

PROPOSTA DE SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO ATRAVÉS DE ETAPAS CONVENCIONAIS E AVANÇADAS

Fernanda Rosa da Silveira¹

fernanda.rsilveira@outlook.com

Saulo Padoin Chielle²

saulo@sgbio.com.br

Rafael Pereira³

Fernanda Siqueira Souza⁴

fernanda.souza@unilasalle.edu.br

Universidade La Salle

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo avaliar a possibilidade e o potencial de aplicação de processos físico-químicos do coagulante tanino e o processo oxidativo avançado de ozonização no tratamento de efluentes sanitários. Foi testado o coagulante tanino em diferentes pHs: bruto, 4, 6, 8 e 10. Após escolhido o melhor pH o coagulante foi testado variando as concentrações 261 mg/L; 523 mg/L; 784 mg/L; 1045 mg/L; 1306 mg/L e 1568 mg/L. Os ensaios experimentais mostraram que os melhores resultados foram obtidos com o pH bruto(sem adição de produto para regular o pH) alcançando 69% de remoção de DQO, 100% de turbidez e 99% de cor, na melhor concentração de tanino foi alcançado 48% de remoção de DQO, 100% de turbidez e 90% de cor com 523mg/L de concentração. Para os estudos com o planejamento experimental foi proposto avaliar o percentual de remoção de DQO, o qual demonstrou uma eficiência satisfatória, com 75% de remoção. O sistema estudado neste trabalho mostrou uma alternativa eficaz para o tratamento do efluentes sanitário perante os parâmetros avaliados.

Abstract: The present work aimed to evaluate the possibility and the potential of application of tannin coagulant physicochemical processes and the advanced oxidative process of ozonation in the treatment of sanitary effluents. Tannin coagulant was tested at different crude pH, 4, 6, 8 and 10 after choosing the best pH the coagulant was tested at different concentrations 261 mg / L; 523 mg / L; 784 mg / L; 1045 mg / L; 1306 mg / L and 1568 mg / L. Experimental tests showed that the best results were obtained with the raw pH (without addition of product to regulate the pH) achieving 69% COD removal, 100% turbidity and 99% color. COD removal, 100% turbidity and 90% color. For studies with experimental design it was proposed to evaluate the percentage of COD removal, which showed satisfactory efficiency, with 75% removal. The system studied in this work showed an effective alternative for the treatment of sanitary effluents before the evaluated parameters.

¹ Graduanda em Engenharia Ambiental Universidade La Salle, fernanda.rsilveira@outlook.com.

² Mestre em avaliação de impactos ambientais, Sgbio acessoria e consultoria em sustentabilidade, saulo@sgbio.com.br

³ Bacharel em Engenharia Ambiental, Universidade La Salle

⁴Prof. Dr. em Engenharia Química, Universidade La Salle, fernanda.souza@unilasalle.edu.br.

INTRODUÇÃO

Efluentes sanitários devem ser tratados para posterior descarte ou reuso e inserção do mesmo no processo produtivo. A Resolução CONAMA n° 357/2005, em âmbito nacional, e a Resolução CONSEMA 355/2017, a nível estadual, definem os limites máximos de diversos parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Perante as exigências dos órgãos de fiscalização e licenciamento, as indústrias devem atender a legislação vigente.

Diferentes tipos de tratamentos são voltados para cada classe de poluente, encontrados em um efluente de um processo industrial. O tratamento físico-químico primário engloba processos, tais como, coagulação, floculação, precipitação química, flotação e decantação. (NUNES 2008; BRAILE E CAVALCANTI, 1993; METCALF & EDDY, 2004). Especificamente, a coagulação e floculação têm por objetivo aglutinar partículas em suspensão (1 a 100 μm) contidas em águas residuárias mediante a adição de produtos químicos, de modo a promover a redução de sólidos em suspensão, carga orgânica e de alguns tipos de poluentes da fase líquida, transferindo-as para a fase sólida (CAVALCANTI, 2009). Coagulantes inorgânicos e poliméricos tais como os sais de alumínio e de ferro, por razões econômicas e por apresentarem uma maior valência são muito utilizados. Dentre estes sais, o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o cloreto férrico (FeCl_3) e o policloreto de alumínio (PAC) são os mais utilizados (ZOUBOULIS E TRASKAS, 2005; DI BERNARDO E DANTAS, 2005). Quanto à aplicação dos biopolímeros de origem vegetal no tratamento de águas residuárias e industriais nota-se ser uma área ainda pouco explorada, mostrando-se uma promissora área de estudos (KONRADT-MORAES et. al., 2007).

