



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades

unesp 


Mestrado

---

Engenharia Civil e Ambiental

**NATHALIE DYANE MIRANDA**

**OZONIZAÇÃO E PEROXIZAÇÃO DE EFLUENTE SANITÁRIO  
PROVENIENTE DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS E REATOR  
COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO VISANDO REUSO**



Bauru  
2014

**NATHALIE DYANE MIRANDA**

**OZONIZAÇÃO E PEROXIZAÇÃO DE EFLUENTE SANITÁRIO  
PROVENIENTE DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS E REATOR  
COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO VISANDO REUSO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

**Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva**

Bauru  
2014

Miranda, Nathalie Dyane.

Ozonização e peroxização de efluente sanitário  
proveniente de alagados construídos e reator  
compartimentado anaeróbio/aeróbio visando reuso/  
Nathalie Dyane Miranda, 2014  
164 f. Il

Orientador: Gustavo Henrique Ribeiro da  
Silva

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Desinfecção. 2. Ozônio. 3. Peroxônio. I.  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE NATHALIE DYANE MIRANDA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 02 dias do mês de julho do ano de 2014, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. JORGE HAMADA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. LUIZ ANTONIO DANIEL do(a) Departamento de Hidráulica e Saneamento / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de NATHALIE DYANE MIRANDA, intitulada "DESINFECÇÃO DE EFLUENTE SANITÁRIO PROVENIENTE DE UMA NOVA CONFIGURAÇÃO DE REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO UTILIZANDO OZÔNIO E PEROXÔNIO". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA \_\_\_\_\_. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA

  
Prof. Dr. JORGE HAMADA

  
Prof. Dr. LUIZ ANTONIO DANIEL



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru

### PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:  
NATHALIE DYANE MIRANDA

DE: "DESINFECÇÃO DE EFLUENTE SANITÁRIO PROVENIENTE DE UMA NOVA  
CONFIGURAÇÃO DE REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO UTILIZANDO  
OZÔNIO E PEROXÔNIO"

PARA:

OZONIZAÇÃO E PEROXIZAÇÃO DE EFLUENTE SANITÁRIO PROVENIENTE  
DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS E REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/  
AERÓBIO VISANDO REUSO

Bauru, 02 de julho de 2014.

  
Prof. Dr. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva  
Orientador



Faculdade de Engenharia de Bauru – Pós-graduação  
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01 17033-360 Bauru - SP  
tel. (14) 3103-6108 spg@feb.unesp.br www.feb.unesp.br

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda força e coragem durante a confecção deste trabalho e por iluminar meu caminho;

À FAPESP pela concessão da bolsa de estudos nº 2012/05297-9 durante o Mestrado e ao auxílio pesquisa nº 2011/10816-2;

A minha família por todo apoio e confiança depositada em mim. Especialmente a minha mãe por ter feito de tudo pela minha educação;

Ao Pedro, por ter aguentado todo o meu estresse, meu nervoso e meus medos; por ter sempre me incentivado, acreditado em mim, por ter me acalmado e por estar ao meu lado;

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva pela oportunidade e pelos conhecimentos transmitidos durante sua orientação, e por sempre estar disposto a me atender quando solicitado;

Aos professores Jorge Hamada, Ronan Cléber Contreira e Luiz Antonio Daniel pela participação na banca e por todo conhecimento transmitido.

As companheiras de mestrado Julliana, Karoline, Mônica e Gabriela pela ajuda com as análises e pelos momentos de risadas e descontração;

Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Meu MUITO OBRIGADO!!!

*“O que não provoca minha morte faz com que eu fique mais forte”.*

*(Friedrich Nietzsche)*

*“Não quero ser um gênio... Já tenho problemas suficientes ao tentar ser um homem”.*

*(Albert Camus)*

## RESUMO

MIRANDA, N. D. **Ozonização e peroxização de efluente sanitário proveniente de alagados construídos e reator compartimentado anaeróbio/aeróbio visando reuso.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Faculdade de Engenharia de Bauru. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”.

Esta pesquisa teve por objetivo principal estudar a desinfecção de esgoto sanitário proveniente do tratamento de uma nova configuração de um reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e de alagados construídos, utilizando o ozônio e peróxido. Avaliaram-se como estes atuam no processo de oxidação e inativação de coliformes totais e *Escherichia coli*, comparando suas eficiências e a formação do formaldeído, que é principal aldeído formado durante a aplicação de ozônio e peróxido para desinfecção. A formação de formaldeído foi fortemente dependente da dose de ozônio, porém um tempo de contato maior também favoreceu uma maior formação de formaldeído, mesmo que não significativa segundo os testes estatísticos aplicados. Os ensaios de peroxização com uma dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  promoveram uma média de formação de formaldeído maior que quando apenas aplicando somente a mesma dose de ozônio. Com uma dose de 8 e  $10 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ , a formação de formaldeído foi em geral menor que quando aplicada somente a mesma dose de ozônio. Ou seja, doses maiores de ozônio durante a peroxização favoreceram uma menor concentração de formaldeído no efluente final. Todos os ensaios de ozonização e peroxização promoveram concentrações de formaldeído que estavam dentro do limite imposto pela OMS (água potável). Tanto para o efluente proveniente dos A.C. quanto do reator compartimentado, doses maiores de ozônio ou um tempo de contato maior não favoreceu uma inativação significativamente maior. A inativação de *E. coli*, no efluente proveniente do reator compartimentado, não foi superior ao se adicionar peróxido de hidrogênio. Já a inativação de coliformes totais foi na maioria dos testes superior aos resultados encontrado quando aplicado somente ozônio, sendo que o consumo de ozônio durante a peroxização foi menor que na ozonização. Pode assim concluir que a adição de peróxido de hidrogênio foi favorável à inativação de coliformes totais. Para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio com a aplicação apenas de ozônio foi necessária uma dose de  $8 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  para que o efluente se enquadre para reuso agrícola. Todos os ensaios de peroxização promoveram um efluente adequado para reuso agrícola em termos de coliformes fecais. Assim a dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  e  $1 \text{ mg H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$  foi suficiente para que o efluente proveniente do reator compartimentado se enquadrasse para reuso agrícola, ou seja, menor que a usada quando da aplicação apenas de ozônio. Deste modo pode concluir que a adição de peróxido de hidrogênio foi favorável na inativação de coliformes. O tempo de contato não influenciou a inativação, já que o enquadramento para reuso agrícola em todos os ensaios de desinfecção foi atingido no menor tempo de contato aplicado, indicando que a dose correta dos desinfetantes foi mais importante.

Palavras-chaves: Desinfecção, Efluente Sanitário, Ozônio, Peróxido de Hidrogênio, Reuso, Subprodutos.



## ABSTRACT

MIRANDA, N. D. **Ozonation and peroxidation of sanitary effluent from constructed wetlands and anaerobic baffled reactor/aerobic aiming reuse.** 2014. Dissertation (Master in Civil and Environmental Engineering). Bauru School of Engineering. Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho".

This research was aimed to study the disinfection of wastewater from treatment by a new configuration of an anaerobic/aerobic baffled reactor and by constructed wetlands, using ozone and peroxone. Were evaluated how these processes acted in the oxidation and inactivation of total coliforms and *Eschechia coli*, comparing their efficiency and formation of formaldehyde, which is the main aldehyde formed during the application of ozone and peroxone for disinfection. The formation of formaldehyde was strongly dependent on the dose of ozone, but a longer contact time also favored an increased in the formation of formaldehyde, even not significant according to the statistical tests applied. Peroxidation tests with a dose of 5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> promoted a higher average formation of formaldehyde than when applying only just the same dose of ozone. For doses of 8 and 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, the formation of formaldehyde was generally smaller than when applied just the same dose of ozone. I.e., higher ozone doses during peroxidation favored a lower formaldehyde concentration in the final effluent. All tests ozonation and peroxidation promoted formaldehyde concentrations that were within the limit imposed by WHO (drinking water). For both the effluent from the C.W. as the anaerobic/aerobic baffled reactor, higher ozone doses or a longer contact time did not favor a significantly higher inactivation. Inactivation of *Escherichia coli* in effluent from the anaerobic/aerobic baffled reactor was no better when added hydrogen peroxide. The inactivation of total coliforms was higher in most of the tests when applied just ozone, and the consumption of ozone during peroxidation was lower than in ozonation tests. This way, is possible to conclude that the addition of hydrogen peroxide was favorable to the inactivation of total coliforms. For the effluent from the anaerobic/aerobic baffled reactor only with the application of ozone was required a dose of 8 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> for the effluent fits for agricultural reuse. All tests peroxidation promoted a effluent that fits for agricultural reuse in terms of fecal coliform. Thus 5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> and 1 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> was sufficient to promoted a effluent that fits for agricultural reuse, that is, lower than necessary when was applied just ozone. Thus, it can be concluded that the addition of hydrogen peroxide was favorable in the inactivation of coliform. The contact time did not influence the inactivation, because the fits for agricultural reuse in all trials disinfection was achieved in the lower contact time applied, indicating that the correct dose of disinfectant was most important.

Key Words: Disinfection, Sanitary Effluent, Ozone, Hydrogen Peroxide, Reuse, Byproducts.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Exemplo de reator compartimentado anaeróbio. ....	9
Figura 3.2: Exemplo de reator anaeróbio compartimentado. ....	9
Figura 3.3: Esquema dos Alagados Construídos. ....	12
Figura 3.4: Esquema do Processo Corona para Geração de Ozônio. ....	17
Figura 4.1: Grade. ....	33
Figura 4.2: Tanque de equalização e tanque de sedimentação. ....	34
Figura 4.3: (A) Vista superior do tanque instalado. (B) Tanque semelhante ao que foi instalado. ....	34
Figura 4.4: Reservatório para controle de vazão. ....	35
Figura 4.5: Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio. ....	36
Figura 4.6: Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio em planta (medidas em metro). ....	36
Figura 4.7: Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio em perfil (medidas em metro). ....	37
Figura 4.8: Difusor microporoso instalado no reator aeróbio. ....	37
Figura 4.9: (A) Vista frontal do compressor de ar. (B) Rotâmetro utilizado para controle de vazão. ....	38
Figura 4.10: Anéis de bambu e suporte de metal, dentro da câmara aeróbia. ....	39
Figura 4.11: Ponto de coleta do efluente no decantador laminar. ....	40
Figura 4.12: Lâminas instaladas no decantador. ....	40
Figura 4.13: Esquema da unidade piloto para nos ensaios de ozonização e ozonização/peroxidação. ....	41
Figura 4.14: Unidade experimental de ozonização. ....	41
Figura 4.15: Concentrador de oxigênio. ....	42
Figura 4.16: Rotâmetro regulador da vazão de oxigênio. ....	42
Figura 4.17: Sistema gerador de ozônio. ....	42
Figura 4.18: Coluna de ozonização. ....	44
Figura 4.19: Difusor microporoso instalado na base coluna de ozonização. ....	44
Figura 4.20: Frasco Lavador. ....	45
Figura 5.1: Dose de ozônio aplicada e concentrações médias de ozônio consumido, <i>off-gas</i> e ozônio residual dissolvido (dados Tabela 5.2). ....	51

Figura 5.2: Valores médios de pH antes (efluente A.C.) e após a desinfecção (efluente ozonizado). .....	53
Figura 5.3: Valores médios de DQO antes (efluente A.C.) e após a desinfecção (efluente ozonizado). .....	54
Figura 5.4: Valores médios de turbidez antes (efluente A.C.) e após a desinfecção (efluente ozonizado). .....	55
Figura 5.5: Valores médios de cor verdadeira antes (efluente A.C.) e após a desinfecção (efluente ozonizado). .....	56
Figura 5.6: Efluente antes da ozonização (a) e após a ozonização (b) para a dose de 10,00 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempo de contato de 5 min. ....	56
Figura 5.7: Inativação média de coliformes totais e <i>E. coli</i> para os ensaios de ozonização realizados com efluente proveniente dos Alagados Construídos. ....	57
Figura 5.8: Valores médios de formação de formaldeído para os ensaios realizados. ....	59
Figura 5.9: Dose de ozônio aplicado em cada ensaios e as concentrações médias de ozônio consumido, <i>off-gas</i> e ozônio residual dissolvido. ....	61
Figura 5.10: Valores médios de oxigênio dissolvido para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	62
Figura 5.11: Valores médios de pH para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	63
Figura 5.12 Valores médios de alcalinidade para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	63
Figura 5.13: Valores médios de DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	64
Figura 5.14: Valores médios de turbidez para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	65
Figura 5.15: Valores médios de cor verdadeira para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	66
Figura 5.16: Valores médios de sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	67
Figura 5.17 Valores médios de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	68
Figura 5.18 Valores médios de nitrato e nitrito para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	68
Figura 5.19 Valores médios de nitrogênio total Kjeldahl para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. ....	69

Figura 5.20: Valores médios de inativação de coliformes totais e <i>E. coli</i> para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.....	70
Figura 5.21: Valores médios de formaldeído no efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e no efluente após os ensaios de ozonização. ....	72
Figura 5.22: Valores médios de formação de formaldeído para o efluente após os ensaios de ozonização.....	73
Figura 5.23: Doses de ozônio aplicada, concentrações médias de ozônio consumido, <i>off-gas</i> e ozônio residual dissolvido para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempo de contato de 7 minutos.....	78
Figura 5.24: Doses de ozônio aplicadas, concentrações médias de ozônio consumido, <i>off-gas</i> e ozônio residual dissolvido para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempo de contato de 15 minutos.....	79
Figura 5.25: Doses de peróxido de hidrogênio aplicada, peróxido de hidrogênio consumido e peróxido de hidrogênio residual dissolvido para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempo de contato de 7 minutos. ....	80
Figura 5.26: Doses de peróxido de hidrogênio aplicada, peróxido de hidrogênio consumido e peróxido de hidrogênio residual dissolvido para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempo de contato de 15 minutos. ....	80
Figura 5.27: Valores médios de oxigênio dissolvido para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização com tempo de contato de 7 min. ....	81
Figura 5.28: Valores médios de oxigênio dissolvido para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização com tempo de contato de 15 min. ....	82
Figura 5.29: Valores médios de pH para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 7 min. ....	82
Figura 5.30: Valores médios de pH para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 15 min. ....	83
Figura 5.31: Valores médios de alcalinidade para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 7 min. ....	84
Figura 5.32: Valores médios de alcalinidade para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 7 min. ....	84
Figura 5.33: Valores médios de DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 7 min. ....	85

Figura 5.34: Valores médios de DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	86
Figura 5.35: Valores médios de turbidez para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	86
Figura 5.36: Valores médios de turbidez para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	87
Figura 5.37: Valores médios de cor verdadeira para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	87
Figura 5.38: Valores médios de cor verdadeira para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	88
Figura 5.39: Valores médios de sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	89
Figura 5.40: Valores médios de sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	89
Figura 5.41: Valores médios de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	90
Figura 5.42: Valores médios de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	90
Figura 5.43: Valores médios de nitrato e nitrito para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	91
Figura 5.44: Valores médios de nitrato e nitrito para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	91
Figura 5.45: Valores médios de nitrogênio total Kjeldahl para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	93
Figura 5.46: Valores médios de nitrogênio total Kjeldahl para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	93
Figura 5.47: Valores médios de inativação de coliformes totais e <i>E. coli</i> para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	94

