

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## OZONIZAÇÃO E ARRASTE DE GASES NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO

Raíssa Faria de Araújo<sup>1</sup>

\* Marcio Ricardo Salla<sup>1</sup>

Alessandra Maysa Araújo Rodrigues<sup>2</sup>

## OZONIZATION AND GAS STRIPPING IN POST-TREATMENT OF SANITARY EFFLUENT

Recibido el 2 de diciembre de 2018; Aceptado el 30 de abril de 2020

### Abstract

*The paper of the experimental objective focused on the post-treatment of sanitary effluent through ozonation and gas stripping by the bubbling of pure nitrogen, aiming at the removal of organic compounds. The sanitary effluent matrix comes from a sewage treatment plant that uses the UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) reactor as a secondary treatment followed by flocculation/flotation in a Flot-Flux type channel. As for the experimental configuration, in the ozonation were applied loads of 2.07, 5.38 and 7.15 gO<sub>3</sub>/h (surface application rates of 127.4, 382.2 and 636.9 L/min.m<sup>2</sup>, respectively) in a bubbling column to the contact times between the ascending bubbles and the liquid medium of 30 and 60 minutes. The same experimental configurations were adopted in the experiments of gas stripping from the injection of the inert gas N<sub>2</sub>. In the ozonation and gas stripping, respectively, there was an increase in pH values (10.4% ± 2.2 and 20.2% ± 1.0) and reductions in color (89.1% ± 4.1 and 42.4% ± 6.9), turbidity (68.3% ± 9.8 and 36.5% ± 18.6), COD (70.1% ± 8.9 and 35.5% ± 7.4) and ammoniacal nitrogen (10.8% ± 1.5 and 9.3% ± 0.5) parameters; however, nitrate was only raised in the ozonation tests (on the order of 6 times), remaining constant in the gas stripping. Statistical analysis Anova states that the analyzed parameters were not influenced by injected gas dosages, but only by contact times. Ozonation was able to promote the removal of organic compounds in the post-treatment of sanitary effluent, while the gas stripping technique was able to remove volatile organic compounds and free ammonia.*

**Keywords:** gas stripping, sanitary effluent, ozonation, post-treatment.

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

\* *Autor correspondente:* Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, Campus Santa Mônica, bloco 1Y - sala 237, CEP 38400-902, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.  
Email: [marcio.salla@ufu.br](mailto:marcio.salla@ufu.br)

## Resumo

O artigo de cunho experimental focou-se no pós-tratamento de efluente sanitário por meio de ozonização e arraste de gases, visando a remoção dos compostos orgânicos. O efluente sanitário matriz é proveniente de uma estação de tratamento de esgotos que utiliza como tratamento secundário o reator UASB seguido por floculação/flotação em canal tipo flot-flux. Quanto à configuração experimental, na ozonização foram aplicadas cargas de 2.07, 5.38 e 7.15 gO<sub>3</sub>/h (taxas de aplicação superficial de 127.4, 382.2 e 636.9 L/min.m<sup>2</sup>, respectivamente) em uma coluna de borbulhamento para os tempos de contato entre as bolhas ascensionais e o meio líquido de 30 e 60 minutos. As mesmas configurações experimentais foram adotadas nos experimentos de arraste de gases a partir da injeção do gás inerte N<sub>2</sub>. Na ozonização e arraste de gás, respectivamente, houve elevação nos valores de pH (10.4% ± 2.2 e 20.2% ± 1.0) e reduções nos parâmetros cor (89.1% ± 4.1 e 42.4% ± 6.9), turbidez (68.3% ± 9.8 e 36.5% ± 18.6), DQO (70.1% ± 8.9 e 35.5% ± 7.4) e amônia (10.8% ± 1.5 e 9.3% ± 0.5); no entanto, o nitrato elevou-se apenas nos ensaios de ozonização (na ordem de 6 vezes), mantendo-se constantes nos de arraste de gases. A análise estatística Anova afirma que os parâmetros analisados não sofreram influências das dosagens de gás injetadas, mas apenas dos tempos de contato. A ozonização foi capaz de promover a remoção dos compostos orgânicos, ao passo que a técnica de arraste de gases foi capaz de remover compostos orgânicos voláteis e amônia livre.

**Palavras chave:** arraste de gás, efluente sanitário, ozonização, pós-tratamento.

## Introdução

O tratamento de efluente doméstico e industrial é fundamental para garantir a qualidade da água nos corpos hídricos. De acordo com Cheng *et al.* (2011) e Capodaglio *et al.* (2015), o processo biológico é amplamente eficiente na remoção de compostos orgânicos solúveis e coloidais em efluentes domésticos e industriais. Diversos contaminantes orgânicos persistentes e microrganismos patogênicos são resistentes ao tratamento biológico, sendo descartados nos corpos receptores com conseqüente causa da morte de algumas espécies aquáticas. Além disso, as características bioacumulativas ao longo da cadeia alimentar podem, eventualmente, culminar em efeitos cancerígenos e mutagênicos nos seres humanos (Alvares *et al.*, 2001). Em decorrência disso, surge a necessidade de estudar técnicas alternativas de tratamento terciário, amplamente conhecidas como processos oxidativos avançados.