Tratamentos utilizando poderosos oxidantes estão cada vez mais sendo incorporados nas estações de tratamento de águas. Os POAs possibilitam que o composto não seja apenas transferido de fase, mas destruído e transformado em dióxido de carbono, água e ânions inorgânicos (não tóxicos ou de potencial tóxico inferior), através de reações de degradações que envolvem espécies transitórias oxidantes, principalmente os radicais hidroxila. Dentre os POAs mais utilizados, o tratamento de água por ozonização vem recebendo destaque devido ao seu elevado potencial para degradar, seja parcialmente ou totalmente, compostos persistentes que não são degradados em sistemas biológicos de tratamento. (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

Neste contexto, o objetivo geral do presente trabalho foi propor um sistema de tratamento de esgoto, com etapas convencionais (coagulação/floculação) e avançadas (ozonização) visando melhorar o tratamento do efluente sanitário. Foi realizado planejamento experimental para avaliar o tratamento que apresentou a melhor eficiência de acordo com os parâmetros de qualidade para descarte.

MATERIAIS E MÉTODOS

Efluente

O efluente utilizado neste trabalho foi coletado em uma estação de tratamento de esgoto doméstico ilustrado na Figura 1, localizada na região metropolitana de Porto Alegre/RS. Acondicionado em bombonas plásticas de 20 litros e transportado para o laboratório do Centro de Pesquisas Ambientais da Universidade La Salle, no município de Nova Santa Rita. As amostras foram mantidas em temperatura de 4 °C para posterior análise e tratamento.

Reagentes

Nos ensaios de coagulação foi utilizado como coagulante o Tanino da marca Faxon Química, também foram utilizadas soluções de H₂SO₄ (Synth) e Ca(OH)₂ (Neon) para o ajuste de pH do efluente. Nos experimentos de ozonização, foi utilizada solução de Iodeto de Potássio (Qhemis) para coleta do ozônio residual. Todos os reagentes utilizados nas análises possuem grau analítico (P.A.) e as soluções foram preparadas com água deionizada (Milli-Q).

Procedimento Analítico

As análises do efluente bruto e tratado foram realizadas DQO com seguindo a metodologia definida pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*

