eles anaeróbios, aeróbios ou uma combinação de ambos. No entanto, em função do estabelecimento de padrões mais restritivos de qualidade de corpos d'água e de lançamento de efluentes em corpos receptores, a adoção de processos físico-químicos de tratamento combinados com sistemas biológicos objetivando principalmente a remoção de fósforo, sólidos suspensos e carga orgânica, tem tido uma elevada aceitação como concepção de estações de tratamento de esgotos (FILHO, MARGUTI E PIVELI, 2009).

Os processos de coagulação/floculação podem ser considerados uma opção promissora de pós-tratamento, em termos de qualidade do efluente, eficiência econômica e simplicidade operacional. Além disso, as unidades de tratamento físico-químico são compactas, principalmente quando empregadas no pós-tratamento, e muito flexíveis, podendo ser facilmente adaptadas aos sistemas já existentes. Apresentam também menor custo de implantação quando comparado aos sistemas biológicos de tratamento. (PRAKASH et al, 2007; GUALBERTO, 2009).

Deste modo, este estudo se insere como um material de apoio aos gestores da concessionária de água e saneamento de Balneária Camboriú, surgindo como uma alternativa de otimização para a Estação de Tratamento de Esgotos já existente.

MATERIAIS E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Estação de Tratamento de Esgoto Jaí Noel Gaya se localiza na Praia de Taquaras no município de Balneário Camboriú – Santa Catarina, a Estação teve sua inauguração em 2007 e foi inicialmente prevista para tratar os esgotos de toda a região das praias agrestes do município, porém atualmente realiza o tratamento apenas dos efluentes coletados no bairro Taquaras, sem previsão de ampliação da rede coletora de esgotos para as demais localidades.

A Estação de Tratamento de Esgoto apresenta como processo biológico de depuração o Reator UBOX®, um sistema integrado de tratamento patenteado pela empresa holandesa Paques, e comercializado pela empresa brasileira Astrasand. O UBOX® (Figura 1a) é um sistema misto de tratamento de efluentes, constituído de Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB) sobreposto por um Reator Aeróbio de Lodos Ativados, conforme pode ser observado na Figura 1.

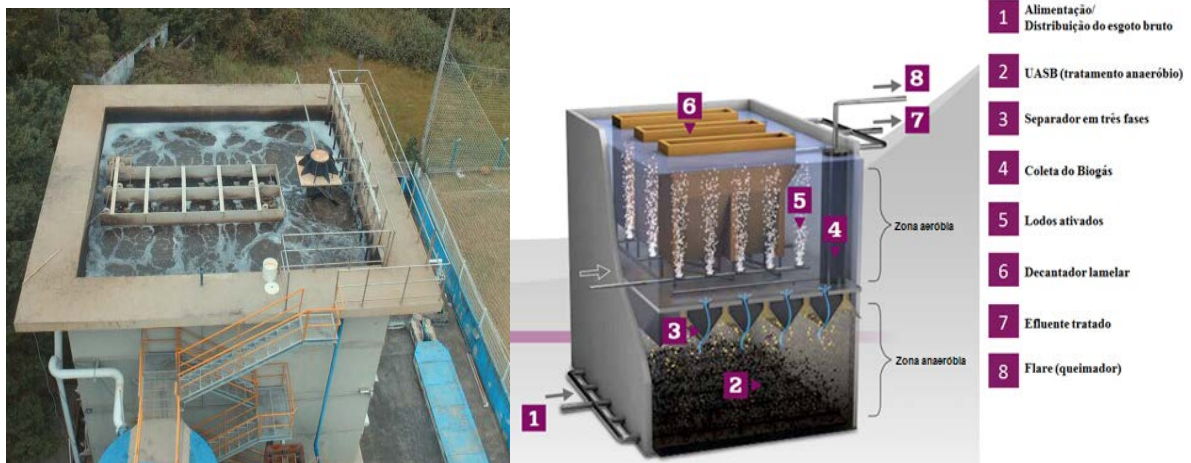


Figura 1: (a) Vista superior do Reator UBOX®, (b) Concepção do Reator UBOX®
Fonte: (a) Autor (2017). (b) Adaptado de Astrasand (2017).