Dentro deste contexto, a ozonização tem grande aceitação visto que o gás ozônio é considerado um poderoso agente oxidante (Guimarães *et al.*, 2010; Salla *et al.*, 2011; Prieto-Rodríguez *et al.*, 2012; Knopp *et al.*, 2016) e desinfetante (Bilotta e Daniel, 2011; Silva e Daniel, 2015). De acordo com Rivas *et al.* (2009), o poder oxidativo e desinfetante do ozônio é otimizado a partir da combinação do gás com carvão ativado ou peróxido de hidrogênio ou radiação ultravioleta.

Entretanto, é válido ressaltar que a capacidade do ozônio em remover compostos orgânicos não se limita apenas à sua ação oxidativa, mas também pela ação do arraste de gases, conforme citam Wu *et al.* (1998), Salla (2006) e Soares (2007). Durante o processo de ozonização, no qual o contato do gás ozônio com o efluente ocorre por meio do borbulhamento, parte da fração volátil da matéria orgânica dissolvida no efluente é absorvida para o interior das bolhas e,

posteriormente, eliminada com o rompimento dessas bolhas na superfície líquida. Em função da carência de estudos mais detalhados na literatura da área, este artigo tem como objetivo avaliar a eficiência da ozonização e do arraste de gases (*gas stripping*) no pós-tratamento de efluente sanitário.

## Metodologia

### Aparato experimental

De acordo com a Figura 1, o aparato experimental é composto por (a) coluna de borbulhamento de gás (ozônio e nitrogênio puro), (b) gerador de ozônio, (c) frasco lavador de ozônio (*off-gas*) proveniente da coluna, (d) frasco lavador de ozônio (*off-gas*) proveniente do frasco coletor de espumas, (e) frasco coletor de espumas, (f) cilindro de oxigênio ou nitrogênio e (g) rotâmetro.

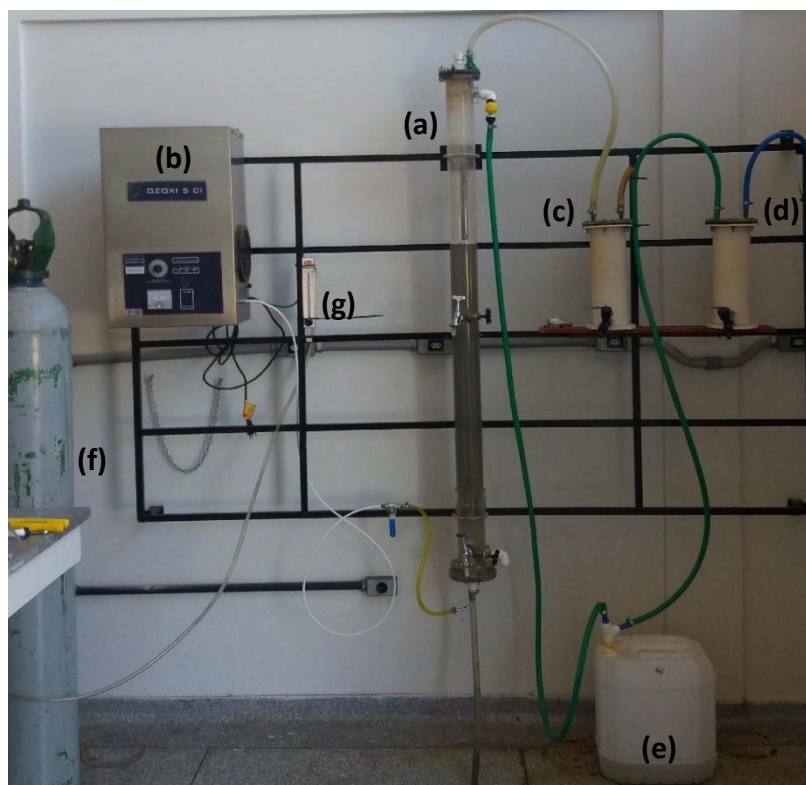


Figura 1. Aparato experimental

A coluna de borbulhamento é constituída de material acrílico transparente, seção transversal circular com 100 mm de diâmetro e 1.5 m de altura. Ao longo da altura da coluna foram instalados dois pontos para coleta de amostras posicionados a 0.1 e 0.7 m da base da coluna, todavia, para

todos os ensaios, as amostragens foram feitas no ponto superior. Na base da coluna foi fixado o difusor responsável pelo fornecimento das bolhas ascensionais, confeccionado em plástico microporoso (poros de 20  $\mu\text{m}$ ) com capacidade máxima de vazão em 3  $\text{m}^3/\text{h}$ . Já na parte superior da coluna existem duas aberturas, sendo uma para encher a coluna com efluente ou água para limpeza e outra para encaminhar o ozônio residual gasoso até os frascos lavadores (*off-gas*). É importante ressaltar que, na abertura para *off-gas*, foi utilizada uma tela para impedir que as espumas formadas durante o borbulhamento do gás da coluna chegassem até o frasco lavador de ozônio. Diante da quantidade excessiva de espuma gerada durante o borbulhamento na coluna, optou-se por utilizar um recipiente que permitisse a coleta e promovesse o acúmulo de tais espumas sem intercorrências para o sistema.