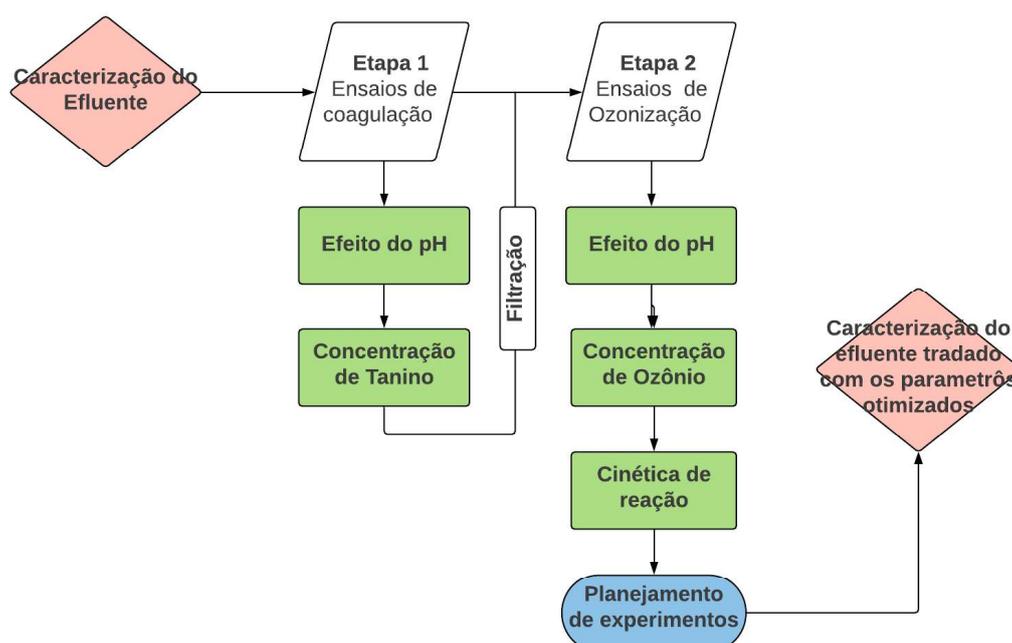
Equipamentos

Para realização dos ensaios de coagulação foi utilizado um Jar-Teste (EthiK - Modelo 2018-6). Nos ensaios de Ozonização, foram utilizados um concentrador de oxigênio (EverFlo modelo - 5 LPM) e um gerador de Ozônio (Ecozon). As análises de turbidez foram realizadas em um turbidímetro (Digimed - modelo DM-TU), as medições de pH foram feitas com um pHmetro (HANNA - modelo HI 8424) e as análises de cor foram analisadas em um colorímetro (Alfakit).

Procedimentos experimentais

O presente trabalho foi desenvolvido em 2 etapas experimentais: (i) ensaios de coagulação; e (ii) ensaios de ozonização. A Figura 2 apresenta o fluxograma dos experimentos. Todos os ensaios foram realizados em triplicatas.

Figura 2 – Fluxograma do procedimento experimental.



Etapa 1. Ensaios de coagulação

As condições de operação foram baseadas no trabalho de Silveira(2016). Os experimentos foram conduzidos em temperatura ambiente em um jar teste sob agitação de 60 rpm e 30 rpm durante 30 segundos. Após, o sistema foi desligado e aguardado a decantação do lodo por um período de 1 minuto. Amostras do sobrenadante foram coletadas para as análises de DQO, turbidez e cor, visando avaliar a eficiência de cada estudo: efeito do pH e da concentração de tanino.

No Primeiro conjunto de ensaios, foi abordado a influência do pH no tratamento de coagulação, sendo este variado: bruto (7), 4, 6, 8 e 10. Nestes experimentos, utilizou-se a dosagem de coagulante tanino na concentração de 784mg/L

No segundo conjunto de ensaios, foi estudado o efeito da dosagem do coagulante. Com esta finalidade, foram realizados experimentos variando a concentração de Tanino: 261 mg/L; 523 mg/L; 784 mg/L; 1045 mg/L; 1306 mg/L e 1568 mg/L no pH que obteve os melhores resultados de acordo com o estudo anterior. (SILVEIRA, 2017)

Etapa 2. Ensaios de Ozonização

O efluente após o sistema de coagulação que apresentou os melhores resultados (Etapa 1) foi filtrado para posterior experimentos no sistema de ozonização. Foram realizados ensaios preliminares e posterior planejamento de experimentos.

A partir dos ensaios preliminares, foi proposto um Planejamento Experimental do tipo Box-Behnken (SILVA 2016) . Este planejamento permite a construção de um modelo polinomial de segunda ordem (Equação 1) para caracterizar e/ou otimizar um processo com um menor número de experimentos. São utilizados 3 fatores testados em 3 níveis (baixo, médio e alto) e inclui pelo menos um nível intermediário (0), estabelecido para cada combinação de fatores (Portal Action, 2016). O modelo apresenta a seguinte forma:

$$Y_i = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_1X_2 + a_5X_2X_3 + a_6X_1X_3 + a_7X_{12} + a_8X_{22} + a_9X_{32} + E \quad (1)$$

Onde, $a_0 - a_9$ são os coeficientes de regressão, X_1 a X_3 denotam os fatores, Y é a resposta medida associada com as combinações dos fatores e E representa o erro experimental.

Para o estudo em questão, foram testados três fatores: Vazão de O₃ em g/L (X_1), pH (X_2) e tempo em min (X_3), tendo como variável de resposta o parâmetro de DQO. Os níveis estipulados para o teste no planejamento foram baseados nos resultados obtidos nos ensaios preliminares. A Tabela 2 mostra os níveis dos fatores utilizados, totalizando 15 experimentos.