O processo de tratamento biológico misto dispõe de processos anaeróbios ocorrendo no compartimento inferior do reator, seguido de processos aeróbios de tratamento no compartimento superior, sendo realizados em um único tanque de concreto armado. O compartimento anaeróbio apresenta um sistema trifásico de separação para líquidos, sólidos e gases, possibilitando a passagem do efluente pré-tratado à zona aeróbia, mantendo o lodo anaeróbio na parte inferior do reator e direcionando o biogás gerado para tratamento no queimador de gases. O compartimento aeróbio do reator é equipado com sistema convencional de introdução de ar, realizado por meio de difusores de bolhas finas, seguido de sistema de sedimentação composto por decantador lamelar de alta taxa.

O efluente tratado pela estação tem como ponto de descarte a Lagoa de Taquaras, localizada na zona costeira da praia de Taquaras. No momento, a lagoa não possui enquadramento oficial de acordo com a Resolução CONAMA nº 357 de 2005, porém visando manter a condição de qualidade do corpo receptor a EMASA monitora a qualidade da água da Lagoa mediante coletas e análises quinzenais, e conforme os dados históricos das análises físico-químicas realizadas, a Lagoa de Taquaras pode ser classificada como corpo hídrico de água salobras, ambiente lântico e enquadrada como Classe 3.

Atualmente a Estação de Tratamento de Esgoto Jáí Noel Gaya trabalha com uma vazão média de 14,4 m³/dia, recebendo o efluente de aproximadamente 120 habitantes. Entretanto, o dimensionamento do Reator UBOX® foi realizado visando tratar o efluente de aproximadamente 5.000 habitantes, fato este que trouxe desde sua inauguração diversos problemas de performance e operacionais à estação, tendo em vista a baixa carga orgânica e hidráulica disponível aos sistemas biológicos.

PÓS-TRATAMENTO EM ESCALA DE BANCADA

As amostras para realização dos ensaios Jar-test foram coletadas na calha Parshall de saída do Reator UBOX®, armazenadas em uma bombona de 20 litros e encaminhadas ao Laboratório de Controle de Qualidade de Efluentes, localizado na Estação de Tratamento de Água da EMASA, onde o efluente era submetido ao pós-tratamento físico-químico por meio de coagulação, floculação e sedimentação em aparelho do tipo Jar-test (Figura 2), contendo 6 jarros de acrílico com capacidade de 2 litros cada. As coletas e análises se sucederam no período de julho a outubro de 2017.



Figura 2: Equipamento Jar-test
Fonte: Autor (2017).

O equipamento dispõe de um painel digital possibilitando a programação da quantidade de ciclos, tempos de ciclo e velocidade de rotação das pás. O padrão adotado para realização dos ensaios segue descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros fixos adotados para realização dos ensaios Jar-test

Ciclos	RPM	Tempo
1	250	25 seg
2	80	2,5
3	40	5
4	25	7,5
5	0	7,5
6	0	7,5

Fonte: Autor (2017).

Para iniciar os testes eram adicionados 2 litros de efluente tratado em cada jarro, quando necessário era realizada a correção do pH utilizando uma solução preparada, ora de Ácido Sulfúrico para reduzir o pH, ora de Hidróxido de Cálcio quando o interesse era elevar o valor do pH. Em seguida adicionava-se as dosagens requeridas de coagulante e o equipamento era ligado, o mesmo já programado com os parâmetros fixos, iniciando a simulação das etapas de mistura rápida, seguido de mistura lenta e por fim a decantação. Ao final dos ciclos, as amostras dos seis jarros eram coletadas simultaneamente, descartando a água coletada nos primeiros cinco segundos.

Os ensaios Jar-test foram desenvolvidos para avaliar as condições de tratabilidade do efluente gerado pelo reator UBOX® por meio de processos físico-químicos, permitindo definir o coagulante que mais se adequa às características do efluente gerado pela ETE. Para isso, foram testados os coagulantes, Cloreto Férrico e o Policloreto de Alumínio – PAC. Como base para a aplicação dos coagulantes buscou-se obter a dosagem ótima de coagulante que atingisse uma remoção mínima de 70% de turbidez e o enquadramento do efluente tratado com a legislação, no parâmetro fósforo total.

ESTIMATIVA DE LODO QUÍMICO

A estimativa de geração do lodo químico foi realizada pelo método do cone Imhoff após os ensaios do Jar-test e mediante emprego de cálculos matemáticos, conforme metodologia descrita por Metcalf & Eddy (2014), que consiste no emprego de reações de precipitação dos coagulantes e nas massas removidas de sólidos suspensos totais.