O equipamento gerador de ozônio utiliza o efeito corona (mecanismo de descarga elétrica) na produção do ozônio. Optou-se por utilizar o oxigênio puro como fonte de alimentação do equipamento, uma vez que ocasiona o maior rendimento na ozonização. Com relação à capacidade real de produção de ozônio, utilizou-se os dados de calibração de Mendonça et al. (2017). Os autores obtiveram as capacidades de produção em função da vazão de oxigênio injetada no difusor de 2.07  $\text{gO}_3/\text{h}$  para a vazão de 1 L/min, 5.38  $\text{gO}_3/\text{h}$  para a vazão de 3 L/min e 7.15  $\text{gO}_3/\text{h}$  para a vazão de 5 L/min. Para fixar as vazões de ozônio e nitrogênio injetadas no difusor foi utilizado um rotâmetro graduado de 0.5 a 5.0 L/min.

A parcela de ozônio que não reagiu com a fração líquida no interior da coluna de borbulhamento foi conduzida para os frascos lavadores. Como se trata de um gás tóxico, foi necessária a quebra de suas moléculas para a sua posterior liberação na atmosfera. Para isto, os frascos lavadores foram preenchidos com solução de iodeto de potássio (KI) a 2%. O excesso de ozônio foi quantificado a partir do método iodométrico (APHA, 1998).

De acordo com Salla (2006), a prática laboratorial sugere que sejam colocados 2 frascos lavadores de gás dispostos em série, no intuito de garantir que a parcela de ozônio não eliminada no primeiro frasco seja eliminada no segundo frasco. Todavia, diante das condições operacionais, não foi possível atender tal sugestão, sendo utilizado um único frasco para recolher o ozônio residual gasoso proveniente da coluna e outro para recolher a parcela de ozônio não reacional proveniente do frasco coletor de espumas (ver Figura 1).

A matriz efluente utilizada gera uma quantidade de espuma considerável como consequência do borbulhamento na coluna, similar ao constatado por Salla (2006) e Soares (2007). Estas espumas contêm elevada concentração de sólidos dissolvidos e suspensos adsorbidos que, caso não sejam eliminadas prontamente, retornam à massa líquida após seu peso próprio resultar superior à força ascensional das bolhas.

Alguns testes preliminares com terra diatomácea e antiespumante AF 130 foram realizados para tentar eliminá-las. Todavia, a dificuldade em manter uma padronização quantitativa (no caso da terra diatomácea) e as alterações nas características orgânicas do efluente bruto (no caso do antiespumante AF 130) inviabilizaram os seus usos, o que trouxe a necessidade de instalação do frasco coletor de espumas em PEAD com capacidade de 25 L.

### Configurações experimentais

#### Ozonização

Foi utilizado o oxigênio com pureza de 99.995%, acondicionado em cilindro de alta pressão, como fonte de alimentação do gerador de ozônio e os ensaios foram realizados em batelada. Fixou-se o nível líquido na coluna em 1 m (volume total de 7.85 L), variou-se a carga de ozônio aplicada em 2.07 gO<sub>3</sub>/h (1 L/min), 5.38 gO<sub>3</sub>/h (3 L/min) e 7.15 gO<sub>3</sub>/h (5 L/min) e fixou-se os tempos de contato em 0, 30 e 60 min para cada carga de ozônio aplicada. O tempo nulo corresponde ao efluente bruto coletado na estação depuradora. Os volumes amostrais foram de 120 e 270 mL para os tempos de contato de 30 e 60 min, respectivamente.

#### Arraste de gás

Para os ensaios também em batelada e com as mesmas configurações da ozonização, foi borbulhado o nitrogênio com pureza de 99.995%, acondicionado em cilindro de alta pressão, para a promoção do arraste de compostos voláteis na coluna. Souto (2009) menciona a importância de recuperar a amônia removida durante o arraste, tendo em vista o potencial de causar a poluição do ar e problemas à saúde humana. Os frascos lavadores foram descartados em função das baixas concentrações de amônia.