Tabela 2 – Fatores e seus níveis para o desenvolvimento de Box-Behnken

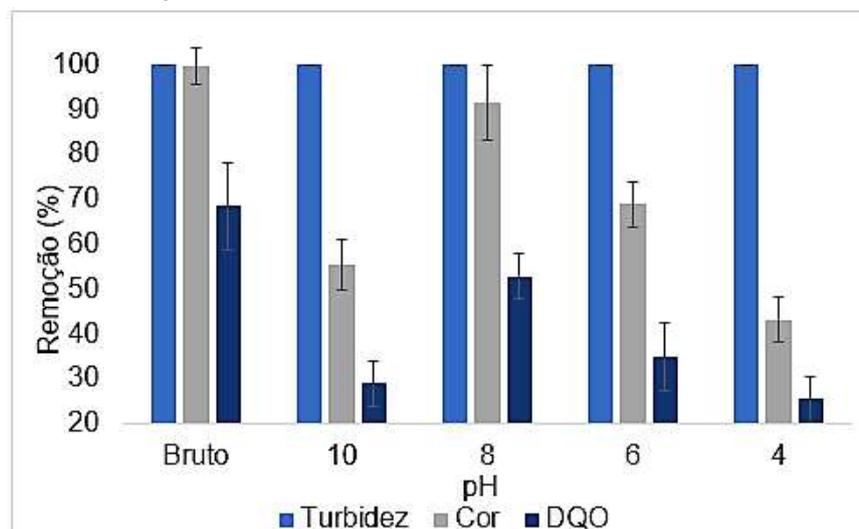
Fatores	Níveis			
	-1	0	1	
Vazão de Ozônio(g/L)	X_1	1	2	3
pH	X_2	7	8	9
Tempo(min)	X_3	5	15	30

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Etapa 1. Coagulação com Tanino

A Figura 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de jar-test variando o pH do sistema.

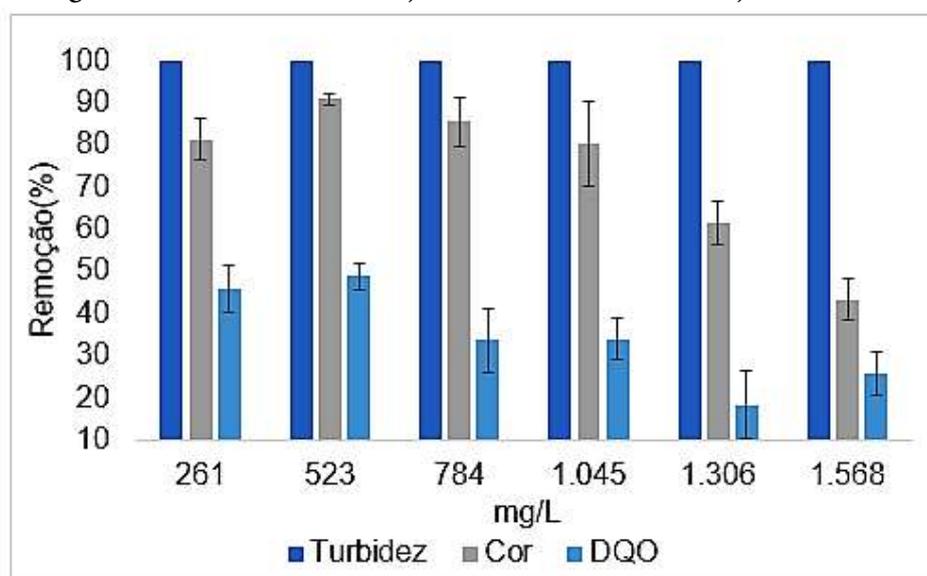
Figura 1 – Percentual de remoção em diferentes pH.



De acordo com a Figura 1, observa-se que, com relação aos parâmetros de turbidez, todos obtiveram 100% de remoção. Já se tratando dos parâmetros de cor e DQO os melhores resultados foram em pH bruto(7) com 99,64% e 68,56% de remoção, respectivamente. Sendo assim, foi estipulado que em pH bruto apresentou melhores resultados o que o fez ser mantido para as próximas etapas do estudo e sendo eficiente em questão de custos por não ter adição de novos produtos.

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos na variação da concentração de coagulante.

Figura 2 – Percentual de remoção em diferentes concentrações de tanino.



Observa-se pela Figura 2 que o melhor resultado apresentou remoção total para turbidez, 90,86% para cor e 48,92% para DQO na concentração de 523 mg/L. Todas as concentrações obtiveram 100% de remoção de turbidez e resultados inferiores a concentração de 523mg/L. Portanto, a concentração de 523mg/L foi escolhida para os ensaios do planejamento experimental por apresentar os melhores resultados comparada as concentrações estudadas.