MÉTODOS ANALÍTICOS

Para realização dos testes de coagulação, foram utilizados o Policloreto de Alumínio – PAC 18% (m/m) da empresa Avanex e o Cloreto Férrico 40% da marca Buschle & Lepper S/A. Ambos reagentes eram preparados a partir de diluição com água destilada, gerando uma solução com concentração de 2% (v/v).

As soluções de ácido sulfúrico para realização da correção do pH foram preparadas com concentrações de 5 mol/L, a partir da diluição do reagente concentrado com peso molecular 98,08% da marca Qhemis. Para as soluções de hidróxido de cálcio, utilizado para correção de pH, optou-se pelo produto Neutrageo Mais da empresa Dryller, preparado a partir de diluição, gerando uma solução com concentração de 1% (v/v).

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros e a técnica analítica empregada, faixa de operação de cada técnica, assim como os limites de quantificação e norma ou procedimento de referência.

Tabela 2: Descrição dos parâmetros e técnicas analíticas empregadas

Descrição do Ensaio (técnica analítica e parâmetro)	Faixa de Operação	Limite de Quantificação	Norma ou Procedimento
Determinação de pH pelo método eletrométrico	1 - 14	N.A.	Standard Methods 22th ed. 2012 Método 4500 B.
Determinação de Turbidez pelo método nefelométrico	0,1 - 1000	0,1 NTU	SMWW, 22th Edição, 2012 Método 2130 B.
Determinação de Sólidos Suspensos Totais pelo método espectrofotométrico	5,0 - 750 $mg.L^{-1}$	5,0 $mg.L^{-1}$	SMWW, 22th Edição, 2012 Método 2540 B.
Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) pelo método do refluxo fechado seguido de espectrofotometria	20 - 1500 $mg.L^{-1}$ de O ₂	L20 $mg.L^{-1}$ de O ₂	SMWW, 22th Edição, 2012 Método 5220 D.
Determinação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), 5 dias, por método manométrico/ respirométrico	0 - 4000 $mg.L^{-1}$ de O ₂	N.A.	SMWW, 22th Edição, 2012 Método 5210 D.
Alcalinidade por método titulométrico	N.A.	N.A.	SMWW, 22th Edição, 2012. Método 2320 B.
Determinação de Cor verdadeira por método espectrofotométrico	15 - 500	LQ: 15 uC	SMWW, 22th Edição, 2012 Método 2120 C.
Determinação de Fósforo Total por método espectrofotométrico	1,0 - 100,0 $mg.L^{-1}$ de P-PO ₄	LQ: 1 $mg.L^{-1}$ P-PO ₄	SMWW, 22th Edição, 2012 Método 4500-P C.

Fonte: Autor (2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efluente tratado pelo reator UBOX® constitui os parâmetros de entrada do pós-tratamento físico-químico e apresentou uma turbidez média nos ensaios de 55,7 NTU, pH médio de 7,8 e uma concentração média de fósforo de $12,2 \text{ mg.L}^{-1}$.

Após a análise dos resultados obtidos relativos ao pH, observou-se que a faixa ótima de trabalho para o Cloreto Férrico ficou compreendida entre 6 a 6,6. Dentro da faixa mencionada, o valor de pH de 6,4 foi aquele que resultou na maior eficiência de remoção de turbidez. Para o coagulante Policloreto de Alumínio o pH ótimo de coagulação ficou compreendido na faixa de 6,0 a 7,0, sendo que o pH de 6,7 gerou os melhores resultados na remoção de turbidez.

Na figura 3 pode-se observar que ao realizar a correção do pH em ambos coagulantes, ocorre o aumento e a estabilização dos percentuais de remoção de turbidez, pois o coagulante não possui mais a atuação como ácido na solução, consumindo alcalinidade e baixando o valor do pH, podendo assim, ter sua dosagem reduzida, mantendo sua eficiência e minimizando custos.