#### Parâmetros físico-químicos

Os parâmetros analisados (mais metodologia e numeração de quantificação segundo APHA - 2005) foram: pH (potenciométrico, 4500-H<sup>+</sup>), cor (espectrofotométrico, 2120 C), turbidez (nefelométrico, 2130 B), demanda química de oxigênio DQO (colorimétrico por refluxo fechado, 5220 D), amônia (destilação seguida da nesslerização, 4500-NH<sub>3</sub>) e nitrato (método do ácido fenoldissulfônico, 4500-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). As análises foram realizadas em triplicata.

As análises de nitrato e nitrogênio amoniacal foram realizadas somente nos tempos de contato 0 e 60 min. Em função do limite de detecção do equipamento, as análises de nitrato foram realizadas a partir do volume real (sem diluições). Com isso, o volume retirado da coluna de 150 mL (em triplicata para cada tempo de contato) inviabilizou a coleta no tempo de 30 minutos em função da redução drástica do nível líquido. Neste contexto, é pertinente salientar que a diminuição do nível líquido interfere na hidrodinâmica da coluna e, conseqüentemente, na eficiência de transferência de massa gás/líquido.



### Análises estatísticas

Foram realizadas as análises estatísticas no intuito de avaliar a existência ou não de diferenças significativas nos valores médios dos parâmetros físico-químicos em função das cargas e vazões aplicadas de gás (ozônio e nitrogênio) e os tempos de contato. Aplicou-se o método estatístico *Analyse of Variance* (ANOVA). Foram testadas duas hipóteses no método ANOVA: hipótese nula ( $H_0$ ), na qual as médias de remoção são consideradas iguais para uma dada variável (cargas/vazões ou tempos de contato); hipótese alternativa ( $H_1$ ), na qual as médias de remoção são consideradas diferentes para uma dada variável (cargas/vazões ou tempos de contato). Assim, para validar uma das hipóteses, estabeleceu-se o nível de significância de 5%.

### Resultados

As características do efluente bruto utilizado nos dez ensaios de ozonização e arraste de gás estão ilustradas na Tabela 1. Apesar do efluente apresentar características diferentes em cada coleta, em cinco ensaios foram utilizadas a mesma matriz na ozonização e arraste de gás, que trouxe aproximação nas características médias do efluente bruto. As amostras de efluente foram coletadas a jusante do canal de floculação/flotação tipo Flot-Flux por meio de balde coletor de efluente com capacidade de 10 litros e acondicionadas em recipientes do tipo polietileno de alta densidade (PEAD) com capacidade de 25 L.

**Tabela 1.** Características do efluente bruto

Parâmetros	Ozonização			Arraste de gás		
	Mínimo	Máximo	Média ± Desv. Pad.	Mínimo	Máximo	Média ± Desv. Pad.
pH	7.0	7.4	7.1 ± 0.1	6.9	7.1	7.1 ± 0.1
Cor (mg Pt-Co/L)	66.3	304.7	158.2 ± 59.8	72.0	215.7	149.8 ± 53.4
Turbidez (UNT)	24.7	70.9	45.4 ± 9.9	29.8	55.1	43.3 ± 9.3
DQO (mg/L)	104.6	387.2	218.5 ± 65.9	149.5	319.5	230.0 ± 66.9
Amônia (mg/L)	26.4	47.9	36.4 ± 4.8	30.9	38.7	34.7 ± 2.7
Nitrato (mg/L)	0.1	0.3	0.2 ± 0.1	0.1	0.3	0.2 ± 0.1

A Figura 2 traz as porcentagens de variações (remoção e aumento) dos parâmetros na ozonização e arraste de gás. Uma visão geral da Figura 2 esclarece que as cargas de ozônio e vazões de nitrogênio puro injetadas na coluna de borbulhamento não influenciaram nas remoções dos parâmetros analisados. Isso foi causado pela reduzida lâmina líquida de 1 m fixada em todos os ensaios. Com esta lâmina líquida, o tempo de contato entre as bolhas ascensionais e o meio líquido foram insuficientes para otimizar a eficiência de transferência de massa gás-líquido. O ozônio residual encontrado nos frascos lavadores (*off-gas*), próximo a 20% do ozônio aplicado, comprova a limitação da configuração experimental adotada.