Figura 5.48: Valores médios de inativação de coliformes totais e <i>E. coli</i> para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	95
Figura 5.49: Valores médios de formaldeído para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	96
Figura 5.50: Valores médios de formaldeído para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	97
Figura 5.51: Valores médios de formação de formaldeído para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min. ....	98
Figura 5.52: Valores médios de formação de formaldeído para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min. ....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Eficiências típicas de remoção dos principais poluentes de interesse contidos no esgoto doméstico. ....	8
Tabela 3.2: Doenças associadas à veiculação hídrica.....	13
Tabela 3.3: Comparação das características de desinfetantes atualmente usados. ....	14
Tabela 3.4: Principais iniciadores, promotores e inibidores na decomposição do ozônio em água.....	19
Tabela 4.1: Especificações das câmaras que compõe o reator compartimentado anaeróbio/aeróbio .....	35
Tabela 4.2: Doses de ozônio e tempos de contato aplicados nos ensaios de ozonização com efluente proveniente dos Alagados Construídos.....	46
Tabela 4.3: Doses de ozônio e tempos de contato a serem aplicados nos ensaios de ozonização. ....	46
Tabela 4.4: Dosagens de ozônio/ peróxido de hidrogênio e tempos de contato a serem aplicados. ....	47
Tabela 4.5: Métodos e análises realizados com amostras do reator compartimentado para ensaios de desinfecção por ozônio e peroxônio.....	49
Tabela 5.1: Características do Efluente proveniente dos Alagados Construídos. ....	50
Tabela 5.2: Concentrações médias de ozônio consumido, ozônio residual dissolvido, <i>off-gas</i> e eficiências médias na transferência de massa de ozônio para as dosagens de 5 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.....	51
Tabela 5.3: Oxigênio dissolvido para o efluente A.C. e para o efluente ozonizado, para as doses de 5 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.....	52
Tabela 5.4: Valores médios de pH para o efluente proveniente dos alagados construídos e efluente ozonizado para as doses de 5 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos. ....	53
Tabela 5.5: Valores médios de DQO, eficiência média de DQO para o efluente proveniente dos alagados construídos e efluente ozonizado para as doses de 5 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.....	54
Tabela 5.6: Valores médios de Turbidez para o efluente proveniente dos alagados construídos e efluente ozonizado para as doses de 5,00 e 10,00 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos. ....	55
Tabela 5.7: Valores médios de cor verdadeira para o efluente proveniente dos alagados construídos e efluente ozonizado para as doses de 5,00 e 10,00 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos. ....	55
Tabela 5.8: Inativação média de coliformes totais e <i>E. coli</i> em função do tempo de contato e concentração de ozônio efetivamente consumido para o efluente ozonizado. <sup>a</sup> .....	57

Tabela 5.9: Valores médios de formação de formaldeído para as doses de 5 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.....	58
Tabela 5.10: Caracterização do efluente Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio (valores médios). .....	60
Tabela 5.11: Concentrações médias de ozônio consumido, ozônio residual dissolvido, <i>off-gas</i> e eficiências médias na transferência de massa de ozônio para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 7 e 15 minutos.....	61
Tabela 5.12: Eficiência na redução de DQO. ....	65
Tabela 5.13: Inativação média de Coliformes totais e <i>E. coli</i> para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização. <sup>a</sup> .....	70
Tabela 5.14: Comparação entre o ensaio E2 e o teste adicional.....	74
Tabela 5.15: Caracterização do efluente Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio. .	77
Tabela 5.16: Concentrações médias de ozônio consumido, ozônio residual dissolvido, <i>off-gas</i> e eficiências médias na transferência de massa de ozônio para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 7 e 15 minutos. ....	78
Tabela 5.17: Concentrações médias de peróxido de hidrogênio consumido, peróxido de hidrogênio residual dissolvido e eficiências médias no consumo de massa de peróxido de hidrogênio para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> e tempos de contatos de 7 e 15 minutos. ....	79
Tabela 5.18: Eficiência na remoção de DQO após os ensaios de peroxização. ....	85
Tabela 5.19: Inativação média de Coliformes totais e <i>E. coli</i> para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização. <sup>a</sup> .....	94



## SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xiv
SUMÁRIO.....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS .....	5
2.1 GERAL.....	5
2.2 ESPECÍFICOS .....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3.1 GENERALIDADES.....	6
3.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS .....	7
3.2.1 Reatores Compartimentados.....	9
3.2.2 Alagados Construídos.....	11
3.3 DESINFECÇÃO .....	12
3.3.1 Ozonização .....	15
3.3.2 Peroxidação.....	27
3.4 REUSO DE EFLUENTE DESINFETADO.....	30
4 MATERIAL E MÉTODO .....	33
4.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL DA UNIDADE PILOTO.....	33
4.2 OZONIZAÇÃO E PEROXIZAÇÃO .....	40
4.2.1 Gerador de ozônio (ozonizador).....	41
4.2.2 Coluna de ozonização.....	43
4.2.3 Frasco lavador de gás .....	44
4.3 ENSAIOS DE OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DE ALAGADOS CONSTRUIDOS .....	45
4.4 ENSAIOS DE OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DO REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO .....	46

4.5 ENSAIOS DE PEROXIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DO REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO .....	47
4.6 ANÁLISES.....	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	50
5.1 OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS .....	50
5.1.1 Parâmetros Físico-Químicos.....	51
5.1.2 Coliformes Totais e <i>E. coli</i> .....	56
5.1.3 Formaldeído.....	58
5.1.4 Conclusões da ozonização com efluente proveniente dos Alagados Construídos.....	59
5.2 OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DO REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO .....	60
5.2.1 Parâmetros Físico-Químicos.....	62
5.2.2 Coliformes Totais e <i>E. coli</i> .....	69
5.2.3 Formaldeído.....	71
5.2.4 Teste adicional.....	73
5.2.5 Conclusões.....	75
5.3 PEROXIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DO REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO .....	76
5.3.1 Parâmetros Físico-Químicos.....	81
5.3.2 Coliformes Totais <i>E. coli</i> .....	93
5.3.3 Formaldeído.....	95
5.3.4 Conclusões.....	99
6 CONCLUSÕES FINAIS .....	101
7 RECOMENDAÇÕES .....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	104
APÊNDICE A .....	112
APÊNDICE B.....	113
APÊNDICE C.....	115
APÊNDICE D .....	121
APÊNDICE E.....	122

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação de processos biológicos para o tratamento de águas residuárias tem obtido um crescente interesse desde a segunda metade do século passado. As condições ambientais favoráveis, o extremo déficit no saneamento, e a necessidade do desenvolvimento de sistemas de baixo custo devido às limitações financeiras, são os principais fatores que podem conduzir, principalmente, à implementação da tecnologia anaeróbia no tratamento de esgotos sanitários no Brasil (FORESTI, 2001).

Porém, a eficiência do tratamento anaeróbio de esgoto doméstico é comprovadamente limitada, de modo que se tenha a necessidade de novas configurações dos processos já existentes. Logo, para minimizar as desvantagens e aperfeiçoar as vantagens presentes nos processos anaeróbio e aeróbio, busca-se a união desses sistemas biológicos de tratamento de águas residuárias, ou seja, a conjugação de processos anaeróbios com processos aeróbios.

É importante combinar essas opções para que o sistema global de tratamento apresente maior flexibilidade e simplicidade operacional, menor custos de implantação, manutenção e operação e melhor aproveitamento da energia do próprio despejo. Sendo assim, a aplicação de reatores compartimentados anaeróbio/aeróbio surge como uma das possíveis alternativas tecnológicas capazes de se adaptar às variações das condições ambientais necessárias para a aplicação dos processos aqui mencionados.

O reator é simples e relativamente barato construtivamente, com baixa geração de lodo e tempo de retenção celular alto. O funcionamento intermitente também é possível, o que facilita o tratamento de águas residuárias sazonais. As recentes publicações têm revelado o potencial dos reatores compartimentados para o tratamento de esgotos sanitário (MANARIOTIS; GRIGOROPOULOS, 2002; WANG; HUANG; ZHAO, 2004; SILVA; NOUR, 2005; GOPALA KRISHINA; KUMAR; KUMAR, 2008; LIU; TIAN; CHEN, 2010; CAO; MEHRVAR, 2011; BALOCH, 2011).

Outro método de tratamento que vem chamando a atenção é os Alagados Construídos (A.C.). A utilização de A.C. como sistemas de tratamento de efluente sanitário tem se intensificado nestas últimas décadas, especialmente em instalações de pequeno porte (Cooper, 2010). Os A.C. são sistemas controlados que simulam e aceleram as condições encontradas nos terrenos alagados naturalmente.

O sistema de A.C. vem se destacando também, por ser um tratamento de baixo custo de construção e operação, por poder ser implementado próximo ao local onde os esgotos são

gerados, e por poder ser mantidos por pessoas relativamente sem treinamento (CAMPOS et al., 2002).

Um das principais desvantagens destes é a limitação na inativação de microrganismos patogênicos. Logo, se estas águas forem destinadas para usos menos restritivos, como irrigação, água de resfriamento em processos industriais, recarga de aquífero subterrâneo e em longo prazo, como água potável (NUVOLARI, 2003), haverá a necessidade de inativar esses microrganismos.

O crescimento populacional leva, gradativamente, alguns países à situação de estresse hídrico. Logo, a desinfecção de efluentes sanitários para uso na agricultura vem sendo uma boa alternativa para que se diminua a demanda de água potável para irrigação, principalmente devido aos os nutrientes presentes em águas residuárias municipais tratadas (METCALF & EDDY, 2002).

Os agentes químicos mais utilizados na desinfecção são o cloro (o hipoclorito de sódio ou cálcio, dióxido de cloro), o permanganato de potássio, o ácido peracético, o ozônio e a mistura ozônio/peróxido de hidrogênio (DANIEL, 2001). No entanto, devido ao potencial de se causar efeitos deletérios ao ambiente, o uso de desinfetantes convencionais, como o cloro, tem sido motivo de grandes preocupações. Certamente o risco de infecção humana por patógenos deve ser priorizado, mas os impactos ambientais decorrentes da desinfecção também precisam ser levados em consideração (COSTA, 2007).

Pesquisas desenvolvidas sobre o cloro têm mostrado que esta tecnologia é ineficiente na eliminação de alguns microrganismos epidêmicos, como giárdia, *Cryptosporidium* e vírus nos efluentes municipais (ASSIRATI, 2005). Nesse sentido, é grande a preocupação com a desinfecção de efluentes tratados por cloração, uma vez que a formação de halorgânicos é facilitada pela presença de compostos orgânicos. (DANIEL, 2001; GOLÇALVES, 2003; HUA; RECKHOW, 2008; WEF, 1996). Outro ponto, é a necessidade da descloração antes do descarte em um corpo d'água para que o residual de cloro não cause dano à vida aquática e, adequar-se assim à legislação vigente (GONÇALVES, 2003).

Esta etapa adicional de descloração aumenta o custo da desinfecção e restringe a utilização deste processo (RICHARDSON et al., 1999; DIAS; STIPP; SOUZA, 2008), pois, além de gerar toxicidade no efluente descartado, os mesmos não são totalmente eliminados, descartando-os junto com o efluente, o que gera danos à vida aquática. Logo, métodos alternativos baseados em outras substâncias químicas têm sido ativamente pesquisados (NUVOLARI, 2003).

O ozônio é um desinfetante alternativo ao cloro que tem se mostrado muito eficaz principalmente na inativação de bactérias coliformes, vírus, colifagos e cistos de *Giardia* e *Cryptosporidium*, ambos resistentes ao cloro (COSTA; DANIEL, 2002), como também na oxidação de micropoluentes orgânicos (BROSÉUS et al., 2009), podendo aumentar também a concentração de oxigênio na água (SILVA et al., 2010).

Outro bactericida que tem demonstrado sua eficácia no tratamento de água e alimentos é o peróxido de hidrogênio, como ele é menos reativo que o ozônio (HUGHES, 1992), é usado uma combinação de ozônio e peróxido de hidrogênio, chamada de peroxônio. As características da desinfecção pelo processo de peroxidação tem recebido atenção especial nas pesquisas realizadas mundialmente. A adição de peróxido de hidrogênio tem a função de acelerar a decomposição de ozônio que conduz à produção de concentrações relativamente altas de radicais hidroxilas (DANIEL, 2001; SILVA, 2008), aumentando em torno de 35% a energia envolvida no processo (ROSENFELDT et al., 2006; VARGAS, 2008). Portanto, as características da desinfecção pelo processo de peroxidação tem recebido atenção especial nas pesquisas realizadas, sendo que para a inativação de patogênicos, o processo peroxônio tem alcançado resultados semelhantes, ou até mais efetivos que ozônio (METCALF & EDDY, 2002).

Existe, no entanto, uma preocupação devido à natureza dos subprodutos formados na ozonização e na peroxidação e sua possível toxicidade, entretanto, há poucas pesquisas sobre este assunto. Os principais subprodutos formados na ozonização são, em sua maioria, aldeídos e ácidos carboxílicos. Além desses compostos, a ozonização de efluentes secundários e terciários provoca aumento da concentração de ácidos graxos de cadeia curta, álcoois, alcanos, cetonas e aminoácidos livres (ASSIRATI, 2005).

Os aldeídos são considerados como um dos principais subprodutos da ozonização, devido aos seus efeitos à saúde. Os principais aldeídos formados são o formaldeído, acetaldeído, glioxal e metilglioxal (DABROWSKA; SWIETLIK; NAWROCKI, 2003; SWIETLIK et al., 2004; KARNIK et al., 2005). Porém estudos indicam que o formaldeído é o subproduto mais formado durante a ozonização (NAWROCKI; KALKOWSKA, 1998; NAWROCKI et al., 2002; WERT et al., 2007).

De acordo com Assirati (2005), a toxicidade potencial do ozônio a organismos aquáticos está associada aos subprodutos da desinfecção, não ao gás ozônio, já que sua concentração residual atinge valores nulos em minutos. Entretanto, uma maior quantidade de estudos necessita ser executada, já que é difícil afirmar com segurança qual é o efeito do desinfetante sobre a mutagenicidade do esgoto tratado, pois os dados sobre os subprodutos da

desinfecção são escassos (ALMEIDA et al, [2002?]), sendo que os processos de tratamento devem ser também otimizados para controlar tais reações (GROSVENOR, c2012) e as concentrações aplicadas são um problema a ser resolvido para usos práticos (MEHRJOU EI et al., 2010).

Portanto, esta pesquisa teve por objetivo principal estudar a desinfecção de esgoto sanitário por ozonização e peroxidação com o objetivo de promover um efluente propício ao reuso. Avaliaram-se também como estes atuam no processo de oxidação e na eficiência de inativação de coliformes totais e *E. coli*, comparando suas eficiências e a formação do formaldeído na aplicação de ozônio e peroxônio para desinfecção.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

Estudar o uso de ozônio e peroxônio na desinfecção de esgoto sanitário, previamente tratado por alagados construídos e reator compartimentado anaeróbio/aeróbio visando o reúso.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar como o ozônio atua no processo de oxidação e na eficiência de inativação de coliformes em diferentes tempos de contato e doses aplicadas com efluente proveniente dos Alagados Construídos
- Avaliar como o ozônio e o peroxônio atuam no processo de oxidação e na eficiência de inativação de coliformes em diferentes tempos de contato e doses aplicadas com efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio.
- Comparar eficiência entre desinfecção do efluente do reator e dos Alagados Construídos.
  - Comparar a eficiência entre o ozônio e o peroxônio.
  - Comparar a formação de subproduto proveniente da ozonização e peroxidação (formaldeído).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 GENERALIDADES

Dados do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) - Diagnóstico 2010 (SNIS, 2012) indicam que de 2.734 municípios estudados (cerca 85,3 % da população urbana do país) apenas 53,5% desta população está conectada à rede de esgoto. O tratamento do esgoto gerado chegou a uma média nacional de 37,9%, o que é preocupante, pois a cada R\$ 1 investido em saneamento geraria uma economia de R\$ 4 na área da saúde (TRATA BRASIL, c2012).

A contaminação das águas por patógenos diversos traz consequências indesejáveis não somente à saúde pública como também de ordem econômica, como a redução de produtividade, a redução da expectativa de vida, o aumento de custos hospitalares, etc. (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

O esgoto lançado *in natura*, ou insuficientemente tratado, contém elevada carga de organismos patogênicos, o que implica em grande quantidade e distribuição espacial em regiões com alta densidade populacional e intensas atividades humanas (TUNDISI, 2003).

Uma análise feita dos sintomas relacionados às doenças de veiculação hídrica permitiu inferir a predominância da diarreia na população (DANIEL, 2001). Crianças são as mais susceptíveis às doenças relacionadas às águas contaminadas. Uma preocupação eminente, já que estudos estão relacionando déficits cognitivos de longo prazo com a diarreia infantil, ou seja, quanto maior o número de casos de diarreia nos dois primeiros anos de vida, maior o déficit cognitivo de longo prazo (NIEHAUS et al., 2002).

Esses dados, portanto, demonstram a importância do esgoto sanitário na veiculação de patógenos, evidenciando a grande necessidade do controle da qualidade das águas utilizadas para recreação, irrigação e abastecimento (GONÇALVES, 2003).

Os lançamentos indiscriminados de esgoto sanitário nos corpos d'água, devido a sua alta carga orgânica resultam no lançamento de nutrientes que podem levar a eutrofização e a depleção de oxigênio dissolvido na água. Sendo que o oxigênio dissolvido abaixo de valores de 4-5 mg L<sup>-1</sup> pode causar efeitos prejudiciais à vida aquática (METCALF & EDDY, 2002).