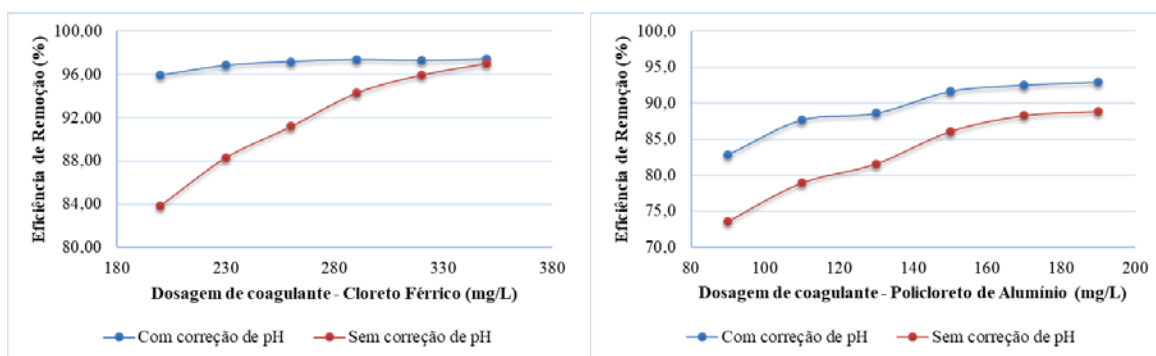


Figura 3: Efeito da correção do pH em ambos coagulantes

Fonte: Autor (2017).

Avaliando a aplicação do coagulante Cloreto Férrico, verificou-se que a dosagem de 130 mg.L^{-1} alcançou o objetivo de remover no mínimo 70% de turbidez, tanto para efluentes de alta, quanto de baixa turbidez. Ressalta-se que o ensaio realizado para o efluente de alta turbidez foi feito apenas sem a correção do pH, pois após a realização deste ensaio não se coletou um efluente tão turvo (75 NTU), motivo que inviabilizou a conclusão desse resultado. Porém, tendo comprovado a influência do pH na eficiência de remoção de turbidez, pode-se afirmar que a porcentagem de remoção aumentaria com a correção inicial do pH, podendo até mesmo reduzir as dosagens para águas mais turvas.

Com isso, para este coagulante em questão determina-se uma faixa ótima de dosagem de 100 a 130 mg.L^{-1} , tendo em vista a possibilidade de redução da dosagem de coagulante para efluentes com turbidez elevada, com correção inicial do pH. A partir da determinação da faixa ótima de coagulante, avaliou-se a eficiência de remoção do fósforo para as dosagens aplicadas, como demonstrado na Figura 4.

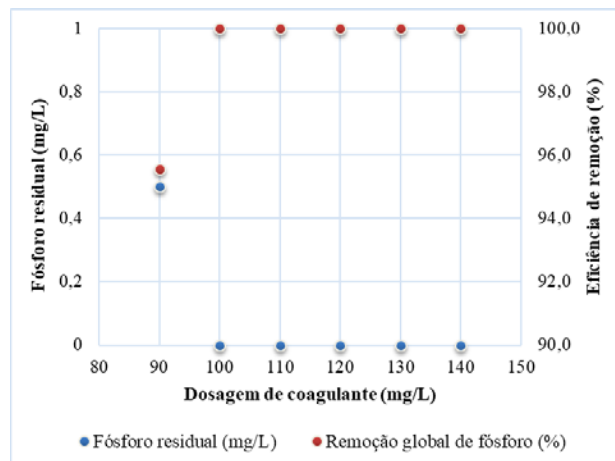


Figura 4: Remoção de fósforo para a faixa ótima de dosagem do Cloreto Férrico
Fonte: Autor (2017).

Verifica-se que a faixa ótima estipulada de dosagem do coagulante Cloreto Férrico se manteve dentro do esperado, resultando em um efluente que atende aos parâmetros de remoção de fósforo total, atingindo mais de 95% de remoção com a aplicação da dosagem mínima de 100 mg.L^{-1} de coagulante, gerando um efluente residual com $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de fósforo total. Já para a dosagem de 130 mg.L^{-1} a concentração de fósforo residual ficou abaixo de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$, faixa de medição da análise.

Sinelli (2002) avaliou em escala piloto a remoção de fósforo total de efluente sanitário previamente tratado por um reator anaeróbio utilizando o coagulante Cloreto Férrico. No estudo obteve-se uma média de remoção de fósforo total de 92,5% para dosagens de 100 a 120 mg.L^{-1} de coagulante. Silva (2009) aplicou 75 mg.L^{-1} de Cloreto Férrico visando a remoção de fósforo de um efluente previamente tratado em reator UASB, seguido de filtro biológico aerado submerso (FBAS), atingindo uma eficiência de remoção de 77%.