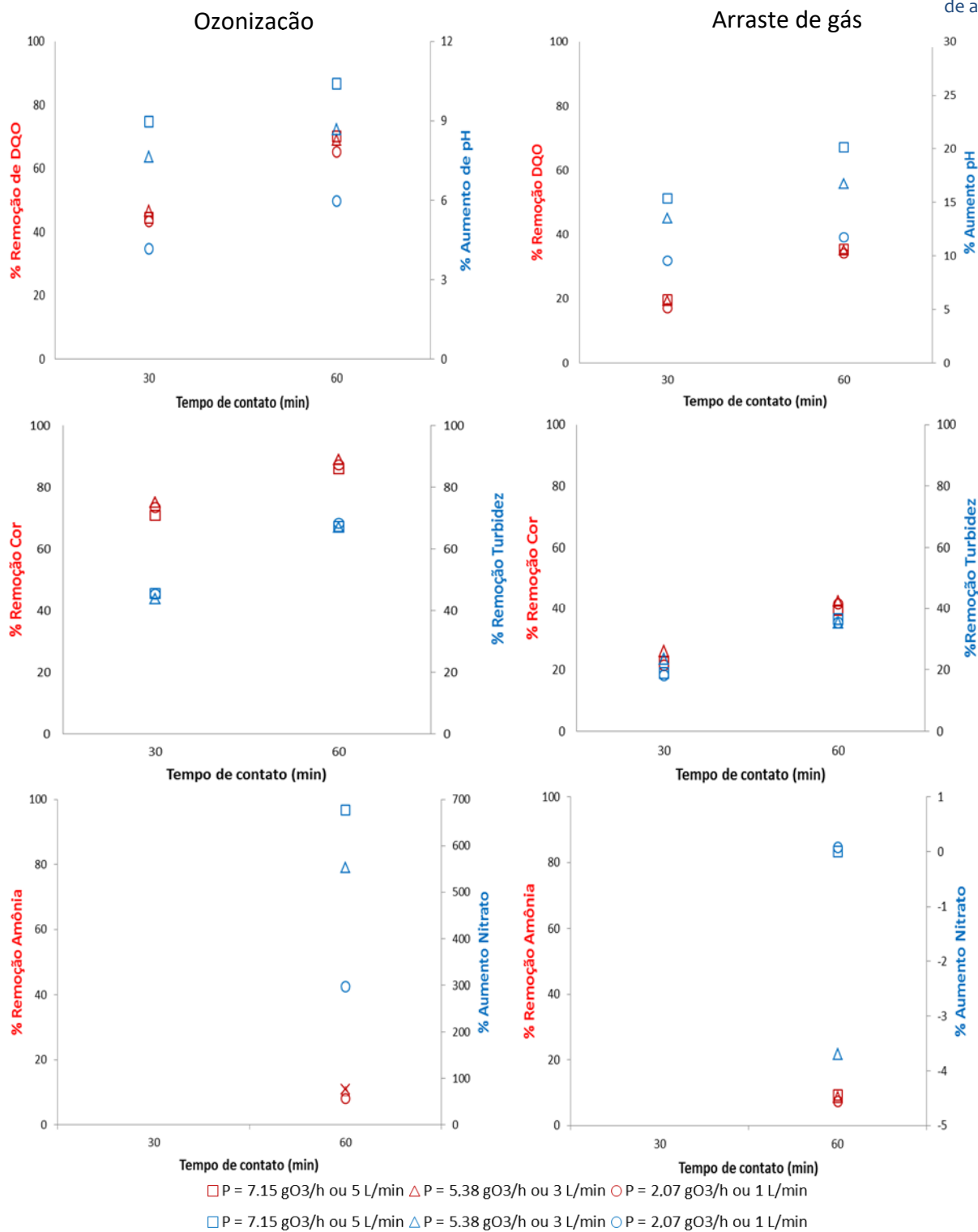


Figura 2. Porcentagens de variações dos parâmetros na ozonização e arraste de gás

Tais constatações são fundamentadas na análise estatística. Respectivamente, na ozonização e arraste de gás, os termos  $p$  do método Anova forneceram valores superiores a 0.05 e iguais a 0.2560 e 0.1377 para o pH, 0.3026 e 0.0630 para a DQO, 0.2766 e 0.8326 para a cor, 0.5385 e 0.3231 para a turbidez, 0.2998 e 0.8750 para a amônia e 0.5030 e 0.5625 para o nitrato. Todavia, ainda de acordo com a Figura 2 e com os termos  $p$  do método estatístico Anova inferiores a 0.05, afirma-se que o tempo de contato entre as bolhas ascensionais e o meio líquido influenciou na remoção dos parâmetros, exceção ao nitrato no arraste de gás ( $p$  igual a 0.4226). Respectivamente, na ozonização e arraste de gás, os termos  $p$  foram iguais a 0.0033 e 0.0017 para o pH,  $5.09 \cdot 10^{-6}$  e  $4.64 \cdot 10^{-6}$  para a DQO,  $4.14 \cdot 10^{-7}$  e  $5.85 \cdot 10^{-5}$  para a cor,  $1.98 \cdot 10^{-5}$  e  $9.48 \cdot 10^{-5}$  para a turbidez, 0.0088 e 0.0050 para a amônia e 0.0424 para o nitrato. A sequência traz uma discussão individualizada dos parâmetros.