Desta forma, o controle da disseminação das doenças de veiculação hídrica está intimamente ligado à proteção dos mananciais e à desinfecção tanto de águas de abastecimento quanto residuárias. A desinfecção pode ser entendida como a última barreira de proteção contra patógenos (WEF, 1996).



Tem-se investido no tratamento de águas residuárias das mais diversas formas, buscando uma maior eficiência aliada ao menor custo. Porém apenas 0,22% do PIB são investidos em saneamento, quando na verdade deveriam ser investidos ao menos 0,63% (TRATA BRASIL, c2012).

Grande parte das alternativas tecnológicas disponíveis hoje são limitadas na remoção de organismos patogênicos. Para solucionar essas deficiências, alternativas devem ser estudadas, dentre as quais a ozonização e a peroxidação, focos do presente estudo. O ozônio, tem se mostrado muito eficaz, principalmente na inativação de bactérias do tipo coliformes, vírus, colifagos e cistos de *Giardia* e *Cryptosporidium*, ambos resistentes ao cloro (COSTA; DANIEL, 2002). O emprego do ozônio pode aumentar também a concentração de oxigênio na água, reduzir matéria orgânica, oxidar de amônia, remover cor, nutrientes e sólidos em suspensão (SILVA, 2010) e uso de peróxido tem a vantagem de eliminação dos compostos relativamente não reativos com o ozônio (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

### 3.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Da mesma forma que os poluentes contidos no esgoto podem ser de natureza química, física e biológica, os processos de tratamento podem ser classificados em processos físicos, químicos ou biológicos. Obviamente estes processos não atuam isoladamente, pois as transformações provocadas por um determinado processo de tratamento influenciarão indiretamente nos fenômenos inerentes aos demais processos (METCALF & EDDY, 2002).

Os processos biológicos são aqueles que dependem da ação de microrganismos presentes nos esgotos para a remoção de contaminantes (METCALF & EDDY, 2002). Estes processos procuram reproduzir, em dispositivos racionalmente projetados, os fenômenos biológicos observados na natureza, condicionando-os em área e tempo economicamente justificáveis (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

Segundo Jordão e Pessôa (2009), os principais processos biológicos de tratamento são:

- Oxidação biológica (aeróbia, como lodos ativados, filtros biológicos aeróbios, valos de oxidação, lagoas de estabilização, etc.; e anaeróbia como reatores anaeróbios de fluxo ascendente ou de manta de lodo, lagoas anaeróbias, tanques sépticos, etc.);
- Digestão de lodo (aeróbia e anaeróbia).

Na Tabela 3.1 é apresentada a eficiência média de remoção dos principais sistemas de tratamentos de esgoto.

Tabela 3.1: Eficiências típicas de remoção dos principais poluentes de interesse contidos no esgoto doméstico.

Sistema	Eficiência média de remoção						Coliformes termotolerantes (unid. Log)
	DBO <sub>5</sub> (%)	DQO (%)	SS (%)	Amônia-N (%)	N total (%)	P total (%)	
Lagoa facultativa	75 a 85	65 a 80	70 a 80	< 50	< 60	< 35	1 a 2
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	75 a 85	65 a 80	70 a 80	< 50	< 60	< 35	1 a 2
Lagoa aerada facultativa	75 a 85	65 a 80	70 a 80	< 30	< 30	< 35	1 a 2
Lagoa aerada mistura completa +Lagoa sedimentação	75 a 85	65 a 80	80 a 70	< 30	< 30	< 35	1 a 2
Lagoa anaeróbia lagoa facult. + lagoa de maturação	80 a 85	70 a 83	73 a 83	50 a 65	50 a 65	> 50	3 a 5
Escoamento superficial	80 a 90	75 a 85	80 a 93	35 a 65	< 65	< 35	2 a 3
Alagados construídos (wetlands)	80 a 90	75 a 85	87 a 93	< 50	< 60	< 35	3 a 4
Tanque séptico + filtro anaeróbio	80 a 85	70 a 80	80 a 90	< 45	< 60	< 35	1 a 2
Reator UASB*	60 a 75	55 a 70	65 a 80	< 50	< 60	< 35	≅ 1
UASB* + lodos ativados	83 a 93	75 a 88	87 a 93	50 a 85	< 60	< 35	1 a 2
UASB* + biofiltro aerado submerso	83 a 93	75 a 88	87 a 93	50 a 85	< 60	< 35	1 a 2
UASB* + filtro anaeróbio	75 a 87	70 a 80	80 a 90	< 50	< 60	< 35	1 a 2
UASB* + filtro biológico percolador de alta carga	80 a 93	73 a 88	87 a 93	< 50	< 60	< 35	1 a 2
UASB* + flotação por ar dissolvido	83 a 93	83 a 90	90 a 97	< 30	< 30	75 a 88	1 a 2
UASB* + lagoas de polimentos	77 a 87	70 a 83	73 a 83	50 a 65	50 a 65	> 50	3 a 5
UASB* + lagoa aerada facultativa	75 a 85	65 a 80	70 a 80	< 30	< 30	< 35	1 a 2
UASB* + lagoa aerada mist. Compl. + lagoa decant.	75 a 85	65 a 80	80 a 87	< 30	< 30	< 35	1 a 2
UASB* + escoamento superficial	77 a 90	70 a 85	80 a 93	35-65	< 65	< 35	2 a 3

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

\* UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

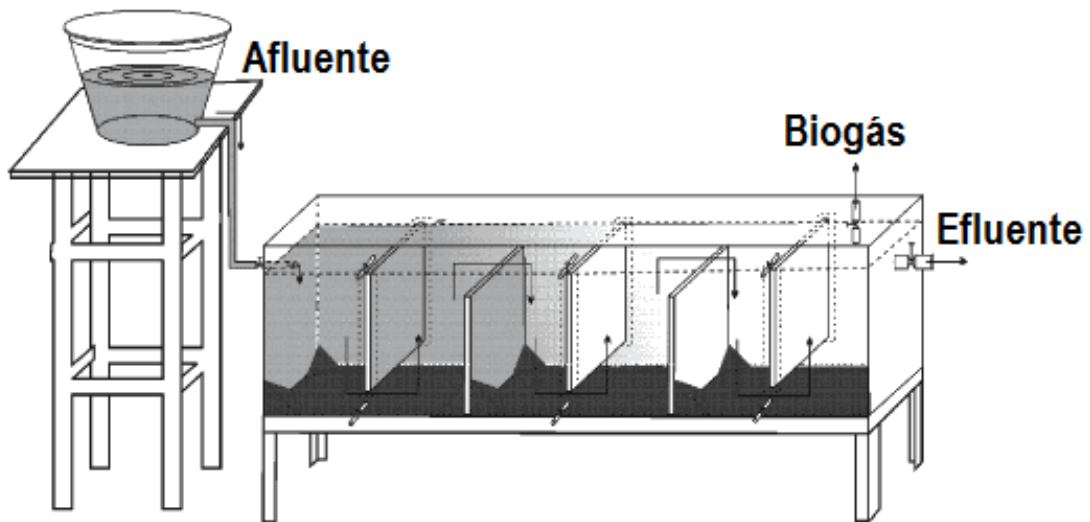
A evolução recente do tratamento anaeróbio permitiu que tanto o esgoto quanto o lodo pudesse ser tratados em unidades para tal fim, em condições que a biomassa formada no interior dessas unidades permaneça aí por um elevado tempo de residência. Três fatores podem ser considerados para a utilização de reatores anaeróbios: a grande acumulação da biomassa no interior do reator, o melhor contato entre a biomassa e o despejo e a melhor atividade da biomassa (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

O lodo pode estar aderido a um material inerte de suporte ou se achar suspenso, agregado na forma de flocos ou granulo. A este último dá-se o nome de Reator de Manta de Lodo de fluxo ascendente ou UASB (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

### 3.2.1 Reatores Compartimentados

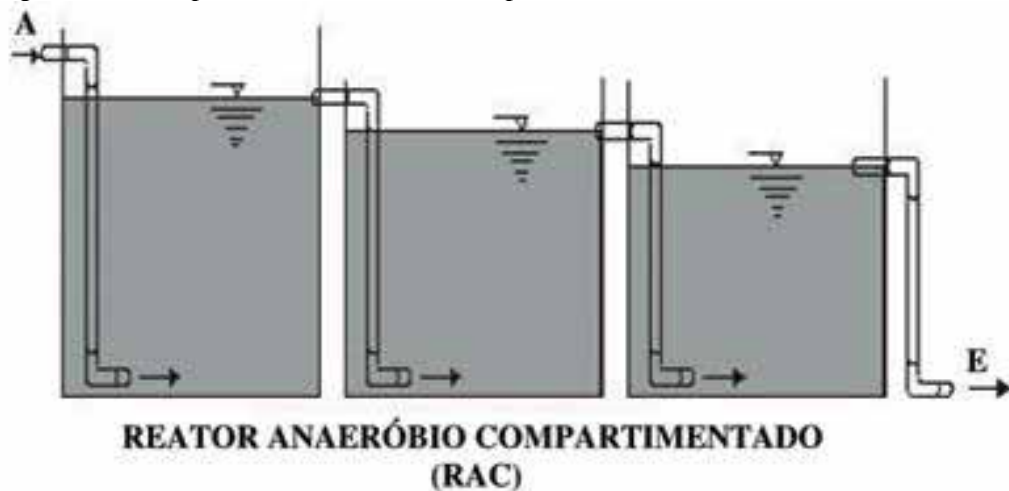
O reator compartimentado anaeróbico ou ABR (*anaerobic baffled reactors*) foi definido como sendo vários reatores UASB em série com uma única característica, a de não necessitar de um crescimento granular. Exemplos estão apresentados na Figura 3.1 e Figura 3.2.

Figura 3.1: Exemplo de reator compartimentado anaeróbico.



Fonte: Leite et al., 2004.

Figura 3.2: Exemplo de reator anaeróbico compartimentado.



Fonte: Javarez Junior, Paula Junior, Gazzola, 2007.

Segundo Passeggi *et al.* (2012), Chernicharo (1997) e Lettinga *et al.* (1991), no reator UASB, o efluente é tratado na ausência de oxigênio livre, ocorrendo a formação de uma biomassa anaeróbia, denominada lodo anaeróbio. E tem como um dos principais subprodutos da degradação anaeróbia da matéria orgânica, o biogás, que é constituído de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>.

Os ABRs possuem a característica de reter grandes quantidades de biomassa por longos períodos, sendo assim superiores aos reatores UASB (TAWFIK; SALEM; EL-QELISH, 2011), resultando em reatores de pequeno volume (KUMAR; MEHROTRA, 2001). Tem também a competência de separar a acidogênese e metanogênese longitudinalmente ao reator (SPONZA; DEMIRDEN, 2010; TAWFIK; SALEM; EL-QELISH, 2011).

O primeiro trabalho publicado sobre reator compartimentado se deve a Bachmann, Beard e McCarty (1985). Os autores compararam vários tipos de reatores anaeróbios: filtro anaeróbio, reator anaeróbio de discos rotativos e o reator compartimentado anaeróbio que foi definido como sendo vários reatores UASB, onde não necessitava de crescimento granular. Grobicki e Stuckey (1992) observaram que no reator anaeróbio compartimentado há pouca transferência de biomassa de um compartimento para o outro.

Como nos reatores tipo UASB a eficiência é comprovadamente limitada, atingindo cerca de 40 a 75% de remoção de DQO e 45 a 85% de DBO, devido principalmente ao tempo de detenção hidráulica, há pesquisas sobre a aplicabilidade de processos aeróbios como pós-tratamento ao processo anaeróbio do reator UASB, o que resultou em importantes recomendações de projetos e operações desse conjunto de unidades (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

No estudo feito por Silva e Nour (2005) o reator compartimentado anaeróbio/aeróbio mostrou boa capacidade para absorver choques hidráulicos e orgânicos, sem provocar qualquer instabilidade no sistema, além de uma boa flexibilidade quanto a mudanças de tempo de detenção hidráulica (TDH), no que se refere às eficiências de remoção de DQO<sub>total</sub>, DQO<sub>filtrada</sub>, DBO<sub>5</sub> e SST. Segundo Tilche e Vieira (1991), o reator compartimentado oferece as vantagens dos reatores em série, sendo: alta eficiência, resistência a cargas de choque, alta capacidade de retenção de biomassa e elevada atividade específica da biomassa para o crescimento de *Methanosarcina sp.* na primeira câmara onde pode ser encontrada alta concentração de acetato.

Com relação a reatores compartimentados anaeróbio/aeróbio, existe a necessidade de um número maior de pesquisas para a formação de um banco de dados mais amplo que possibilita uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, bem como as melhores

combinações de processos para a obtenção de efluentes com alta qualidade e de baixa produção de lodo.

### 3.2.2 Alagados Construídos

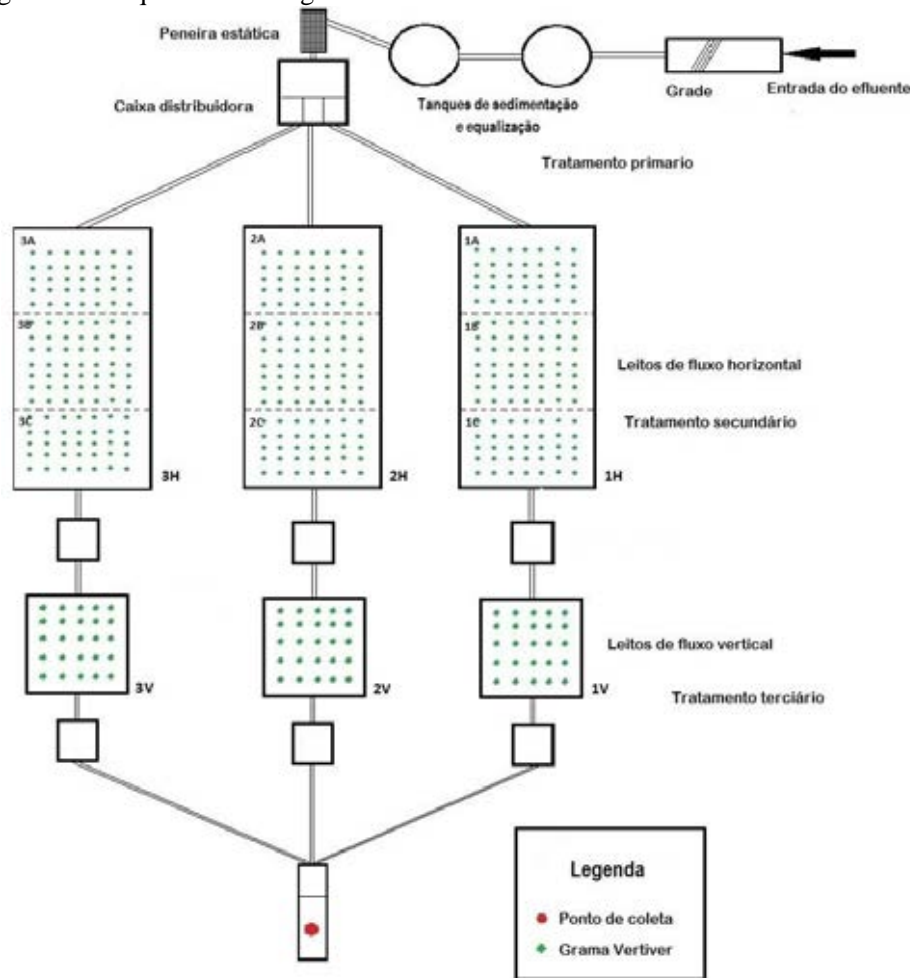
Foi realizados ensaios de ozonização com efluente proveniente de alagados construídos (A.C.), devido ao sistema de tratamento pelo reator compartimentado anaeróbio/aeróbio ainda não estar em funcionamento. Possibilitando também assim, uma comparação da eficiência da desinfecção de efluentes com características distintas. Durante os ensaios, avaliou-se a eficiência da inativação de coliformes totais e *E. coli*, oxidação da matéria orgânica, bem como a formação do principal aldeído formado na ozonização: formaldeído.

Nos A.C. ocorrem inúmeros processos e interações entre animais, microrganismos, plantas, solo, luz solar e ventos que interagem recebendo, doando e reciclando nutrientes provenientes do esgoto (matéria orgânica). Estes nutrientes servem de suporte para macro e micro espécies de organismos que convertem compostos inorgânicos em orgânicos (biomassa vegetal), que é utilizada direta ou indiretamente por animais, plantas e microrganismos (PHILIPPI; SEZERINO, 2004; SILVA, 2007).