Etapa 2 – Ozonização

Para os ensaios do planejamento experimental, foram utilizados os parâmetros estipulados na etapa anterior que obtiveram os melhores resultados. Tendo em vista a matriz utilizado no planejamento experimental e a interação dos parâmetros de vazão de ozônio (X1), pH (X2) e tempo (X3) obteve-se como resposta o percentual de remoção de DQO (Y). A Tabela 3 apresenta os resultados alcançados em cada experimento.

Tabela 3 – Respostas do experimento de Box-Behnken realizado para avaliar o percentual de remoção de DQO.

Experimento	Vazão_de_O3	pH	Tempo	Percentual_de_remoção_de_DQO
1	-1	-1	0	53,69
2	1	-1	0	30,87
3	-1	1	0	30,2
4	1	1	0	27,52
5	-1	0	-1	48,66
6	1	0	-1	32,89
7	-1	0	1	39,6
8	1	0	1	22,15
9	0	-1	-1	76,39
10	0	1	-1	46,24
11	0	-1	1	42,24
12	0	1	1	28,54
13	0	0	0	67,11
14	0	0	0	70,91
15	0	0	0	70,28

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, foram avaliados os parâmetros significativos através do teste de variância (ANOVA) considerando um nível de confiança de 95%.

Tabela 4 – Tabela ANOVA para o planejamento Box-Behnken.

<i>Tabela da Anova</i>					
Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Vazão de O3	1	431,076	431,076	11,953	0,018
pH	1	624,695	624,695	17,321	0,009
Tempo	1	641,842	641,842	17,797	0,008
I(Vazão de O3 ²)	1	1756,473	1756,473	48,703	0,001
I(pH ²)	1	361,472	361,472	10,023	0,025
I(Tempo ²)	1	400,474	400,474	11,104	0,021
Vazão de O3:pH	1	101,347	101,347	2,810	0,155
Vazão de O3:Tempo	1	0,704	0,704	0,020	0,894
pH:Tempo	1	67,592	67,592	1,874	0,229
Resíduos	5	180,325	36,065		

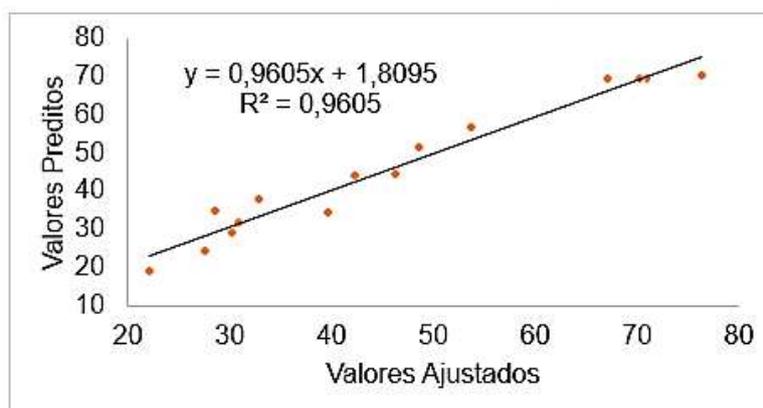
Pode-se observar que as variáveis apresentam e indicando um efeito significativo ao nível de 95% de confiança, p -valor $< 0,05$, assim, pode-se afirmar que este fator exerce certa influência na variável resposta de remoção da DQO.

Tabela 5 – Efeitos estimados do planejamento Box-Behnken

Efeitos Estimados $R^2 = 0,96$ R ajustado = 0,89				
Preditor	Estimativa	Desvio Padrão	Estat.t	P-valor
Intercepto	69,433	3,467	20,026	0,000
Vazão de O3	-7,341	2,123	-3,457	0,018
pH	-8,837	2,123	-4,162	0,009
Tempo	-8,957	2,123	-4,219	0,008
I(Vazão de O3 ²)	-23,196	3,125	-7,422	0,001
I(pH ²)	-10,666	3,125	-3,413	0,019
I(Tempo ²)	-10,414	3,125	-3,332	0,021
Vazão de O3:pH	5,034	3,003	1,676	0,155
Vazão de O3:Tempo	-0,419	3,003	-0,140	0,894
pH:Tempo	4,111	3,003	1,369	0,229

Observa-se na tabela 4 que o valor do coeficiente de determinação R^2 foi de aproximadamente 0,96, que resulta em um coeficiente de correlação de 0,9904 indicando que um modelo polinomial de segunda ordem tem uma correlação forte e representa bem a relação entre os efeitos e a variável resposta. A Figura 3 apresenta a avaliação do modelo através dos valores preditos pelo modelo (reta) versus os valores observados (pontos). Salienta-se que, o modelo é preditivo pois os valores preditos se aproximam dos valores observados.