### pH

Para todas as cargas de ozônio e vazões de nitrogênio puro injetadas na coluna nota-se uma elevação progressiva do pH ao longo do tempo de contato, alcançando valores máximos entre 8 e 8.5. De acordo com Lei e Li (2014), o borbulhamento do  $O_3$  e  $N_2$  na massa líquida ocasiona o *stripping* de  $CO_2$  e, conseqüentemente, as reações de equilíbrio do ácido carbônico ficam comprometidas, acarretando a redução dos íons  $H^+$ . Ainda segundo Lei e Li (2014), em condições básicas, fato observado em todos os ensaios de ozonização, os íons bicarbonato e carbonato podem reagir com o radical hidroxila e produzir o íon hidroxila que, por sua vez, proporciona o aumento do pH. O aumento do pH com o tempo de exposição ao ozônio também foi observado por Soares (2007), Lei e Li (2014), Silva e Daniel (2015) e Camilo Júnior (2018).

### DQO

As máximas remoções de DQO após 60 minutos de ozonização e arraste de gás foram, respectivamente, de 70.1% e 35.5% (ver Figura 2). Segundo Beltrán (2004), o ozônio pode oxidar os compostos orgânicos por meio de reações direta ou indireta, sendo que a atuação destas é definida basicamente pelo pH do meio, a natureza e a concentração dos poluentes presentes no efluente sanitário. Além disso, é importante ressaltar que a remoção de DQO pode estar associada não somente à oxidação, como também ao fenômeno de arraste de gases orgânicos (*gas stripping*), por exemplo, do gás metano e amônia. Tal consideração também foi relatada por Wu et al. (1998), Salla (2006) e Soares (2007).

No processo de ozonização em efluente com pH próximo a 7, de acordo com Gottschalk et al. (2000) e Mahmoud e Freire (2007), as reações direta e indireta são responsáveis pela degradação dos compostos orgânicos. No presente estudo, como o pH do efluente bruto estudado apresentou um valor médio de 7.14, acredita-se que, a partir da reação direta, o ozônio molecular foi responsável pela degradação de compostos com grupos funcionais específicos (anéis aromáticos, hidrocarbonetos insaturados, etc), cujos subprodutos intermediários gerados



(aldeídos, cetonas, álcoois e ácidos), considerados mais resistentes ao ataque, foram degradados pelos radicais hidroxila, por meio da reação indireta.

Já a técnica de arraste a partir do borbulhamento de um gás inerte ocasiona a eliminação de compostos orgânicos voláteis e de nitrogênio amoniacal na presença de íons cloreto (Ferraz, 2010; Souto, 2009). Segundo Aquino et al. (2006), íons cloretos com concentração de 1000 mg/L no meio líquido podem ser oxidados a cloro molecular ( $\text{Cl}_2$ ) e este, por sua vez, pode interagir com íons amônio e formar as cloraminas. As cloraminas podem ser oxidadas pelo dicromato de potássio e, assim, detectadas pelo parâmetro DQO. Diante disso, verifica-se que remoções de amônia durante o processo de arraste de um gás inerte impossibilita a formação das cloraminas e, conseqüentemente, pode ocasionar a redução de DQO.

As concentrações de íons de cloreto em efluente sanitário são baixas (30 a 100 mg/L), de acordo com Aquino et al. (2006). Com isso, não se pode associar as remoções de DQO obtidas no presente estudo ao fenômeno da remoção de amônia, mas somente ao fenômeno de arraste de compostos orgânicos voláteis.

#### Cor

As máximas remoções de cor após 60 minutos de ozonização e arraste de gás foram, respectivamente, de 89.1% e 42.4% (ver Figura 2). As principais substâncias capazes de conferir cor ao efluente são provenientes de compostos aromáticos. A atuação do ozônio sob esses compostos se dá a partir do ataque direto sobre as ligações insaturadas, destruindo-as e gerando novos compostos como ácidos alifáticos, cetonas e aldeídos; promovendo, assim, a redução da cor do efluente (Gottschalk et al., 2000; Cheng et al., 2011).

#### Turbidez

As máximas remoções de turbidez após 60 minutos de ozonização e arraste de gás foram, respectivamente, de 68.3% e 36.5% (ver Figura 2), próximas às remoções obtidas por Petala et al. (2006) e Camilo Júnior (2018). De acordo com Marce et al. (2016), o ozônio pode atacar as partículas sólidas da matéria orgânica logo no início da reação, promovendo uma diminuição no teor de sólidos e, conseqüentemente, uma rápida redução na turbidez. Além disso, durante o borbulhamento ascensional do gás ozônio, as partículas sólidas em suspensão podem aderir às bolhas e, por conseguinte, ser transportadas até a superfície líquida, sendo removidas pelo fenômeno da flotação. De acordo com Salla et al (2011) e Pinheiro (2014), as remoções de turbidez pelo processo de arraste também estão associadas ao fenômeno da flotação. A partir dos resultados obtidos, pode-se inferir que, durante a ozonização, a remoção da turbidez ocorreu tanto pela oxidação da matéria orgânica quanto pela flotação, não havendo preponderância na atuação dos respectivos mecanismos.