A partir da análise dos ensaios realizados com o coagulante Policloreto de Alumínio, determinou-se a dosagem ideal de produto em 60 mg.L^{-1} , pois com essa dosagem de coagulante obteve-se uma remoção superior a 70% de turbidez em efluentes de baixa turbidez. Entretanto, para efluentes de alta turbidez essa dosagem foi testada apenas sem a correção do pH, devido ao mesmo problema mencionado anteriormente com o Cloreto Férrico. Veliz (2016) apresentou uma média de turbidez residual abaixo de 25 NTU, aplicando 100 mg/L de PAC no tratamento físico-químico de águas residuárias municipais, visando o reuso na agricultura. Hameed et al. (2016) analisou o tratamento físico-químico com o PAC e alcançou uma eficiência 86% de turbidez.

Estima-se que a dosagem de 60 mg.L^{-1} , aplicada em efluentes de elevada turbidez, associada ao controle do pH, resultaria em uma boa remoção de turbidez, porém observando a Figura 5, constatou-se que a dosagem de 60 mg.L^{-1} , de Policloreto de Alumínio, não alcançaria a remoção necessária de fósforo total para o enquadramento de efluente na legislação pertinente, apresentando apenas 58% de remoção global e gerando um efluente com $4,72 \text{ mg.L}^{-1}$ de fósforo residual.

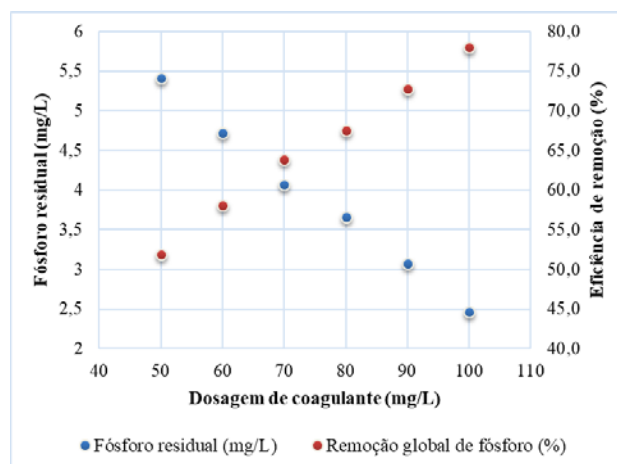


Figura 5: Avaliação da remoção de fósforo para diferentes dosagens de Policloreto de Alumínio
Fonte: Autor (2017).

A porcentagem de remoção estipulada pela legislação estadual, só seria alcançada com a dosagem de 100 $mg.L^{-1}$, de coagulante, gerando um fósforo residual de $mg.L^{-1}$; já a mínima dosagem que respeita a concentração máxima estipulada pela mesma lei (4 $mg.L^{-1}$, de fósforo total), foi a de 80 $mg.L^{-1}$, de PAC, que gerou um residual de 3,66 $mg.L^{-1}$, de fósforo total.

Tendo em vista o atendimento da legislação estadual, adota-se uma faixa de dosagem ótima de 100 a 130 $mg.L^{-1}$ de Policloreto de Alumínio, propõe-se que o aumento da dosagem de coagulante seja realizado para efluentes com alta turbidez, objetivando a remoção eficiente de fósforo total. Pode-se observar na Figura 6, que com adoção da nova faixa ótima de PAC as remoções de fósforo foram otimizadas, alcançando mais de 94% de remoção e concentrações de fósforo residual abaixo de 1 $mg.L^{-1}$ em todas as dosagens aplicadas.

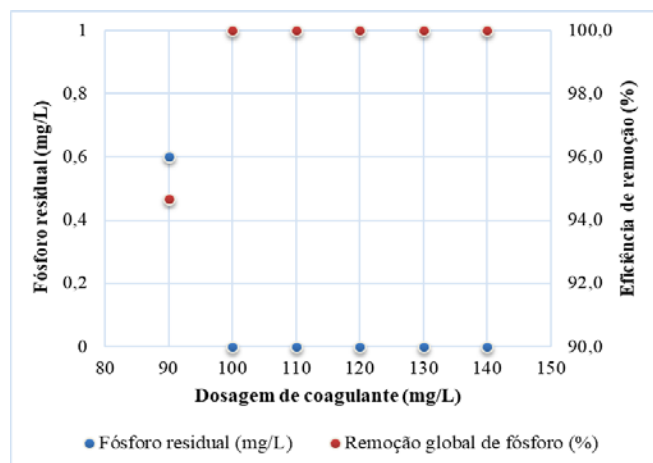


Figura 6: Remoção de fósforo total para a faixa ótima de Policloreto de Alumínio
Fonte: Autor (2017).