Figura 3 – Valores observados versus valores preditos para remoção de DQO (%)



Através dos gráficos de contorno pode-se identificar as regiões em que as interações entre as variáveis tornam o processo ótimo, ou seja, as regiões ótimas de operação. Observando os gráficos de contorno de contorno e de superfícies, conforme Figuras 4 e 5, respectivamente, pode-se obter indícios que um modelo polinomial de segunda ordem parece representar bem a relação entre a resposta (% Remoção de DQO) e os fatores estudados.

Figura 4 – Gráfico de contorno do percentual de remoção de DQO em função das variáveis estudadas: (a) pHxTempo; (b) pHxVazão de O₃; (c) tempo x Vazão de O₃.

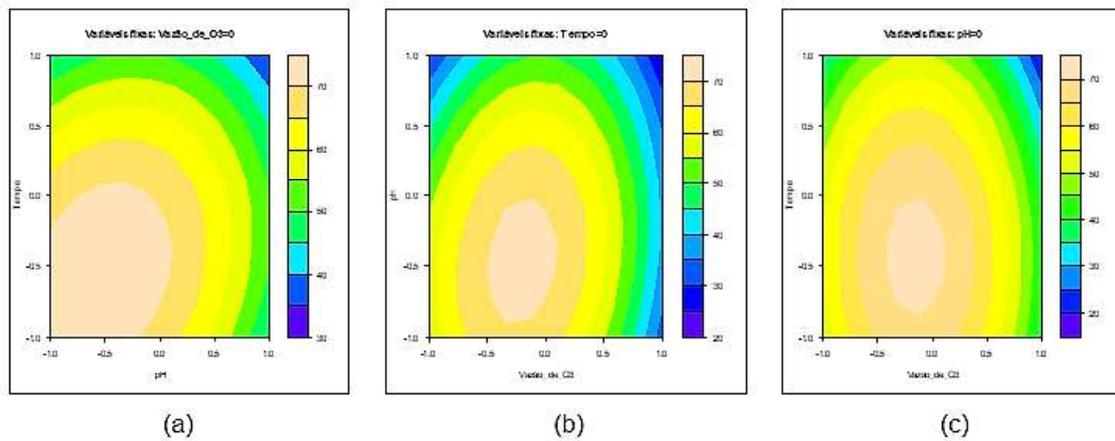
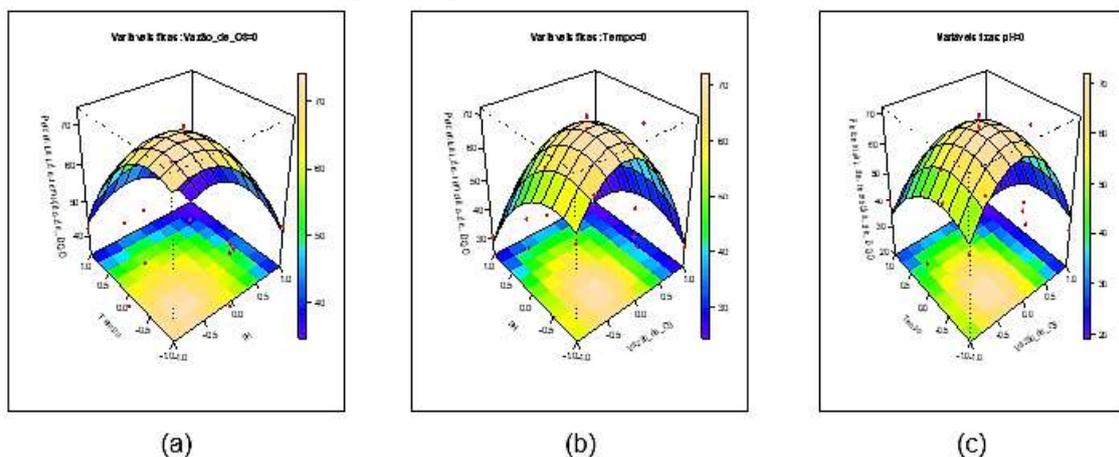