### Amônia

As máximas remoções de amônia após 60 minutos de ozonização e arraste de gás foram, respectivamente, de 10.8% e 9.3% (ver Figura 2). De acordo com Wang e Pai (2001) e Domenjoud, et al. (2011), a ozonização é capaz de oxidar a amônia não ionizada, sendo esta dependente do pH do meio reacional. A amônia se encontra na forma livre em valores de pH acima de 7, podendo ser removida pelo ozônio por meio da reação direta ou indireta (Hoigné e Bader, 1978). O valor médio do pH das amostras de efluente bruto se encontrava acima de 7 e, durante todo o processo de ozonização, os valores de pH se elevaram, independentemente da carga de ozônio aplicada, o que implica que havia disponibilidade da amônia livre passível de ser oxidada. Além disso, como os referidos valores se encontravam na faixa entre 7 e 8 durante a ozonização, acredita-se que a amônia livre pode ter sido oxidada por meio de reações diretas.

Conforme Metcalf & Eddy (2014), a técnica de arraste de gases tem como um dos propósitos promover a remoção da amônia da fase líquida para a fase gasosa a partir do contato com um gás de arraste, entretanto, para que isto ocorra é necessário que esta se encontre sob a forma de amônia livre. Assim, com base nos resultados obtidos, nota-se que houve remoção de amônia, visto que os valores médios de pH se elevaram para todas as vazões de gás aplicadas, permitindo, assim, que houvesse a presença da amônia livre passível de ser removida.

### Nitrato

De acordo com a Figura 2, observa-se a formação de nitrato durante a ozonização, elevando entre 3 e 7 vezes o valor do efluente bruto. Segundo Wang e Pai (2001) e Singer e Zilli (1975), o ozônio é capaz de oxidar completamente a amônia e formar o nitrato na mesma proporção. Todavia, a partir dos resultados referentes à amônia e nitrato, verifica-se que, em todas as cargas de ozônio aplicadas, a concentração de nitrato não foi correspondente à diminuição na concentração de amônia. Segundo Eusebi e Battistoni (2016) e Khuntia et al. (2013), a explicação para este fenômeno se deve possivelmente à presença de íons brometo ( $\text{Br}^-$ ) no efluente, que reage com o ozônio e forma o ácido hipobromoso (HOBr). Este, por sua vez, reage com a amônia livre e converte em gás nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) diretamente.

O processo de *gas stripping* não promoveu nenhuma influência nos resultados de nitrato (ver Figura 2). Conforme citado anteriormente, a amônia é passível de ser removida do meio líquido a partir da aplicação da técnica de arraste de gás, desde que esta se encontre sob a forma de amônia livre. Ou seja, a remoção da amônia não ocorre por meio da conversão em subprodutos, mas apenas pela transferência de massa entre estados físicos (fase líquida para fase gasosa), consequentemente, não se tem formação de nitrato ao longo do processo.

## Conclusões

A partir do aparato e configuração experimental, pode-se concluir que:

- A ozonização foi eficiente na remoção de DQO, cor e turbidez. As reações oxidativas direta e indireta do ozônio são acompanhadas pelo fenômeno de arraste de gases na remoção da DQO;
- O borbulhamento do gás inerte nitrogênio puro foi eficiente na remoção de compostos orgânicos voláteis;
- O tempo de contato entre as bolhas ascensionais e a massa líquida foi fundamental na eficiência de remoção de poluentes.