Em estudo realizado por Von Dreifus (2012), o sistema de A.C. utilizado neste estudo para os ensaios de ozonização, obteve valor máximo de 75% de inativação para coliformes totais e 81% para coliformes termotolerantes. Mas quando se visa o reuso de um efluente é necessária uma eficiente desinfecção para a garantia da saúde pública e ambiental (DOMENJOUR et al., 2011).

O presente sistema de tratamento contém um A.C. de fluxo horizontal subsuperficial (HSFCW), seguido por A.C. de fluxo vertical subsuperficial (VSFCW) e a espécie de planta utilizada é o capim Vetiver (*Zizanioides Chrysopogon*). O processo é composto de cinco fases de tratamento: O tratamento preliminar (triagem, clarificador preliminar, e uma peneira estática hidrodinâmica), tratamento secundário: é o conjunto de três leitos de HSFCW (9,0 x 4,5 m) e tratamento terciário: composto de três leitos de VSFCW (3,0 x 3,0 m). O esquema do A.C. utilizado pode ser observado na Figura 3.3.

Figura 3.3: Esquema dos Alagados Construídos.



### 3.3 DESINFECÇÃO

Processos que reduzem o risco à saúde associado aos microrganismos patogênicos por inativação (ao contrário de remoção) tradicionalmente são chamados "desinfecção". Diferentemente de esterilização, que representa a destruição de todos os organismos, a desinfecção não destrói todos os microrganismos presentes (WERF, 1995), esta apenas inativa preferencialmente os microrganismos patogênicos. Portanto, recomenda-se que a desinfecção seja aplicada após o tratamento biológico, obtendo-se assim, maior eficácia no tratamento de águas residuárias (LOURENÇÃO, 2009).

Em um sistema de tratamento de água ou esgoto, o processo de desinfecção é um dos mais importantes, tendo como objetivo garantir proteção à saúde pública. É nesta etapa que ocorre a inativação dos microrganismos patogênicos presentes no efluente, minimizando o risco de proliferação de doenças de veiculação hídrica (COSTA, 2007). Esta redução deve ser a um grau que a água de abastecimento e as águas residuárias não sirvam para a veiculação de

doenças, ou seja, a água deve ser considerada microbiologicamente segura ou desinfetada (SILVA, 2008). Algumas doenças de veiculação hídrica estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Doenças associadas à veiculação hídrica.

<b>Bactérias</b>	<b>Vírus</b>	<b>Protozoários</b>	<b>Helmintos</b>
Gastroenterites (diversos grupos de bactérias)	Poliomielite ( <i>Poliovírus</i> )	Giárdia ( <i>Giardia lamblia</i> )	Schistosomose ( <i>Schistosoma mansoni</i> )
Febre tifoide ( <i>Salmonella typhi</i> )	Conjuntivites hemorrágicas	Disenteria amebiana ( <i>Entamoeba histolytica</i> )	Ascaridíase ( <i>Ascaris lumbricoides</i> )
Disenteria bacilar ( <i>Shigella</i> )	Hepatite (vírus da hepatite)	Criptosporidíase ( <i>Cryptosporidium parvum</i> e <i>C.hominis</i> )	Estrongiloidíase ( <i>Strongyloides stercoralis</i> )
Cólera ( <i>Vibrio colera</i> )	Gastroenterite ( <i>Rotavírus</i> )	-	Tricuríase ( <i>Trichuris trichiura</i> )
Doenças pulmonares ( <i>Mycobacteria</i> )	-	-	-
Pneumonia ( <i>Streptococcus pneumoniae</i> )	-	-	-

Fonte: WEF (1996) e SPELLMAN (1999).

A desinfecção é um processo que depende de uma variedade de fatores, incluindo as características do desinfetante, a interação deste com o patógeno, além da qualidade do efluente, sendo, portanto complexo (ORANGE COAST WATCH, 2002). Os agentes desinfetantes químicos mais utilizados são oxidantes que podem causar danos à parede celular, interferir na biossíntese ou inibir a atividade enzimática dos microrganismos, o que resulta na destruição ou impossibilidade de reprodução dos patógenos (DANIEL, 2001). Na Tabela 3.3 é apresentada uma comparação dos desinfetantes atualmente utilizados.

As características desejáveis para um desinfetante, segundo SPELLMAN, (1999) são:

- Agir mesmo em mudanças de pH e temperatura;
- Não ser tóxico;
- Não adicionar gosto e odores desagradáveis;
- Ser rapidamente disponível;
- Ser seguro e fácil de ser manuseado e aplicado;
- Possibilitar que suas concentrações sejam determinadas com facilidade;
- Ser capaz de manter residual (somente para água);
- Organismos patogênicos devem ser mais sensíveis à desinfecção do que os não são patogênicos.
- Ser capaz de ser aplicado continuamente;

- A quantidade aplicada deve ser suficiente para produzir água potável que seja segura como também efluente a ser lançado dentro dos padrões de qualidade do corpo receptor.

Tabela 3.3: Comparação das características de desinfetantes atualmente usados.

Característica	Cloro	Hipoclorito de sódio	Hipoclorito de cálcio	Dióxido de Cloro	Ozônio	Radiação UV
Disponibilidade/Custo	Baixo Custo	Moderada Baixo Custo	Moderada Baixo Custo	Moderada Baixo Custo	Moderada Alto Custo	Moderada Alto Custo
Capacidade de desodorização	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Alta	Não aplicável
Homogeneidade	Homogêneo	Homogêneo	Homogêneo	Homogêneo	Homogêneo	Não aplicável
Interação com material estranho	Oxida matéria orgânica	Oxidante ativo	Oxidante ativo	Alto	Oxida matéria orgânica	Absorbância de radiação UV
Corrosível	Altamente corrosivo	Corrosivo	Corrosivo	Altamente corrosivo	Altamente corrosivo	Não aplicável
Não tóxico a formas de vida superiores	Altamente tóxico a formas de vida superiores	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico
Penetração	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada
Preocupação com a segurança	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Baixa
Solubilidade	Moderada	Alta	Alta	Alta	Alta	Não aplicável
Estabilidade	Estável	Ligeiramente instável	Relativamente estável	Instável, deve ser gerado no local de uso	Instável, deve ser gerado no local de uso	Não aplicável
Tóxico para microrganismos	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Toxicidade a temperaturas ambientes	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

Fonte: METCALF & EDDY (2002).

Dependendo da natureza do esgoto, do nível e tipo de sistema de tratamento de esgoto existente e da qualidade do efluente que se deseje obter, pode-se optar por um ou mais tipos de desinfetantes a ser empregado como última barreira de proteção; no entanto é importante que o efluente seja tratado adequadamente antes da desinfecção a fim de que o desinfetante seja efetivo (COSTA, 2007).



### 3.3.1 Ozonização

Em 1839, o químico suíço Christian F. Schoenbein descobriu uma molécula alótropa do oxigênio, porém com características diferentes. Tal molécula foi batizada de ozônio por causa do cheiro característico (do grego *ozein* cheiro). Devido a ter três átomos de oxigênio, possui uma reatividade especial, sendo que esta reatividade reflete em uma alta instabilidade (BONCZ, 2002).

O ozônio é um gás azul pálido com odor pungente e distinto, que se torna perceptível pelo olfato humano e concentrações inferiores a 1 ppm no ar. A cor, por sua vez, não é perceptível em concentrações normalmente produzidas e usadas. O ozônio é aproximadamente 10 vezes mais solúvel na água que o oxigênio, mas a quantidade que pode ser dissolvida em condições operacionais é baixa (JOHNSON, 1975).

Essas características o tornam atrativo para a desinfecção de esgoto doméstico. A instabilidade desse gás é uma característica desejável porque quando o efluente é lançado no meio ambiente não haverá residual de oxidante que possa ser danoso à biota aquática, e porque seu alto poder oxidante diminui muito as concentrações e o tempo necessário para a desinfecção. Ainda com a vantagem da redução de cor, que mesmo nas dosagens relativamente baixas necessárias para a desinfecção, tem se mostrado efetiva.

O primeiro estudo aplicando ozônio em esgoto sanitário foi realizado pelo exército norte-americano em 1955 (VENOSA, 1972). E a primeira estação de tratamento a aplicar a desinfecção de esgoto com ozônio foi construída em 1975, nos Estados Unidos (ROBSON; RICE, 1991).

Atualmente, o ozônio, tem muitas aplicações comerciais e industriais, tais como: o branqueamento (papel e celulose); nas indústrias de água/bebidas engarrafadas; tratamento de águas de torres de resfriamento; esterilização em processamento de alimentos; aplicações médicas (esterilização); entre outros (OZONE..., c2008).

O ozônio, que tem se mostrado muito eficaz principalmente na inativação de bactérias coliformes, vírus, colifagos e cistos de *Giardia* e *Cryptosporidium*, ambos resistentes ao cloro (COSTA; DANIEL, 2002), pode aumentar também a concentração de oxigênio na água, redução matéria orgânica, oxidação de amônia, remoção de cor, nutrientes e sólidos em suspensão (BROSÉUS et al., 2009; SILVA, 2010).

Em estações de tratamento de esgotos, tem sido estudado o uso de ozônio, principalmente para desinfecção (pré-ozonização seguida do tratamento primário e/ou seguida do tratamento secundário); mas também para reduzir a demanda bioquímica de oxigênio

(DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO); oxidação de amônia; remoção de cor; nutrientes e sólidos em suspensão, já que este se destaca pela rapidez da ação de desinfecção, elevada eficiência na inativação de microrganismos e baixa toxicidade encontrada nos efluentes ozonizados (LANGLAIS; RECKHOW; BRINK, 1991). A ozonização também reduz a absorção de radiação ultravioleta, podendo trazer vantagens para aplicação de reuso do efluente desinfetado (XU et al., 2002).

A eficiência obtida com o uso do ozônio é dependente da matriz (efluente) e da dose de ozônio aplicada. Para a desinfecção geralmente são necessárias doses de 0,5 a 5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>; para a remoção de micropoluentes, doses de 1 a 15 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>; para remoção de cor, doses de 1 a 50 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, para o controle de odor, doses de 25 a 100 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>; e para eliminação de DQO e de compostos orgânicos halogênicos, doses de 50 a 200 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>. Porém como ocorrem diferentes efeitos em paralelo, a dose exata requerida deve ser estudada caso a caso para conseguir um tratamento efetivo (RIED; MIELCKE; WIELAND, 2009).

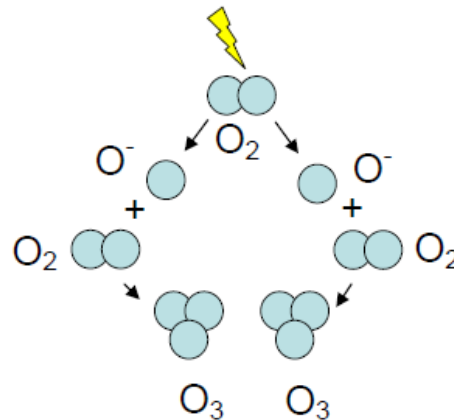
O ozônio apresenta vantagens como poder ser gerado no local, sendo um dos mais ativos, se decompõe rapidamente em oxigênio sem deixar vestígios, age com rapidez e eficácia em todas as cepas de vírus etc. (OZONE..., c2008). Uma desvantagem é que devido a sua alta instabilidade, torna difícil prever como o ozônio irá reagir na presença de matéria orgânica (CHO; CHUNG; YOON, 2003).

Seu mecanismo de desinfecção consiste em destruir a parede celular levando à lise das células microbianas. O interesse na utilização do ozônio para desinfecção de efluentes está associado ao impacto benéfico dele no meio ambiente, pois não forma trihalometanos, ocorrendo também redução de metais às suas formas insolúveis, quebra das cadeias dos hidrocarbonetos e solidificação dos compostos orgânicos dissolvidos causando sua coagulação e precipitação (VON SPERLING, 2005).

A produção comercial do ozônio é realizada pelo "processo corona". Este é baseado na aplicação de uma tensão alternada entre dois eletrodos separados por um fluxo de oxigênio puro seco ou ar (LANGLAIS; RECKHOW; BRINK, 1991).

O campo elétrico aplicado fornece energia suficiente aos elétrons para que estes rompam as duplas ligações da molécula de O<sub>2</sub>, gerando dois átomos de oxigênio. Estes átomos de oxigênio reagem com outra molécula de O<sub>2</sub> para formar as moléculas de O<sub>3</sub> (Figura 3.4) (LANGLAIS; RECKHOW; BRINK, 1991).

Figura 3.4: Esquema do Processo Corona para Geração de Ozônio.



Fonte: SILVA (2008).

Além da descarga corona, existem outros métodos de geração de ozônio, como o método fotoquímico que utiliza radiação UV, o método radioquímico com o Cs-137, o Co-60 ou o Sr-90 como fonte de radiação e o método eletrolítico (COSTA, 2003).

### 3.3.1.1 Mecanismo de Reação

Ozônio é um gás instável que deve ser produzido no local de uso. Ozônio pode reagir com substâncias por duas vias diferentes, indireta e direta. Estas vias de reação diferentes conduzem a diferentes produtos de oxidação e são controlados por diferentes tipos de cinética (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

Normalmente, em condições ácidas ( $\text{pH} < 4$ ), a via direta domina, acima de  $\text{pH} 10$ , muda para a via indireta. Em águas subterrâneas e superficiais ( $\text{pH} \cong 7$ ) ambas as vias – direta e indireta – podem ser de importância. Nas águas de resíduos especiais, mesmo a  $\text{pH} 2$  a oxidação indireta pode ser de importância, dependendo muito dos contaminantes presentes. Ambas as vias devem ser sempre considerados quando no desenvolvimento de um esquema de tratamento (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

#### *Reação Indireta*

A reação indireta ocorre em meio básico e envolve radicais livres, que por terem um elétron não emparelhado, tem uma forte tendência de emparelhamento. Desse modo, estes radicais livres são extremamente reativos e podem provocar reações em cadeia (GUOKAI; YIYUE; ZHI, 2011).

O primeiro passo é o decaimento do ozônio, acelerado por iniciadores, por exemplo, o íon  $\text{OH}^-$ , para formar oxidantes secundários, tais como os radicais hidroxil ( $\text{OH}^\bullet$ ) que são

altamente ativos na inativação de vírus e bactérias (DIAZ; LAW; FRANK, 2001; KIM et al. 2003; SELMA et al., 2006, 2007). Eles reagem não seletivamente e imediatamente com solutos. A via radical é muito complexa e é influenciada por muitas substâncias (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

Essas reações podem ocorrer em três fases: iniciação, propagação e inibição.

A iniciação é a fase determinante. Nela, iniciadores de reação, como os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), reagem com o ozônio conduzindo a formação de um radical ânion superóxido ( $\text{O}_2^{\circ-}$ ) e um radical hidroperoxil ( $\text{HO}_2^\circ$ ).



O radical hidroperoxil está em um equilíbrio ácido-base.



Na sequência são formados radicais livres, os principais responsáveis pela oxidação da matéria orgânica e inorgânica devido a sua elevada instabilidade, e em particular o radical hidroxil ( $\text{OH}^\circ$ ) (WEF, 1996). O radical ( $\text{O}_3^{\circ-}$ ), formado pela reação entre o ozônio e o radical ânion superóxido ( $\text{O}_2^{\circ-}$ ), se decompõe imediatamente em um  $\text{OH}^\circ$ .

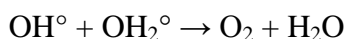


O decaimento do ozônio, o qual pode ser iniciado pelo íon hidróxido, leva a uma reação em cadeia e produz respostas rápidas e assim, radicais  $\text{OH}^\circ$  não seletivos. Isto também significa que o radical hidroxila ( $\text{OH}^\circ$ ) tem uma meia-vida muito curta, por exemplo, inferior a 10  $\mu\text{s}$  numa concentração inicial de  $10^{-4}$  M (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

Algumas substâncias orgânicas e inorgânicas reagem com  $\text{OH}^\circ$  para formar radicais secundários que não produzem  $\text{O}_2^{\circ-} / \text{HO}_2^\circ$ . Estes inibidores geralmente terminam a reação em cadeia e inibem o decaimento de ozônio (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000). Assim, a etapa denominada inibição tem início quando os íons superóxido são consumidos e não são regenerados (LANGLAIS; RECKHOW; BRINK, 1991).



Outra possibilidade para terminar a reação em cadeia é a reação de dois radicais:



Equação 3-6

Na Tabela 3.4 estão apontados alguns iniciadores, promotores e inibidores do ozônio.

Tabela 3.4: Principais iniciadores, promotores e inibidores na decomposição do ozônio em água.