Com a adoção desta faixa de dosagem ótima de coagulante, assegura-se a remoção do fósforo total, problema principal enfrentado pela Estação de Tratamento de esgoto.

Visando a escolha do coagulante que mais se adapta ao pós-tratamento físico-químico com efluente da ETE Jaí Noel Gaya, foram realizadas análises de outros parâmetros importantes, que seguem descritos no Quadro 1. Os dados expostos correspondem aos valores médios de remoção da faixa ótima de aplicação dos coagulantes Cloreto Férrico e Policloreto de Alumínio. As duas primeiras colunas refletem os resultados das porcentagens de remoção obtidos com os ensaios Jar Test e as duas colunas de porcentagem de remoção global, simula os resultados gerais que a ETE obterá com a aplicação do pós-tratamento físico-químico.

Quadro 1 - Análise geral de remoção para os coagulantes

Parâmetro	% Remoção Físico-Química FeCl ₃	% Remoção Físico-Química PAC	% Remoção Global FeCl ₃	% Remoção Global PAC
Turbidez	54,2	71,4	92,7	95,5
pH	-	-	-	-
SST	49,7	64,2	87,2	90,9
Alcalinidade	67,2	48,9	78,1	65,9
Fósforo	99,3	99,2	99,6	99,5
DQO	27,4	47,7	84,8	89,1
DBO	60,3	75,2	95,3	97,1

Fonte: Autor (2017).

Com base no Quadro 1 pode-se observar que ambos coagulantes apresentaram uma boa remoção de turbidez, sólidos suspensos totais (SST), DQO e DBO₅, parâmetro que atingiu remoções globais superiores a 95%. Sinelli (2002) aplicou o pós-tratamento físico-químico para efluentes sanitários e apresentou uma média de remoção de DBO₅ de 56,7% e de SST de 71,3%, para dosagens de 100 a 120 $mg.L^{-1}$ de Cloreto férrico. Hameed et al. (2016) analisou o tratamento físico-químico com o PAC e alcançou uma eficiência 86% de turbidez, 55% de remoção de DBO e 62% de remoção de DQO para efluentes sanitários.

Podemos verificar no Quadro 1 que o coagulante Cloreto Férrico apresentou um alto consumo de alcalinidade, sendo que esse fator afetou diretamente o pH do efluente final gerado, que ficou em média 5,5, valor no limite estipulado pela legislação estadual, evidenciando a necessidade de uma etapa de correção antes de seu descarte, visando a não descaracterização do corpo receptor. Além disso, estima-se uma maior quantidade de produtos químicos necessários ao tratamento, fator que pode ser considerado um ponto negativo a aplicação deste coagulante em larga escala.

Silva, Aquino e Santos (2007) concluíram que a adição de 200 $mg.L^{-1}$ de Cloreto Férrico, resultou em um consumo muito elevado da alcalinidade do meio, reduzindo cerca de 53% após a aplicação do coagulante. Santos (2001) também verificou que para a dosagem de 200 $mg.L^{-1}$ de Cloreto Férrico, a alcalinidade total do esgoto bruto variou de 145 para 3 $mg.CaCO_3.L^{-1}$; com relação ao pH, o mesmo reduziu de 6,7 para 4,4, necessitando de uma etapa de correção final.

Em relação a remoção de fósforo total, o resultado da aplicação de ambos coagulantes atende aos limites estipulados pela legislação pertinente, tanto em porcentagem de remoção, quanto em concentração de fósforo residual, apresentando valores melhores do que o proposto em lei e entrando em acordo com o princípio da conscientização pública voltada para a necessidade da melhoria e proteção da qualidade ambiental dos recursos hídricos, assim como, a proteção dos ecossistemas.

Tendo em vista os padrões de lançamento estipulados nas legislações federal e estadual para disposição de efluentes nos corpos receptores, o ensaio realizado com o coagulante Policloreto de Alumínio se mostrou eficiente para a remoção dos parâmetros analisados, promovendo um efluente final de boa qualidade, de modo a assegurar a preservação do corpo receptor. Quando comparado ao coagulante Cloreto Férrico, o uso de PAC apresentou mínimas diferenças de remoção, porém, destaca-se pela maior remoção de turbidez, sólidos suspensos totais, DBO e DQO, além do menor consumo de alcalinidade do efluente e dispensável correção final do pH, economizando custos com produtos químicos.