## Referências bibliográficas

- APHA (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, Washington, D. C. USA.
- Aquino, S. F., Silva, S. Q., Chernicharo, C. A. L. (2006) Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **11**(4), 295-304.
- Alvares, A. B. C., Diaper, C., Parsons, S. A. (2001) Partial Oxidation by Ozone to Remove Recalcitrance from Wastewaters - a Review, *Environmental Technology*, **22**(4), 409-427.
- Bilotta, P., Daniel, L. A. (2011) Inativação de indicadores microbiológicos com ozônio no tratamento de esgoto sanitário visando o reuso de água, *Revista Aidis*, **4**(2), 48-56.
- Camilo Júnior, O. B. (2018) *Ozonização como pós-tratamento de efluente de esgoto doméstico*, Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 52 pp.
- Capodaglio, A. G., Hlavínek, P., Raboni, M. (2015) Physico-chemical technologies for nitrogen removal from wastewaters: a review, *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, **10**(3), 481-498.
- Cheng, L. H., Bi, X. J., Jiang, T. T., Liu, C. Q. (2011) Effect of Ozone Enhanced Flocculation on the Treatment of Secondary Effluent, *Procedia Environmental Sciences*, **10**, 555-560.
- Domenjoud, B., Tatari, C., Esplugas, S., Baig, S. (2011) Ozone-Based Processes Applied to Municipal Secondary Effluents, *Ozone: Science & Engineering*, **33**(3), 243-249.
- Eusebi, A. L., Battistoni, P. (2016) The ozone treatment for nitrogen removal from liquid wastes at high salinity: full-scale optimization and economical aspect, *Ozone: Science & Engineering*, **38**(3), 219-224.
- Ferraz, F. M. (2010) *Recuperação da amônia liberada no processo de "air stripping" aplicado ao tratamento do lixiviado de aterros sanitários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 128pp.
- Gottschalk, C., Libra, J. A., Saupe, A. (2000) *Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its application*, Wiley-VCH, Weinheim, 189 pp.
- Guimarães, J. R., Junior, R. L. A., Maniero, M. G., Fadini, P. S. (2010) Ozonização em meio básico para redução de cor do licor negro de indústria de celulose de algodão, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **15**(1), 93-98.
- Hoigne, J., Bader, H. (1978) Ozonation of water: kinetics of oxidation of ammonia by ozone and hydroxyl radicals, *Environmental Science & Technology*, **12**, 79-84.
- Knopp, G., Prasse, C., Ternes, T., Cornel, P. (2016) Elimination of micropollutants and transformation products from a wastewater treatment plant effluent through pilot scale ozonation followed by various activated carbon and biological filters, *Water Research*, **100**, 580-592.
- Khuntia, S., Majumder, S. K., Ghosh, P. (2013) Removal of ammonia from water by ozone microbubbles, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **52**(1), 318-326.

- Lei, L., Li, Y. (2014) Effect of ozonation on recalcitrant chemical oxygen demand (COD), color and biodegradability of Hardwood Kraft Pulp (KP) Bleaching Effluent, *BioResources*, **9**(1),1236-1245.
- Mahmoud, A., Freire, R. S. (2007) Métodos emergentes para aumentar a eficiência do ozônio no tratamento de águas contaminadas, *Química Nova*, **30**(1), 198-205.
- Marce, M., Domenjoud, B., Esplugas, S., Baig, S. (2016) Ozonation treatment of urban primary and biotreated wastewaters: Impacts and modeling, *Chemical Engineering Journal*, **283**, 768-777.
- Mendonça, M. Z. M., Silva, A. M., Aguiar, C. M. A., Salla, M. R. (2017) Análise do processo de ozonização para tratamento de esgoto sanitário sintético, en *IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade*, Editora Blucher, São Paulo, 1-10.
- Metcalfe, L., Eddy, H. P. (2014) *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*, 5a ed., McGraw-Hill Education, New York, 2018 pp.
- Petala, M. P. (2006) Wastewater reclamation by advanced treatment of secondary effluents, *Desalination*, **195**(1), 109-118.
- Pinheiro, A. M. (2014) *Pós-tratamento de efluente saneante domissanitário por ozonização convencional e catalítica*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 175 pp.
- Prieto-Rodríguez, L., Oller, I., Klammerth, N., Agüero, A., Rodríguez, E. M., Malato, S. (2013) Application of solar AOPs and ozonation for elimination of micropollutants in municipal wastewater treatment plant effluents, *Water Research*, **47**(4), 1521-1528.
- Rivas, J., Gimeno, O., Beltrán, F. (2009) Wastewater recycling: Application of ozone based treatments to secondary effluents, *Chemosphere*, **74**(6), 854-859.
- Salla, M. R. (2006) *Sistema de ozonização em esgoto de reator anaeróbico: Estudo da hidrodinâmica e das respostas oscilantes de DQO*, Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 446 pp.
- Salla, M. R., Pereira, C. E., Pinheiro, A. M., Magalhães, A. A. B., Andrade Júnior, P. S. (2011) Interferência de partículas sólidas na transferência de massa ar/água em coluna de aeração, *Ciência & Engenharia*, **20**(2), 01-10.
- Silva, G. H. R., Daniel, L. A. (2015) Desinfecção de efluente anaeróbico com o uso de ozônio/cloro, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **20**(2), 279-288.
- Singer, P. C., Zilli, W. B. (1975) Ozonation of ammonia in wastewater, *Water Research*, **9**(2), 127 -134.
- Soares, L. V. (2007) *Ozonização de esgoto sanitário: estudo da hidrodinâmica, transferência de massa e inativação de microorganismos indicadores*, Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 285 pp.
- Souto, G. D. B. (2009) *Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processos de arraste com ar (stripping)*, Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 371 pp.
- Wang, G. S., Pai, S. Y. (2001) Ozonation of dissolved organic matter in biologically treated wastewater effluents, *Ozone: Science & Engineering*, **23**(5), 351-358.
- Wu, J. J., Park, S., Hengemuehle, S. M., Yokoyama, M. T., Person, H. L., Masten, S. J. (1998) The Effect of Storage and Ozonation on the Physical, Chemical, and Biological Characteristics of Swine Manure Slurries, *Ozone: Science & Engineering*, **20**(1), 35-50.