Iniciadores	Promotores	Inibidores
OH <sup>-</sup>	Ácido húmico	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Aril - R	PO <sub>3</sub> <sup>4-</sup>
Fe <sup>2+</sup>	Álcoois primários e secundários	Ácidos húmicos
-	-	Alquil - R
-	-	Álcool terc-butílico

Fonte: STAEHELIN E HOIGNE (1983); XIONG E GRAHAM (1992) apud GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE (2000).

Compostos suscetíveis à reação com ozônio são aqueles que contêm sítios nucleofílicos como oxigênio, nitrogênio, enxofre, fósforo e carvão ativado. No caso de substâncias pouco reativas (aquelas que não apresentam sítios nucleofílicos e possivelmente com estruturas muito simétricas) pode ser necessário combinar ozônio com outros agentes, tais como radiação ultravioleta e peróxido de hidrogênio para oxidar os compostos orgânicos (LANGLAIS; RECKHOW; BRINK, 1991).

### ***Reação Direta***

A oxidação direta (MO + O<sub>3</sub>) de compostos orgânicos por ozônio é uma reação seletiva com constantes de velocidade de reação lenta que ocorre em meio ácido. A molécula de ozônio reage com a ligação insaturada, devido à sua estrutura dipolar e conduz a uma quebra da ligação, que se baseia no chamado mecanismo Criegee. O próprio mecanismo de Criegee foi desenvolvido para soluções não aquosas (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

O ozônio reage lentamente com muitos tipos de contaminantes da água, como os alicíclicos. Porém reage mais rapidamente com certos tipos de compostos aromáticos, como, por exemplo, o grupo hidroxil no fenol. Em geral, a forma ionizada ou dissociada de compostos orgânicos reage mais rapidamente com o ozônio do que a forma neutra (não dissociada). Olefinas (alcenos) são compostos geralmente mais reativos do que os compostos aromáticos, com os mesmos substituintes (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

De um modo geral, a ozonização direta é importante se as reações por radicais são inibidas. Isso significa que a água ou não contém compostos que iniciam a reação em cadeia (iniciadores) ou contém muitos que terminam a reação em cadeia muito rapidamente (inibidores). Com concentrações crescentes de inibidores o mecanismo de oxidação tende à

via direta. Assim, tanto o carbono inorgânico, bem como os compostos orgânicos desempenham um papel importante (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

### ***3.3.1.2 Parâmetros que Influenciam a Ozonização***

Condições de processo como pH, temperatura, dose de ozônio, tempo de contato, turbidez, carbono orgânico total influenciam na eficiência da ozonização (ARSLAN; BALCIOGLU, 2001; LANGLAIS; RECKHOW; BRINK, 1991; GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000; WU; WANG, 2001).

Os fatores que intervêm na eficiência do processo de desinfecção por ozonização estão principalmente associados às características físico-químicas do efluente, que intervêm sobre a sua concentração, especiação e grau de contato com os organismos alvo, ou às características de resistência biológica dos microrganismos ao ozônio. Pode ocorrer ainda uma combinação entre ambos os fatores.

#### ***Temperatura***

A taxa de decaimento dos microrganismos aumenta com o aumento da temperatura do líquido. De acordo com a teoria de Van't Hoff Arrhenius a temperatura determina em parte a taxa de difusão do desinfetante através das membranas do microrganismo e também sua taxa de reação com o substrato. Geralmente um acréscimo de 10 °C pode dobrar ou triplicar a taxa de reação com o substrato. No entanto, quando ocorre um aumento de temperatura, o ozônio torna-se menos solúvel e menos estável em água, embora a taxa de reação com o substrato orgânico dos microrganismos aumente (USEPA, 1999). Um grande número de experimentos tem mostrado que para uma faixa de temperatura compreendida entre 0 e 30 °C o efeito da instabilidade do ozônio em água é amplamente compensado pelo aumento da sua reatividade com o substrato orgânico dos microrganismos (ROY; ENGLEBRECHT; CHIAN, 1980).

#### ***Turbidez***

Os microrganismos, geralmente aparecem em meio aquático, agregados a partículas sólidas de origem mineral ou orgânica que podem protegê-los do contato direto com o agente desinfetante. Pode ocorrer ainda que bactérias e vírus permaneçam protegidos do desinfetante por serem ingeridos por nematoides ou outros macro invertebrados (BITTON, 1994). A turbidez, no entanto, não é um bom parâmetro para avaliar a demanda de ozônio residual necessário para a desinfecção. O efeito de inibição está mais associado à composição das

partículas do que ao seu tamanho ou concentração na fase líquida. Assim, partículas de natureza mineral, ou seja, de difícil oxidação, tem mostrado pouco efeito de inibição sobre a taxa de decaimento dos microrganismos, ao passo que partículas orgânicas, mesmo em baixas concentrações tem sido bem mais efetivas em reduzir esta taxa. Sólidos em suspensão interferem nas doses necessárias à desinfecção, relação que foi evidenciada por Lazarova et al. (1998) e Bassani et al. (2002), sendo que os efluentes com menor conteúdo de sólidos em suspensão atingiram sistematicamente níveis mais altos de inativação (ASSIRATI, 2005).

### ***Carbono Orgânico Total (COT)***

A concentração de COT na fase líquida é um dos parâmetros mais importantes para a determinação da concentração de ozônio a ser aplicada, uma vez que a matéria orgânica provoca o consumo de oxidante que de outra forma estaria disponível para reagir com os microrganismos. A magnitude desse consumo é muito significativa. Por exemplo, a dose aplicada para a desinfecção em água filtrada em uma ETA convencional é cerca de duas vezes menor que a necessária para desinfetar esgotos tratados de uma ETE de lodos ativados por aeração prolongada.

### ***pH***

Também desempenha um papel importante em todo o equilíbrio ácido-base ao influenciar as concentrações de equilíbrio das formas dissociadas e não dissociada. A maioria dos dados disponíveis na literatura indica que a eficiência da desinfecção por ozônio é pouco afetada para a faixa de pH dos efluentes domésticos (entre 6 e 8). No entanto, testes com concentrações residuais de ozônio constantes e diferentes valores de pH mostraram que não havia alteração na inativação dos microrganismos (USEPA, 1999). Boncz (2002) cita que o pH é o parâmetro mais importante, pois afeta o processo de duas maneiras: afeta a estabilização do ozônio e também determina o grau de ionização dos compostos orgânicos, o que é importante, uma vez que os ânions orgânicos altamente estabilizados reagem com o ozônio em taxas mais elevadas do que seus precursores não dissociados.

De um modo geral, pode-se dizer que o desempenho global da ozonização depende da eficiência da geração e transferência do gás para o efluente. A concentração de ozônio deve ser estimada para atender a demanda das reações rápidas de oxidação com as espécies orgânicas e inorgânicas (MONACO, 2006). A diminuição da temperatura e do pH eleva a

solubilidade do gás, favorecendo as reações de oxidação e desinfecção pelo aumento da concentração de ozônio disponível (WEF, 1996; MONACO, 2006).

### **3.3.1.3 Inativação e Eficácia da Desinfecção por Ozonização**

A inativação de bactérias por ozônio pode ser considerada como uma reação de oxidação, que é causada pelo alto potencial de oxidação-redução do ozônio na água (LANGLAIS; RECKHOW; BRINK, 1991).

Os principais mecanismos de inativação de microrganismos patogênicos por agentes químicos, como o ozônio, são (SILVEIRA, 2004):

- Destruição da organização celular por ataque aos principais constituintes da célula;
- Interferência no metabolismo energético tornando as enzimas não funcionais;
- Interferência na biossíntese e no crescimento prejudicando a síntese de proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas ou parede celular.

O ozônio atua primeiramente na membrana celular, reagindo com glicoproteínas ou glicolípídeos, interagindo então com substâncias presentes no citoplasma e no núcleo, degradando purinas e pirimidinas do DNA, sendo este um dos fatores responsáveis pela morte celular (CAMEL; BERMOND, 1998; GARDONI; VAILATI; CANZIANI, 2012; LANGLAIS; RECKHOW; BRINK, 1991).

Portanto, o ozônio deve primeiramente difundir através da superfície do microrganismo e então permear pela membrana e citoplasma, (HUNT; MARINAS, 1999). Entretanto, medidas precisas da cinética de inativação de organismos com ozônio apresentam grandes dificuldades, pois as reações entre o ozônio e os componentes vitais dos microrganismos são tipicamente muito rápidas (HUNT; MARINAS, 1997).

O ozônio tem se revelado efetivo na inativação da maioria dos microrganismos comumente encontrados no esgoto, incluindo vírus, como poliovírus Tipo 3; diversos gêneros de bactérias, protozoários, como *Cryptosporidium* e *Giardia* e até mesmo organismos resistentes à cloração. Ele é efetivo, ainda, na oxidação da matéria orgânica, além de não ser tão susceptível quanto o cloro aos efeitos da presença de amônia e variações de pH (TYRRELL; RIPPEY; WATKINS, 1995; WEF, 1996; DOE, 1998; LAZAROVA et al., 1998; HUNT; MARINAS, 1999; RENNECKER; MARINAS; OWENS, 1999; GONÇALVES, 2003 e SILVA, 2008) e também apresenta altos níveis de oxidação de produtos farmacêuticos em águas e águas residuárias (SNYDER et al., 2006).



Bilotta e Daniel (2011) citam em seu trabalho que os indicadores *Escherichia coli* e colifagos apresentam a menor resistência à aplicação do ozônio, atingindo valores em torno de 4,2 log e 2,9 log de inativação, respectivamente. Embora menos suscetíveis à ação do ozônio, os indicadores *Clostridium perfringens* e coliformes totais alcançaram níveis de inativação de 1,7 a 2,1 log, o que indica a viabilidade do método mesmo frente a espécies mais resistentes.

Silva et al. (2010) obtiveram uma faixa de inativação de coliformes totais de 2,00 a 4,06 log e o intervalo de inativação para *E. coli* foi de 2,41 a 4,65 log. A remoção da DQO foi de 37,6, 48,8 e 42,4% para as doses de 5,0, 8,0 e 10,0 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, respectivamente.

De acordo com o teste estatístico realizado por Silva (2008) foi verificado que o tempo de contato não foi significativo para a inativação de coliformes totais, porém foi significativo (5%) para *E. coli*, ou seja, um maior tempo de contato não influenciou significativamente a eficiência de inativação de coliformes totais e ocorreu um pequeno aumento de inativação para *E. coli* com maior tempo de contato. Para os ensaios de ozonização foi observado um aumento nos valores de pH dos efluentes ozonizados. Este comportamento pode ser explicado devido a um *stripping* de CO<sub>2</sub>, o que ocasiona diminuição na concentração de H<sup>+</sup>.

Bassani et al. (2002) em suas pesquisas concluíram que o ozônio foi altamente eficiente para a desinfecção de *E. coli* mesmo em baixas concentrações, porém a inativação de *E. coli* depende muito do valor de SST no efluente a ser ozonizado; também se mostrou eficiente na inativação de cistos de *Giardia* e oocistos *Cryptosporidium* com uma concentração de 4,0 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>. Quanto à sua toxicidade, o ozônio mostrou ausência de toxicidade aguda para *Daphnia magna* e nenhuma influência sobre a divisão celular dos eritrócitos dos peixes, quando aplicado 5,0 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> em um efluente de boa qualidade.

Já nas pesquisas realizadas por Assirati (2005), doses de ozônio entre 8,0 e 21,0 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> foram necessárias para a adequação dos efluentes de lagoa anaeróbia aos padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde – OMS (WHO, 1989) para reuso agrícola. Efluentes dos filtros de areia atingiram os padrões com doses de até 4,0 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>. Sendo que a eficiência da inativação de coliformes totais e *E. coli* não foi influenciada pelo tempo de contato entre o ozônio e os efluentes, devido à grande reatividade deste desinfetante.

A USEPA (1999b) afirma que o êxito do processo está no controle da dose, da mistura e do tempo de contato. Com dosagens menores ou iguais a 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, o ozônio pode inativar 99,0% dos coliformes em efluentes secundários de esgoto sanitário (WEF, 1996). XU et al. (2002) em seus estudos, citam que a dose de ozônio pareceu ser o parâmetro crítico para a desinfecção de águas residuárias.

Daniel (1993) cita que embora o ozônio seja um efetivo biocida, é necessário conhecer a possibilidade de geração de subprodutos tóxicos. Porém, os significados, na saúde pública, destas possibilidades prejudiciais ainda não são conhecidos, pois existe escassez de informação quanto aos subprodutos formados pela ozonização de efluentes municipais, devido à dificuldade prática de identificar e quantificar compostos individuais em baixas concentrações em uma matriz complexa como o esgoto sanitário.

#### **3.3.1.4 Subprodutos da ozonização**

A meta de se alcançar elevados níveis de desinfecção confronta, normalmente, com a possibilidade de formação de subprodutos da desinfecção – vários deles suspeitos de causarem câncer em seres humanos. Os primeiros subprodutos da desinfecção detectados e estudados foram associados com o cloro, embora, seja consenso que todos os oxidantes os produzem (SOUZA, 2006). Os fatores que podem afetar a formação de subprodutos são: a origem da água, o teor de precursores, a temperatura, o pH, assim como a concentração, o tempo de contato, local de adição e teor residual do desinfetante usado (ALMEIDA et al., [2002?]).

Estudos demonstram que vários desinfetantes podem reagir com substâncias orgânicas naturais presentes nas águas superficiais e nos efluentes domésticos, originando numerosos subprodutos com atividade mutagênica e/ou carcinogênica (MONARCA et al, 2000 apud COSTA, 2007, p. 19). Porém, os efeitos tóxicos podem ser causados não apenas pelos subprodutos da desinfecção como também pelos residuais dos próprios agentes de desinfecção (COSTA, 2007).

Quanto à geração de subprodutos, a ozonização geralmente produz compostos oxigenados polares e às vezes instáveis (GLAZE; KOGA; CANCELLA, 1989; WERT et al., 2007; SILVA et al., 2010). A natureza do mecanismo de reação do ozônio com a matéria orgânica (reação direta ou indireta) determina os subprodutos formados. Alguns pesquisadores têm identificado a formação de compostos específicos (aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos) como os principais subprodutos da ozonização (MILTNER; SHUKAIRY; RZSUMMERS, 1992; CHIANG et al., 1999; DABROWSKA; SWIETLIK; NAWROCKI, 2003; SWIETLIK et al., 2004; KARNIK et al., 2005). Sendo que, resultados de experimentos revelam que a formação de aldeídos e ácidos carboxílicos é significativamente relacionada com a dose de ozônio e o tempo de contato utilizado (AMIN et al., 2013).

Os aldeídos são um dos principais subprodutos da ozonização, pois são de interesse devido aos seus efeitos à saúde. Os principais aldeídos formados são o formaldeído, acetaldeído, glioxal e metilglioxal (DABROWSKA; SWIETLIK; NAWROCKI, 2003; SWIETLIK et al., 2004; KARNIK et al., 2005). O formaldeído e acetaldeído por serem compostos voláteis, também geram tumores no aparelho respiratório e o glioxal pode causar tumores no estômago (CAN; GUROL, 2007).

No Japão a concentração de aldeídos nas águas de abastecimento é monitorada regularmente (SUGAYA et al., 2001), já na França o ozônio é aplicado há varias décadas e não expressa nenhuma preocupação em relação à formação de subprodutos, mesmo assim, seus estudos em relação aos seus efeitos na saúde pública, devido a possíveis toxicidades continuam (SILVA, 2008).

Silva (2008) destaca que muito pouco, ou mesmo a não detecção na formação de glioxal e metilglioxal foi observado nos ensaios de ozonização. Glioxal e metilglioxal demonstraram a não dependência na sua formação em relação ao tempo de contato e dose de ozônio consumida. As pesquisas realizadas por Nawrocki et al. (2002) confirmam que tempos de contatos curtos (4 a 6 min) foram suficientes para a reação de desinfecção, no entanto, que aldeídos como o formaldeído e o acetaldeído dependem da dose aplicada enquanto que glioxal e metilglioxal não dependem.

Silva et al. (2010) citam em seu estudo que a formação de aldeídos variou com a dose aplicada, porém não dependia significativamente do tempo de contato, sendo que as concentrações encontradas pelo autor para formaldeído estavam abaixo do nível permitido ( $900\mu\text{g L}^{-1}$ ) pela OMS (WHO, 2002). O autor cita também que a formação de aldeído variou com a dose somente quando a dose foi de 5,0 para 8,0  $\text{mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  para acetaldeído e de 5,00 para 8,0 e de 8,0 para 10,0  $\text{mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  para glioxal.