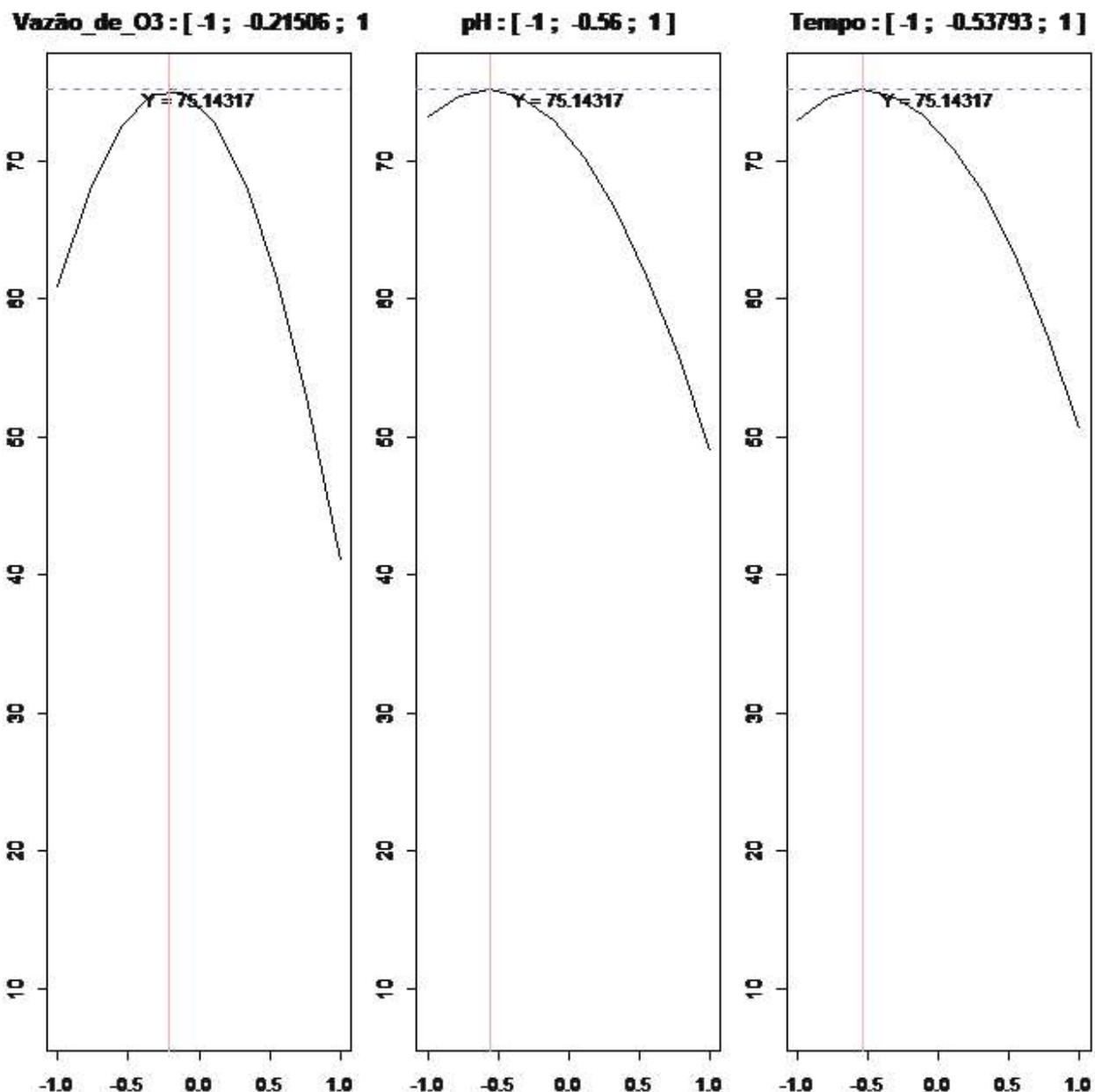
Figura 5 – Gráfico de superfície do percentual de remoção de DQO em função das variáveis estudadas: (a) Vazão de O₃ x pH; (b) pHxVazão de O₃; (c) tempo x Vazão de O₃.



Conforme Figuras 4 e 5, observa-se que os níveis estipulados foram muito parecidos tendo um melhor resultado entre o nível baixo, onde o percentual de remoção aproxima-se de 70%.

A Figura 6 apresenta o gráfico que demonstra os resultados do processo de otimização realizado a partir dos experimentos realizados. O processo de otimização foi realizado por meio do Método de Superfície de Resposta (MSR).