A análise comparativa da quantidade de lodo gerado com a aplicação da dosagem ótima dos coagulantes, observa-se que com o PAC a geração de lodo estimada seria de 6,3 kg/dia e com o FeCl₃ de 9,8 kg/dia, tendo como indicador o volume gerado no ensaio de sedimentação no cone Imhoff, nas massas de remoção de sólidos suspensos totais/turbidez e na quantidades de produtos químicos empregados, permitindo assim, considerar que a escolha do PAC como coagulante implica em menor geração de lodo e, consequentemente, nos custos envolvendo a disposição final do resíduo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de pós-tratamento físico-químico, utilizando dos processos de coagulação/floculação/sedimentação, se mostrou uma alternativa viável tecnicamente a aplicação na ETE, aumentando as eficiências de remoção, gerando estabilidade ao processo de tratamento e enquadrando o efluente de acordo com as legislações pertinentes a respeito dos parâmetros limites para o descarte de efluentes.

Ambos coagulantes apresentaram satisfatória eficiência na remoção de poluentes, principalmente na remoção de fósforo, o maior problema da estação. As faixas adotadas dos coagulantes Policloreto de Alumínio e Cloreto Férrico resultaram em uma remoção média de 99,2% e 99,3% desse nutriente, respectivamente, permitindo, assim, que a concentração de fósforo total no efluente final estivesse abaixo dos valores estabelecidos para lançamento pela legislação catarinense.

Os resultados mostraram também maiores vantagens pela utilização do Policloreto de Alumínio, tendo em vista as melhores remoções de turbidez, SST, DBO e DQO, além do menor consumo de alcalinidade do efluente, da dispensável correção final do pH e da menor geração de lodo químico, economizando gastos com disposição final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTRASAND. *Reator Integrado*. 2017. Disponível em: <http://www.astrasand.com.br/upload/site_produto/5/16_g.jpg>. Acesso em: 14 ago. 2017.
2. BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos (SNIS) – 2015*. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2017. 212 p.
3. FILHO, S. S. F.; MARGUTI, A. L.; PIVELI, R. P. *Produção de lodo e comportamento químico de sais de ferro empregados no pós-tratamento de esgoto sanitário por precipitação química*. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 49-58, março, 2009.
4. GUALBERTO, F. F. *Otimização de processos de precipitação química na remoção de fósforo de esgotos sanitários mediante a utilização de sais de ferro como coagulante*. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
5. HAMEED, Y. T. et al. A tannin-based agent for coagulation and flocculation of municipal wastewater: Chemical composition, performance assessment compared to Polyaluminum chloride, and application in a pilot plant. *Journal of Environmental Management*, Malaysia, v. 184, n. 3, p.494-503, dez. 2016.
6. METCALF, E.; EDDY, M. *Wastewater engineering: treatment and Resource recovery*. 5. ed. New York: McGraw Hill, 2014.
7. PRAKASH, K. J. et al. Post-Treatment of UASB Reactor Effluent by Coagulation and Flocculation Process. *Wiley Interscience*, India, v. 26, n. 2, p.164-168, jul. 2007.
8. SANTOS, H. R. *Aplicação de coagulantes no afluente do reator anaeróbio de leite expandido alimentado com esgoto sanitário*. 2001, 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.
9. SILVA, C. V. A. *Remoção de fósforo em estação compacta de tratamento de esgotos sanitários através de precipitação química*. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
10. SILVA, M. E. R.; AQUINO, M. D.; SANTOS, A. B. Pós-tratamento de efluentes provenientes de reatores anaeróbios tratando esgotos sanitários por coagulantes naturais e não-naturais. *Rev. Tecnol. Fortaleza*, Fortaleza, v. 28, n. 2, p.178-190, dez. 2007.
11. SINELLI, P. H.; SILVA, S. M. C. P. da; ALEM SOBRINHO, P. Remoção de Fósforo de efluente de tratamento anaeróbio por processo físico. In: 28º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. *Anais*. Cancún: Aidis, 2002. p. 1 - 8.
12. VELIZ, E. et al. Coagulação - floculação, filtração e ozonização de águas residuais para reutilização em irrigação agrícola. *Tecnol. cienc. água, Jiutepec*, v. 7, n. 1, p. 17-34, fev. 2016.