Wert et al. (2007) em seus estudos verificaram uma formação de aldeídos quando da utilização de peroxônio, em torno de 31 a 47% maior quando comparado a utilização de doses semelhantes de ozônio. Além disso, o peróxido de hidrogênio é propenso a deixar um residual em água. Este fato demonstra a importância da dose correta para uma melhor eficiência e menor formação de subprodutos, dose esta que será obtida através de mais estudo sobre o tema.

#### **3.3.1.4.1 Formaldeído**

O formaldeído caracteriza-se por ser um gás incolor com um forte odor irritante, altamente solúvel em água, produzindo hidrato e possuindo alta reatividade química

(NATIONAL, 1981). Estudos realizados por Nawrocki e Kalkowska (1998), Nawrocki et al. (2002) e Wert et al. (2007) comprovaram que o formaldeído é o subproduto mais formado durante a ozonização.

Estudo realizado por Nawrocki e Kalkowska (1998) indica que a formação do mesmo é por via direta da ozonização, ou seja, em meio ácido, portanto a disponibilidade de ozônio molecular é o fator limitante na produção de aldeídos.

No entanto, Silva (2008) obteve uma maior formação de acetaldeído do que de formaldeído durante a ozonização, porém o autor cita que pode ter ocorrido maior formação de acetaldeído devido a um maior tempo de contato utilizado, o que possibilitou tanto o consumo total de precursores, quanto à oxidação do formaldeído pelo ozônio, transformando-o em outros subprodutos.

Qi et al. (2012) também observaram uma maior formação de acetaldeído em alguns experimentos, porém em outro houve uma maior formação de formaldeído. Sendo que ao atingir certo tempo de contato, onde apresentava um pico de formação, seus rendimentos diminuía, ou seja, eram degradados.

Os resultados obtidos por Can e Gurol (2007) mostraram que a formação de formaldeído é quase imediata na desinfecção por ozonização, porém atinge um pico e então começa a diminuir, o que sugere que tempos maiores de contato podem ajudar a eliminar, eventualmente, o formaldeído formado. Porém o acúmulo de formaldeído foi mais drástico em doses baixas de ozônio. O que evidencia a importância de parâmetros como tempo de contato e doses de aplicação.

O formaldeído pode reagir com o DNA, RNA e proteínas danificando as células, o que favorece a morte de microrganismos. Devido a seus efeitos mutagênicos e carcinogênicos, descargas diretas de efluentes contendo formaldeído nos corpos d'água receptores podem causar prejuízos à vida aquática, além de o formaldeído poder causar mutação em células humanas, afetando diretamente o DNA (PASQUALINI, 2010).

Em quatro instituições internacionais de pesquisa (Agencia Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC), Agencia de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA, a Associação de Saúde e Segurança Ocupacional (OSHA) e também o Programa Nacional de Toxicologia dos EUA (Fourth Annual Report on Carcinogens)), já comprovaram o potencial carcinogênico do formaldeído (INCA..., 1996-2012). Pesquisadores também encontraram resultados que demonstram o potencial carcinogênico e mutagênico do formaldeído em animais (CRAFTSTORM, 1983; SCHEUPLEIN, 1985; TOMKINS; MCMAHON; CALDWELL, 1989).

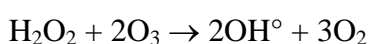
No Brasil, como em muitos outros países, não há níveis permissíveis para as descargas de águas residuárias tratadas com formaldeído em corpos receptores d'água. Portanto para poder ser fazer uma comparação, algumas diretrizes para os níveis permitidos de formaldeído em água potável foram encontradas. No Japão, o limite é de  $80 \mu\text{g L}^{-1}$  (SUGAYA et al., 2001), na Polónia, o limite é de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  (NAWROCKI; BILOZOR, 1997), para a OMS (WHO, 2002) é de  $900 \mu\text{g L}^{-1}$  e na Austrália, é de  $500 \mu\text{g L}^{-1}$  (AUSTRALIAN DRINKING WATER GUIDELINES 6, 2011).

### 3.3.2 Peroxização

O peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) é um agente oxidante versátil que pode ser utilizado para diversas finalidades, tanto na forma isolada quanto combinada. A ação antimicrobiana está relacionada com a capacidade do  $\text{H}_2\text{O}_2$  em formar espécies oxigenadas reativas, como os radicais hidroxil ( $\text{OH}^\circ$ ) e superóxido ( $\text{O}_2^\circ$ ), sendo esses radicais passíveis de causar danos ao DNA microbiano, bem como os componentes da membrana celular (VARGAS, 2008).

As condições de reação requeridas para o uso do peróxido são próximas às condições ambientais, permitindo a eliminação de uma série de poluentes orgânicos sem elevado consumo energético. Entretanto, este processo é, atualmente, pouco utilizado de forma isolada, uma vez que sua ação pode ser potencializada pela combinação com sistemas catalíticos (BRITO; RANGEL, 2008). Assim, como o peróxido de hidrogênio é menos reativo que o ozônio (HUGHES, 1992), é usada uma combinação de ambos (peroxônio).

O peroxônio é obtido em duas etapas: dissolução de ozônio e adição de peróxido de hidrogênio. O peróxido de hidrogênio pode ser adicionado depois do ozônio, permitindo que o ozônio aja como desinfetante em primeiro lugar, ou antes, do ozônio, de forma que o peróxido de hidrogênio atue como pré-oxidante, seguido da formação de radicais hidroxila. A adição direta dos dois oxidantes pode ser também de forma simultânea. Entretanto, a adição do peróxido de hidrogênio após o ozônio é a melhor opção, pois o peróxido de hidrogênio irá atuar por meio dos radicais hidroxila (vide Equação 3-7), melhorando a eficiência de inativação de organismos patogênicos (SILVA, 2008).



Equação 3-7

A vantagem deste processo reside na eliminação dos compostos relativamente não reativos com o ozônio. Foi demonstrado que a oxidação do ácido oxálico, que é muitas vezes

um produto final no caso de reações moleculares de ozônio, foi significativamente acelerada com a adição de peróxido de hidrogênio (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

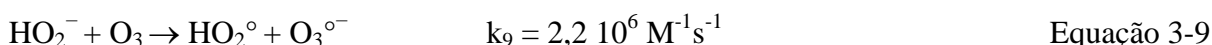
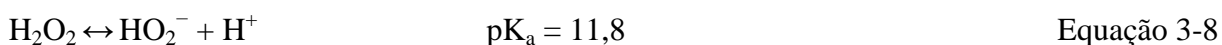
A eficiência da peroxidação é dependente da relação entre as concentrações de peróxido de hidrogênio e ozônio. Uma relação ótima para a dose de  $H_2O_2/O_3$  tem mostrado ser de 0,5 a 1,0 (mol/mol) dependendo da presença de promotores e consumidores de radicais livres (inibidores) e por isso a relação ótima de dosagem é importante (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000). Segundo a USEPA (1999b) a relação ótima é de 0,2 a 0,3.

De acordo com esses dados apresentados, mais pesquisas devem ser realizadas para ser encontrada uma faixa mais próxima para o correto uso da dose de  $H_2O_2/O_3$ . A importância da dose correta reside no fato de que o excesso de peróxido de hidrogênio leva a uma redução de eficiência no processo de degradação da matéria orgânica, causada por reações competitivas com os radicais  $OH^\circ$  (USEPA, 1999; PASQUALINI, 2010). Além do residual de ozônio ser menor no processo de peroxidação porque o peróxido de hidrogênio acelera sua decomposição.

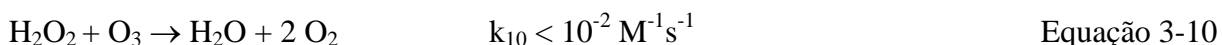
### 3.3.2.1 Mecanismo de Reação

A adição de peróxido de hidrogênio tem a função de acelerar a decomposição de ozônio que conduz à produção de concentrações relativamente altas de radicais hidroxilas (DANIEL, 2001; SILVA, 2008), tendo acréscimo deste em relação ao método de ozonização. Como o uso conjunto do  $O_3/H_2O_2$  resulta na formação mais rápida dos radicais hidroxil, aumenta em torno de 35% a energia envolvida no processo (ROSENFELDT et al., 2006; VARGAS, 2008). Com adição do peróxido de hidrogênio, a produção líquida do radical hidroxila é de 1:1 de ozônio (DANIEL, 2001).

O peróxido de hidrogênio reage com o ozônio quando presentes como um ânion,  $HO_2^-$ . A velocidade de reação do sistema ozônio/peróxido de hidrogênio é baseada na concentração inicial de ambos os oxidantes (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000):

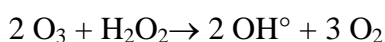


A reação do ozônio com o peróxido de hidrogênio não dissociado é negligenciável:



A reação continua ao longo da via indireta, descrita anteriormente e radicais  $\text{OH}^\circ$  são produzidos. Comparação da reação inicial com  $\text{HO}_2^-$  ( $k_9 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), e com  $\text{OH}^-$  ( $k_1 = 70 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) mostra que no sistema  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  a etapa de iniciação por  $\text{OH}^-$  é negligenciável. Sempre que a concentração de peróxido de hidrogênio está acima de  $10^{-7} \text{ M}$  e o valor de pH inferior a 12,  $\text{HO}_2^-$  tem um efeito maior do que o  $\text{OH}^-$  tem sobre a taxa de decomposição do ozônio no água (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

A equação 3-11 demonstra que duas moléculas de ozônio produzem dois  $\text{OH}^\circ$ :



Equação 3-11

### 3.3.2.2 *Parâmetros que influenciam a Peroxização*

Os valores de pH e alcalinidade desempenham importante papel na eficiência deste processo (GLAZE; KANG, 1988). Estes fatores estão relacionados principalmente à competição do bicarbonato e carbonato para reagir com os radicais hidroxila no caso de alto valor de alcalinidade e o carbonato em altos valores de pH (SILVA, 2008).

O peróxido de hidrogênio em excesso pode limitar a formação de radicais hidroxila e diminuir a eficiência do processo de peroxização, pois pode ele mesmo atuar como um inibidor como também como um iniciador, portanto é de suma importância encontrar uma ótima relação de dose (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

### 3.3.2.3 *Inativação e Eficácia da Desinfecção por Peroxização*

Geralmente para a inativação de microrganismos patogênicos o processo peroxônio e outros processos oxidativos avançados têm alcançado resultados semelhantes, ou até mais efetivos que ozônio (METCALF & EDDY, 2002; USEPA, 1999). A combinação de ozônio e peróxido de hidrogênio é usada para contaminantes de difícil oxidação, que consomem grandes quantidades de oxidantes (SILVA, 2008).

Muttamara, Sales e Gazali (1995) comprovaram que a peroxização, além de ser eficiente na inativação de coliformes, aumenta a remoção de carbono total. Rosal et al. (2009) citam que foi obtido uma remoção de 99% dos produtos farmacêuticos encontrados em águas residuárias com concentrações da ordem de ppb ou ppt. Portanto, as características da desinfecção pelo processo de peroxização tem recebido atenção especial nas pesquisas realizadas, como também outros processos oxidativos.

Duguet et al. (1985), ao tratarem água do lago Cholet, demonstram a importância de ponto de aplicação do peróxido de hidrogênio. Quando o peróxido de hidrogênio foi adicionado depois da oxidação de substâncias altamente reativas com ozônio, o desempenho alcançado foi melhor.

Costa (2003) estudou a peroxidação de efluente anaeróbio de esgoto sanitário proveniente de um reator anaeróbio de leito expandido, aplicando  $14,40 \pm 1,90 \text{ mg O}_3 \text{ min}^{-1}$  em tempos de contato de 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos e a razão da mistura peróxido de hidrogênio e ozônio foi de  $0,33 \pm 0,01$ ; verificou-se com essas dosagens que a eficiência de remoção de DQO e carbono orgânico total melhoraram significativamente.

### 3.4 REUSO DE EFLUENTE DESINFETADO

A reutilização ou o reuso de água ou o uso de águas residuárias não é um conceito novo e tem sido praticado em todo o mundo há muitos anos, existindo relatos de sua prática na Grécia Antiga. No entanto, a demanda crescente por água tem feito do reuso planejado da água um tema atual e de grande importância (CETESB, 2013).

Já em 1958, o Conselho Social e Econômico das Nações Unidas defendia o conceito de substituição de fontes, o qual estabelece (EPA, 1992): "Não se deve utilizar águas com alto grau de qualidade, a menos que exista um excedente, em aplicações que toleram o uso de águas com menor grau de qualidade".

Com o aumento dos problemas associados ao consumo excessivo de água e degradação dos recursos hídricos disponíveis, devido à poluição, a Agenda 21, sugeriu a reciclagem de água e sua utilização, como fonte alternativa para usos diversos, de águas de baixa qualidade, tais como águas residuárias, de origem tanto doméstica quanto industrial (HESPANHOL et al., 2001).

Desta forma, verifica-se que qualquer iniciativa de reuso de água, principalmente de esgotos sanitários tratados, está em consonância com os princípios estabelecidos pela Agenda 21 e com o conceito da gestão sustentável, dos recursos hídricos disponíveis (HESPANHOL; MIERZWA, 2001).

Os esgotos tratados têm um papel fundamental no planejamento e na gestão sustentável dos recursos hídricos como um substituto para o uso de águas destinadas a fins agrícolas e de irrigação, entre outros. Ao liberar as fontes de água de boa qualidade para abastecimento público e outros usos prioritários, o uso de esgotos contribui para a



conservação dos recursos e acrescenta uma dimensão econômica ao planejamento dos recursos hídricos (CETESB, 2013).

O reuso reduz a demanda sobre os mananciais de água devido à substituição da água potável por uma água de qualidade inferior. Dessa forma, grandes volumes de água potável podem ser poupados pelo reuso quando se utiliza água de qualidade inferior (geralmente efluentes pós-tratados) para atendimento das finalidades que podem prescindir desse recurso dentro dos padrões de potabilidade (MANCUSO; SANTOS, 2003; CETESB, 2013).

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB (2013) e Mancuso e Santos (2003) água de reuso pode ser utilizada em:

- Irrigação de campos para cultivos, como plantio de forrageiras, plantas fibrosas e de grãos, plantas alimentícias, viveiros de plantas ornamentais, proteção contra geadas.
- Usos industriais como na refrigeração, alimentação de caldeiras, água de processamento.
- Recarga de aquíferos, controle de intrusão marinha, controle de recalques de subsolo.
- Usos urbanos não potáveis como irrigação paisagística (parques, cemitérios, campos de golfe, campus universitários, cinturões verdes, gramados residenciais), combate ao fogo, descarga de vasos sanitários, sistemas de ar condicionado, lavagem de veículos, lavagem de ruas e pontos de ônibus, etc.
- Finalidades ambientais: aumento de vazão em cursos de água, aplicação em pântanos, terras alagadas, indústrias de pesca.
- Usos diversos: aquicultura, construções, controle de poeira, dessedentação de animais.

A incorporação do reuso de água nos planos nacionais de gestão de recursos hídricos e de desenvolvimento agrícola é de suma importância para regiões áridas e semiáridas e também onde a demanda de água é precariamente satisfeita pela transposição de água de bacias adjacentes. Outro ponto a ser estimulado é a prática de reuso associada ao setor público que ainda é extremamente incipiente no Brasil, apesar das manifestações de reuso agrícola não planejado ou inconsciente em várias regiões brasileiras (MANCUSO; SANTOS, 2003).

O Brasil apresenta potencial para a adoção da técnica de reuso em irrigação. O país tem forte vocação agrícola, além de necessitar de técnicas, para tratar os efluentes, mais baratas. Outro fator favorável ao uso deste procedimento é a realidade brasileira, onde apenas 35% da população conta com serviço de coleta de esgoto e, desse total, só 10% recebe tratamento, acarretando o lançamento diário de 10 bilhões de litros de esgoto bruto nos corpos de água (IBGE, 2008).

A utilização de esgotos sanitários oferece oportunidades de natureza econômica, ambiental e social, mas em situações de acentuada escassez de recursos hídricos pode até mesmo constituir uma necessidade (FLORENCIO; BASTOS; AISSE, 2006). Zhang et al. (2010) mostram que o reuso de efluente providencia mais benefícios que o uso da água da chuva. Estima-se que a capacidade de reutilização de águas residuárias podia potencialmente ser equivalente a 15% do consumo mundial de água (ASANO, 1998).