Figura 6 – Gráfico de otimização no Planejamento Experimental proposto.



De acordo com a Figura 9 o Método de Superfície de Resposta (MSR), para obter os melhores resultados os parâmetro devem ser mantidos entre o nível baixo e intermediário em todos os parâmetros. Sendo assim, o sistema estudado neste trabalho mostrou-se eficaz com 75% de remoção do parâmetro estudado, demonstrando ser uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes que contém altas concentrações de DQO.

CONCLUSÃO

Os ensaios preliminares definiram que o pH bruto obteve melhor resultado com a concentração de 523mg/L de tanino como as condições que obtiveram as melhores eficiências de remoção quanto aos parâmetros de DQO, cor e turbidez. Os ensaios com base no planejamento de experimentos no processo de

ozonização alcançaram a remoção da DQO com cerca de 76 %. A seguir algumas considerações relevantes para conclusão deste trabalho:

- De acordo com a tabela ANOVA, todas as variáveis apresentam e indicam um efeito significativo ao nível de 95% de confiança, assim pode-se afirmar que estes fatores exercem influência na variável resposta;
- O experimento nº 9 do planejamento experimental apresentou maior eficiência na remoção da DQO, cerca de 76 %, onde a vazão estava em nível intermediários, o pH e o tempo em nível baixo
- Para a otimização do processo, todos os parâmetros devem ser trabalhados entre o nível baixo e intermediário.

Referências

ALTMAN, S.J.; Jensen, R.P.; CAPPELLE, M.A.; SANCHEZ, A.L., EVERETT; R.L., ANDERSON, H.L.; MCGRATH, L.K., 2012. **Membrane treatment of side-stream cooling tower water for reduction of water usage**. *Desalination* 285, 177e183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.052>.

CASTRO-SILVA, M. A.; RORIG, L. R.; LAMB, L. H.; HECK, C. A.; DECUSATI, G. (2004). Microrganismos Associados ao Tratamento de Águas de Abastecimento com Coagulante Orgânico Vegetal (Tanato Quaternário de Amônio) – I. Microrganismos Filamentosos. **Revista Estudos de Biologia**, v. 26, n. 54, p. 21-27, jan./mar.2004.

CLEARY, J. G. A.G. P. E.; TIM, L.; PAUL, P.; 2014. **Trends in industrial water reuse. Pollut. Eng.** 30 e 32. de águas e efluentes na indústria – estudo de caso da Kodak Brasileira. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária; 2002.

GUNTEN, U. Von. Ozonation of drinking water : Part I . Oxidation kinetics and product formation. **Water Research**, v. 37, p. 1443–1467, 2003.

GUTTERRES, M.; AQUIM, P. M.; PASSOS, J. B.; TRIERWEILER, J. O., 2010. **Water reuse in tannery beamhouse process**. *J. Clean. Prod.* 18, 1545e1552. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.017>

HEY, G.; VEGA, S. R.; FICK, J.; TYSKLIND, M.; LEDIN, A.; JANSEN, J. C.; ANDERSEN, H. R. Removal of pharmaceuticals in WWTP effluents by ozone and hydrogen peroxide. **African Journal online**, v. 40, n. 1, p. 165–174, 2014.

KONRADT-MORAES, L. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G.; BONGIOVANI, M. C. ; HENNIG, D. (2007). **Avaliação da Eficiência de Remoção de Cor e Turbidez, Utilizando como Agente Coagulante os Taninos Vegetais, com a Finalidade de Obtenção de Água Tratada**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24., 2007, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2007. Disponível em: <<http://www.saneamento.poli.ufrj.br/documentos/24CBES/I-178.pdf>> Acesso em: 25 nov. 2009.

MATSUMURA, E. M.; MIERZWA, J. C.; 2008. **Water conservation and reuse in poultry processing plant: A case study. Resour. Conserv. Recycl** 52, 835 e 842. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.10.002>

MIERZWA, J. C. **O uso racional e o reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVA, S. S. T. **Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e de esgoto**. 1999. 87 p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública). Escola Nacional de Saúde Pública – Fundação Oswaldo Cruz, São Paulo, 1999.

WANG, Y.; CHU, K.H.; WANG, Z., 2014. **Two-step methodology for retrofit design of cooling water networks**. *Ind. Eng. Chem. Res.* 53, 274e286. <http://dx.doi.org/10.1021/ie400906r>