Portanto a desinfecção é passo fundamental para assegurar que este efluente seja seguro para o reuso, evitando assim a contaminação da população por patógenos, ou seja, a disseminação doenças de veiculação hídrica.

Logo, com este estudo busca-se verificar a capacidade de desinfecção do ozônio e do peroxônio em efluentes tratados previamente por uma nova configuração de reator compartimentado anaeróbio/aeróbio, procurando assim fornecer um efluente que possa ser reutilizado.

## 4 MATERIAL E MÉTODO

### 4.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL DA UNIDADE PILOTO

O efluente anaeróbio/aeróbio utilizados nos ensaios com aplicação de ozônio e peroxônio é proveniente de uma nova configuração de um reator compartimentado anaeróbio/aeróbio, instalado no Departamento de Educação Física da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” no *Campus* de Bauru-SP. O sistema de tratamento é composto por tratamento preliminar (gradeamento), tratamento primário (tanques de equalização e sedimentação) e pelo reator compartimentado. O sistema de gradeamento pode ser observado na Figura 4.1 e os tanques de equalização e sedimentação podem ser observados na Figura 4.2 e Figura 4.3. O estudo da eficiência dessa nova configuração de reator compartimentado não fez parte dessa pesquisa, sendo, portanto, objeto de estudo de outro aluno de mestrado. Porém, por se tratar de uma nova configuração e por ter sido implantado em conjunto com esta pesquisa, são apresentadas a seguir suas características principais.

O afluente que alimenta o reator compartimentado trata-se do esgoto gerado pela ASSUNEB (Associação dos Servidores da UNESP de Bauru), pela moradia estudantil e pelo Departamento de Educação Física, atualmente frequentado por aproximadamente 277 alunos, 43 docentes e 3 funcionários, o que gera uma vazão média de 10.000 L dia<sup>-1</sup> de esgoto. Em paralelo funciona a ETE pelo processo de A.C., que forneceu efluente para os ensaios de ozonização, já citados no item 3.2.2.

Figura 4.1: Grade.



A grade possui 100 cm de comprimento, por 18 cm de largura, instalado com inclinação de  $60^\circ$  e composto por 9 barras de ferro de 1 cm de espessura, com espaçamento de aproximadamente 1 cm entre elas. Este sistema é responsável pela retenção de grandes sólidos. A limpeza da grade foi realizada de forma manual, utilizando um rastelo, semanalmente.

Os tanques de equalização e sedimentação, ambos com capacidade de 5.500 L, estão enterrados no solo. A limpeza dos tanques é realizada periodicamente, por bombeamento do lodo, pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE).

Figura 4.2: Tanque de equalização e tanque de sedimentação.

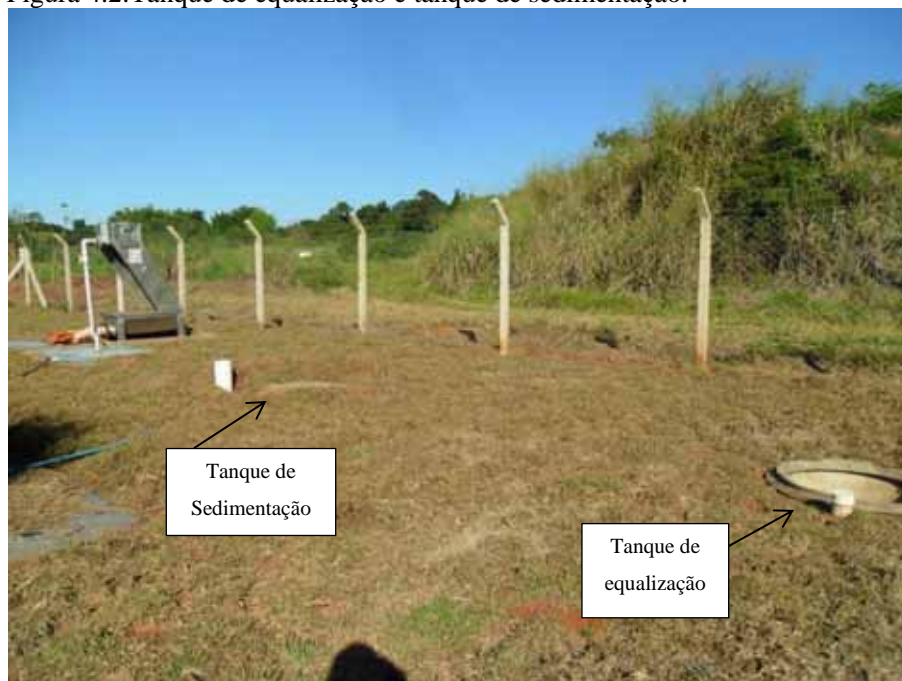


Figura 4.3: (A) Vista superior do tanque instalado. (B) Tanque semelhante ao que foi instalado.



Dentro do tanque de sedimentação existe uma bomba submersível que recalca apenas o afluente (líquido) até um reservatório (Figura 4.4) de 200 litros, para controle de vazão do reator compartimentado. No interior do reservatório, foi instalado um sensor de nível, que

controla o bombeamento de esgoto para dentro do tanque. Ao centro do tanque foi instalada uma tubulação de PVC que envia o esgoto para o reator. Na extremidade desta tubulação foi instalado um registro de gaveta, onde é realizada a regulagem da vazão. A vazão foi aferida manualmente, 4 vezes por semana, utilizando um béquer de plástico e um cronômetro, seguindo os tempos de detenção hidráulica (TDH) de 33 horas durante 60 dias (13/01 a 14/03) e de 22 horas durante 53 dias (17/03 a 09/05). A partir deste reservatório, o esgoto é encaminhado para o reator compartimentado.

Figura 4.4: Reservatório para controle de vazão.



O reator compartimento anaeróbio/aeróbio (Figura 4.5) é composto por quatro câmaras confeccionadas em tubos de PVC. As especificações de cada câmara estão descritas na Tabela 4.1. A planta e o perfil do reator compartimentado podem ser observados na Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente.

Tabela 4.1: Especificações das câmaras que compõe o reator compartimentado anaeróbio/aeróbio

Câmara	Altura (m)	Diâmetro (mm)	Volume (L)	Processo de tratamento
1	0,90	600	405	Anaeróbio
2	0,90	300	96	Anaeróbio
3	0,90	300	96	Anaeróbio
4	1,70	400	200	Aeróbio
TOTAL	-	-	797	-

Figura 4.5: Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio.

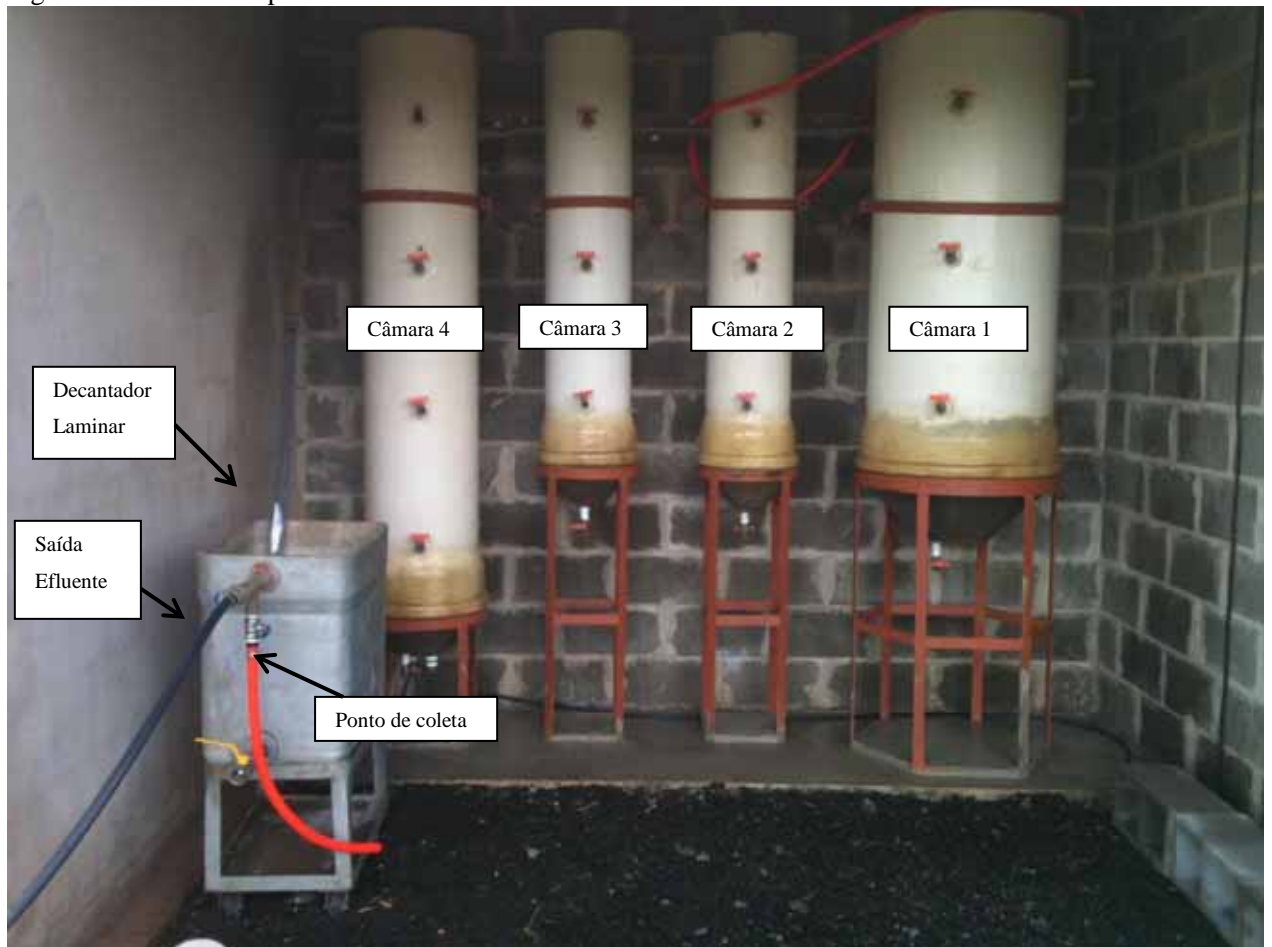


Figura 4.6: Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio em planta (medidas em metro).

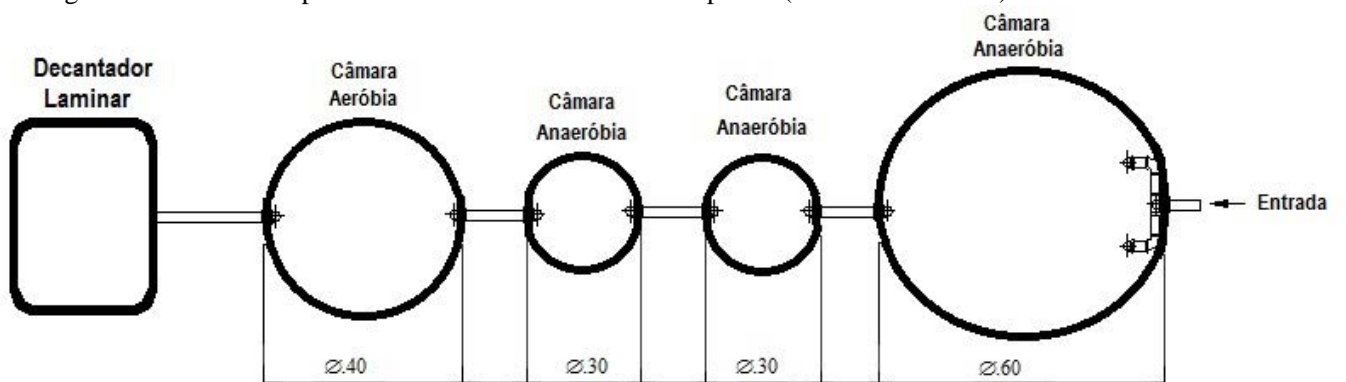
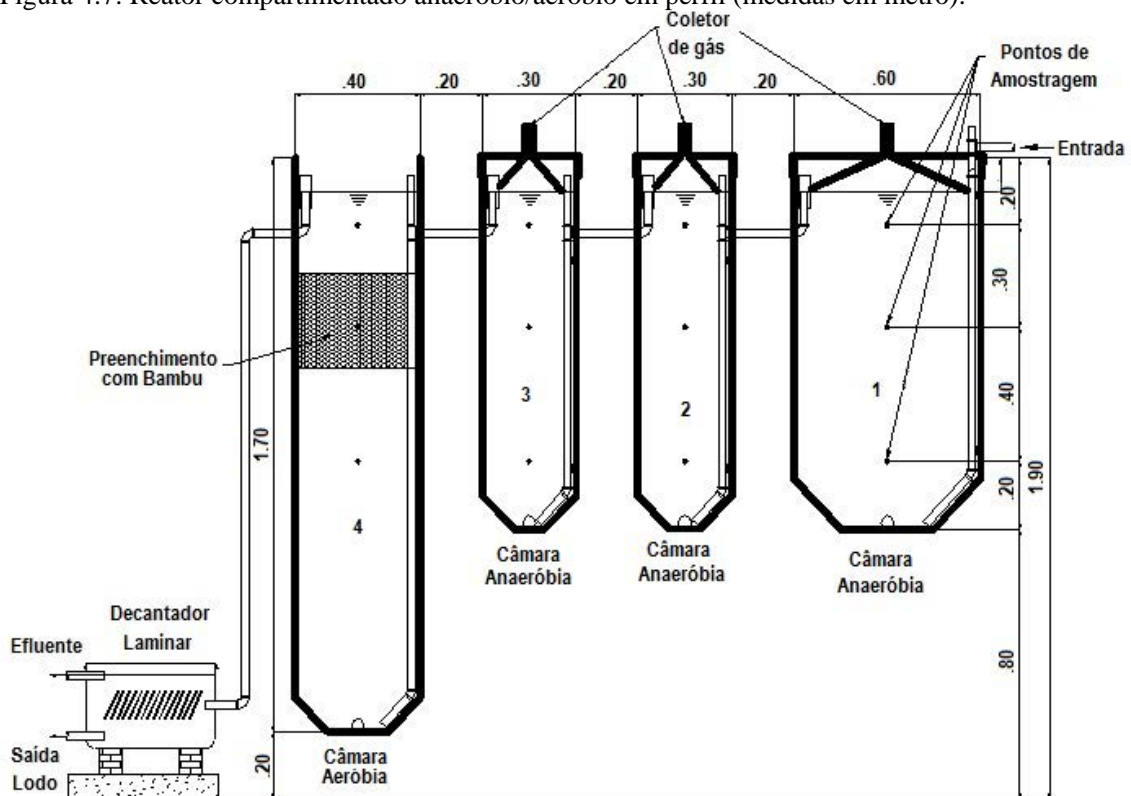


Figura 4.7: Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio em perfil (medidas em metro).



O fornecimento de ar para a quarta câmara aeróbia foi realizado por compressor de ar, da marca Schulz, Twister bravo, modelo CSL 10/100. A distribuição de ar foi por meio de dois difusores microporoso (porosidade de 10  $\mu\text{m}$ ) fixados ao fundo da câmara. O difusor utilizado e seu local de instalação podem ser observados na Figura 4.8.

Figura 4.8: Difusor microporoso instalado no reator aeróbio.



Foi adicionado um rotômetro à linha de ar, para a regulagem de vazão, que foi feita, manualmente, 3 vezes por semana. A vazão foi regulada inicialmente em 5  $\text{L min}^{-1}$ , no

período de 13/01 a 14/03, sendo modificada para  $3 \text{ L min}^{-1}$  nas semanas seguintes, fornecendo assim apenas o necessário para atender a demanda de oxigênio, evitando problemas com o biofilme. O compressor de ar e o rotômetro utilizado podem ser observados na Figura 4.9.

Figura 4.9: (A) Vista frontal do compressor de ar. (B) Rotômetro utilizado para controle de vazão.



Na quarta câmara (aeróbia), o preenchimento com bambu foi utilizado para o crescimento de bactérias, localizada entre 1,00 m e 0,50 m do topo da quarta câmara, fixados por meio de duas grades com o mesmo diâmetro da câmara, encaixadas na altura descrita acima. Foi utilizado bambu da espécie *Bambusa vulgaris*, que foi colhido e serrado no Laboratório de Experimentação com Bambu, com o auxílio do Prof. Dr. Marco Antonio Pereira, do Departamento de Engenharia Mecânica, da UNESP - Bauru. Os anéis de bambu possuem aproximadamente 5 cm de altura por 5 de diâmetro e foram lavados, secados ao ar livre e lixados. A disposição dos anéis bambus no interior da quarta câmara pode ser observada na Figura 4.10.



Figura 4.10: Anéis de bambu e suporte de metal, dentro da câmara aeróbia.



Após as câmaras anaeróbias e aeróbias, o sistema conta com um decantador laminar (Figura 4.11), sendo constituído por uma caixa de fibra cimento de 52x52x32 cm (CxLxA) totalizando um volume de 80 L. Dentro do decantador, foram adicionadas 9 lâminas de polipropileno presas a um suporte, dispostas em ângulo de 60° em relação à horizontal. As lâminas possuem 20 cm de largura, por 30 cm de altura, com espaçamento de aproximadamente 5 cm entre elas. Ao final do decantador, existem três registros, dois superiores para coleta de efluente e um inferior para a coleta e remoção de lodo. As lâminas podem ser observadas na Figura 4.12.

A coleta de efluente foi realizada uma vez por semana, sempre no período da manhã. As coletas foram realizadas por meio de um registro esfera, instalado na parte superior do decantador laminar, conforme observado na Figura 4.11. Como já citado anteriormente, o estudo da eficiência do reator é objetivo de outra pesquisa de mestrado, deste modo utilizou-se os TDHs que estavam sendo estudados no período. O reator operou com o primeiro TDH de 33h, respeitando o período de estabilização, de aproximadamente 45 dias, seguindo assim com o segundo TDH de 22h. Correspondendo os TDH1 e TDH2 assim, ao período em que foram realizadas as coletas para os ensaios de desinfecção.

Figura 4.11: Ponto de coleta do efluente no decantador laminar.

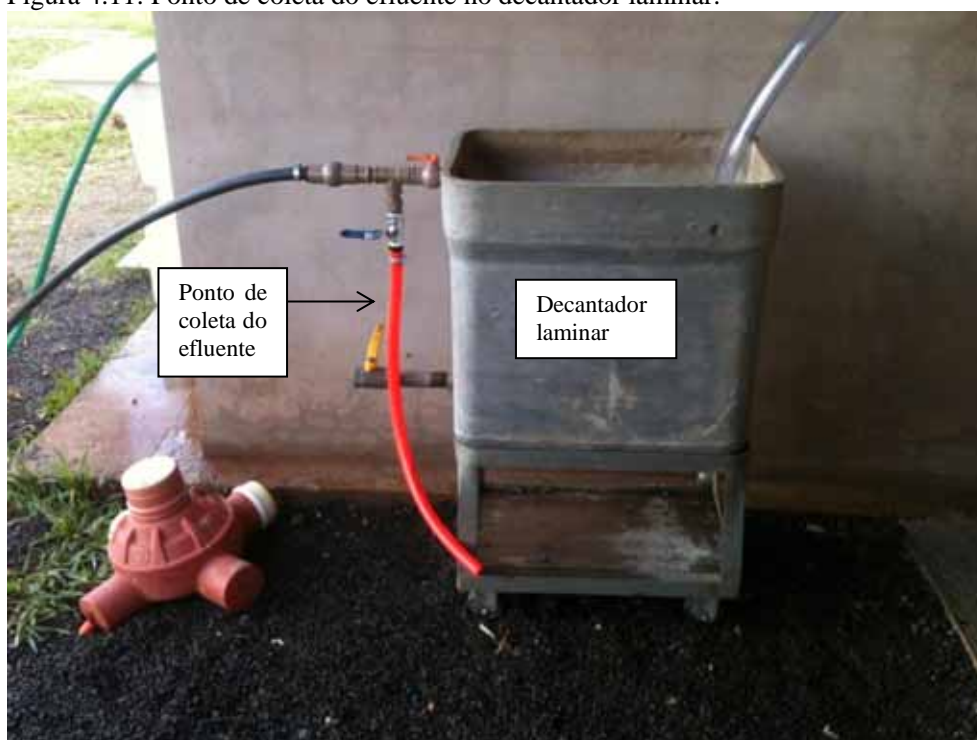


Figura 4.12: Lâminas instaladas no decantador.



## 4.2 OZONIZAÇÃO E PEROXIZAÇÃO

A unidade experimental piloto usada para os ensaios de ozonização e de peroxização é composta de: compressor de ar, gerador de ozônio, coluna de ozonização e frasco lavador de gás para a captura do ozônio que não reagir no processo de ozonização e peroxização. Os componentes básicos utilizados estão apresentados no esquema das Figura 4.13 e Figura 4.14.

Figura 4.13: Esquema da unidade piloto para nos ensaios de ozonização e ozonização/peroxidação.

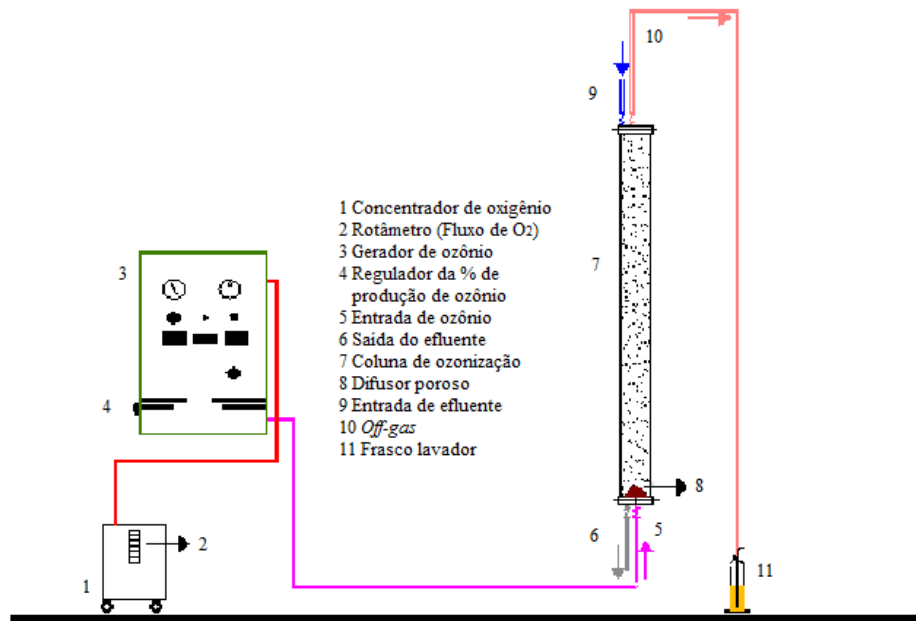


Figura 4.14: Unidade experimental de ozonização.



#### 4.2.1 Gerador de ozônio (ozonizador)

Os experimentos de ozonização foram realizados em escala de bancada consistindo de concentrador de oxigênio (EverFlo Respironics, Alemanha), gerador de gás de ozônio (BRO3-Brasil Ozônio, Brasil).

O equipamento EverFlo (Figura 4.15) concentra o oxigênio a partir do ar ambiente, através de um filtro molecular e de um processo de adsorção de oscilação de pressão. A uma

temperatura de funcionamento entre 13 a 32°C e umidade relativa de 15 a 95%, sem condensação, a concentração de oxigênio produzida é de 90 a 96%. O concentrador de oxigênio possui um rotâmetro onde se é possível regular a vazão de oxigênio fornecida ao gerador de ozônio em até 5 L O<sub>2</sub> m<sup>-1</sup> (Figura 4.16).

Figura 4.15: Concentrador de oxigênio.



Figura 4.16: Rotâmetro regulador da vazão de oxigênio.



O gerador de ozônio BRO3 – PLUS1 (Figura 4.17) utiliza o conceito corona para a produção do ozônio e potencializa a geração do mesmo com o uso de tubos múltiplos coaxiais (TMC).

Figura 4.17: Sistema gerador de ozônio.



#### 4.2.1.1 Doses de Ozônio

Com relação aos ozonizadores fornecidos no mercado é necessário quantificar a produção de ozônio, para que as condições de trabalho sejam conhecidas, já que a produção máxima de ozônio alcançada no processo de calibração geralmente está muito aquém das especificações fornecidas pelos fabricantes (SALLA, 2006).

Foram realizados vários ensaios com vistas a avaliar a quantidade de ozônio gerada pelo equipamento, utilizando-se o método iodométrico Cl 4500 B – O<sub>3</sub> descrito em *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (Rice et al., 2012). A calibração do ozonizador (APÊNDICE C) permitiu estabelecer a vazão de ar (fluxo enriquecido com oxigênio do concentrador de oxigênio), bem como a porcentagem de produção de ozônio (ozonizador) necessária para obter as doses requeridas em cada ensaio. A metodologia utilizada possibilitou a determinação dos melhores intervalos de vazões para o equipamento gerador de ozônio.

Nos ensaios preliminares utilizando efluente proveniente dos A.C. foram utilizadas as doses de 5 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos. No estudo principal, utilizando efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio foram investigadas doses de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contato de 7 e 15 minutos.

#### 4.2.2 Coluna de ozonização

A coluna de ozonização foi construída a partir de um tubo de acrílico de 5 mm de espessura, 100 mm de diâmetro interno e 170 mm de altura, fixadas na parede do laboratório (Figura 4.18) com duas abraçadeiras de 60 mm de diâmetro cada.

Na base da coluna de ozonização havia uma tampa de acrílico flangeada e presa por parafusos de aço inox de ¼, na qual uma conexão de 1” em PVC com rosca interna foi colocada para fixação do difusor. O difusor – utilizado para geração de bolhas ascensionais de ozônio – foi confeccionado em plástico microporoso e, de acordo com informações da empresa fornecedora, possui poros de 10 µm, 75 mm de diâmetro em sua base e 70 mm de altura e formato cônico, conforme apresentado na Figura 4.19.

Na tampa inferior da coluna, também havia um registro esfera (em aço inox) para abertura e fechamento do fluxo de ozônio, conectada a uma mangueira de silicone. Havia, também, outro registro (em PVC) para o descarte do líquido da coluna de ozonização. No topo da coluna de ozonização encontravam-se dois furos roscáveis: um para liberação do *off-*

gas e outro, tanto para preencher a coluna de ozonização com esgoto, quanto para limpeza da coluna com água potável.

Figura 4.18: Coluna de ozonização.



Figura 4.19: Difusor microporoso instalado na base coluna de ozonização.



#### 4.2.2.1 Concentração de ozônio residual

A concentração de ozônio residual gasoso (*off-gas*) foi determinada de acordo com o método iodométrico CI 4500 B – O<sub>3</sub> (Rice et al., 2012). As análises foram feitas imediatamente após os ensaios de ozonização e de peroxização.

A concentração de ozônio residual dissolvido no meio líquido foi determinado de acordo com o método DPD (*N, N*-dietil-*p*-fenilenodiamina), através do espectrofotômetro DULCOTEST DT1B (*German standard DIN 38 408*) e reagentes Merck Chlor-Test. De acordo com o fabricante, o intervalo da curva de calibração para a medida de ozônio residual dissolvido é de 0,01 a 2,7 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> com precisão de duas casas decimais.

#### 4.2.3 Frasco lavador de gás

O gás ozônio que não era transferido para o meio líquido, era capturado por um frasco lavador (Figura 5.20) preenchido com solução de iodeto de potássio (KI) a 2%.

Figura 4.20: Frasco Lavador.



Esse procedimento era realizado para a quantificação do *off-gas* (Método Iodométrico – Rice et al., 2012) e destruição do gás ozônio para se evitar que este fosse liberado para a atmosfera. O frasco lavador do *off-gas* possui formato cilíndrico, em vidro, com volume igual a 1 litro. O frasco era conectado à coluna de ozonização por mangueiras de silicone. Sua tampa é composta por tubo de extremidade porosa (vidro sinterizado) mergulhada na solução de iodeto de potássio (2%).

#### 4.3 ENSAIOS DE OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS

Foram realizados ensaios com amostras de efluente proveniente dos A. C.. O ozônio foi aplicado ao sistema em batelada, em doses de 5 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> com tempos de contato de 5 e 10 min para cada dose. A vazão do gás variou de 0,47 a 1,49 L min<sup>-1</sup> em função da dose requerida e os ensaios foram realizados em triplicata, para cada dose e tempo de contato. Visando simplificar a posterior discussão dos resultados, os ensaios foram nomeados de T1, T2, T3 e T4 de acordo com as doses e tempos de contato descritos na Tabela 4.2, respectivamente.

Tabela 4.2: Doses de ozônio e tempos de contato aplicados nos ensaios de ozonização com efluente proveniente dos Alagados Construídos.

Ensaio	Dose (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de Contato (min)	Volume de Esgoto na Coluna (L)	Nº de repetições de ensaios
T1	5	5	11,94	3
T2		10		
T3	10	5	11,94	3
T4		10		

#### 4.4 ENSAIOS DE OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DO REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO

A coleta de efluente no Reator Compartimentado anaeróbio/aeróbio foi semanal. Os ensaios de desinfecção com o ozônio ocorreram no período da manhã, logo após a coleta do efluente.

A cada semana foram realizados ensaios de desinfecção com ozônio em doses aplicadas de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> para os tempos de contato 7 e 15 min, totalizando assim 3 repetições, conforme descrito na Tabela 4.3. A vazão do gás variou de 0,52 a 2,49 L min<sup>-1</sup> em função da dose a ser aplicada e os ensaios foram realizados em triplicata, para cada dose e tempo de contato.

Visando simplificar a posterior discussão dos resultados, os ensaios de ozonização foram nomeados de E1, E2, E3, E4, E5 e E6, de acordo com as doses aplicadas e tempos de contato descritos na Tabela 4.3, respectivamente.

Tabela 4.3: Doses de ozônio e tempos de contato a serem aplicados nos ensaios de ozonização.

Ensaio de Ozonização	Dose (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de Contato (min)	Volume de Esgoto na Coluna (L)	Nº de repetições de ensaios
E1	5	7	11,94	3
E2		15		
E3	8	7	11,94	3
E4		15		
E5	10	7	11,94	3
E6		15		

Deste modo foi possível verificar a eficiência da desinfecção, pois apesar de o efluente utilizado ser sempre proveniente da mesma fonte (Reator compartimentado), suas características variam fortemente e de modo imprevisível dependendo do conjunto de atividades desenvolvidas, em razão de se tratar de um esgoto proveniente de um campus universitário.

Imediatamente após cada tempo de contato, uma alíquota da amostra foi retirada para a medição do ozônio residual dissolvido e do *off-gas*, sendo o restante da amostra levada para



as análises físico-químicas e microbiológicas. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Hidráulica Geral e Saneamento do Departamento de Engenharia Civil de Bauru-UNESP.

A sequência de etapas para os ensaios de ozonização estão no apêndice D. A dose de ozônio efetivamente consumida pelo esgoto pôde ser calculada pela seguinte equação, cujas variáveis estão todas expressas em mg de  $O_3 L^{-1}$ .

$$\text{Dose efetiva} = \text{Dose aplicada} - [\text{O}_3 \text{ Residual Dissolvido} + \text{Off-gas}] \quad \text{Equação 4-1}$$

#### 4.5 ENSAIOS DE PEROXIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DO REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO

Os ensaios de desinfecção com peróxido de hidrogênio foram realizados em batelada. Na Tabela 4.4, é possível verificar as doses de ozônio e de peróxido de hidrogênio, os tempos de contato aplicados e o número de repetições de ensaios realizados. Assim como para a desinfecção com o ozônio, a coleta de efluente foi semanal.

Para os ensaios de peroxidação a nomenclatura utilizada para cada ensaio de peroxidação foi EP1, EP2, EP3, EP4, EP5, EP6 para os ensaios com tempo de contato de 7 min e EP7, EP8, EP9, EP10, EP11 e EP12 para o tempo de contato de 15 min.

Tabela 4.4: Dosagens de ozônio/ peróxido de hidrogênio e tempos de contato a serem aplicados.

Ensaio de Peroxidação	Dose de ozônio (mg $O_3 L^{-1}$ )	Dose de peróxido de hidrogênio (mg $H_2O_2 L^{-1}$ )	Tempo de Contato (min)	Volume de Esgoto na Coluna (L)	Nº de repetições de cada ensaio
EP1	5	1,0	7	11,94	3
EP7			15		
EP2			7		
EP8	8	3,0	15	11,94	3
EP3			7		
EP9			15		
EP4	10	4,8	7	11,94	3
EP10			15		
EP5			7		
EP11	6,0	2,0	15	11,94	3
EP6			7		
EP12			15		

Na primeira etapa foi realizada a desinfecção utilizando o tempo de contato de 7 min para todas as doses de ozônio e peróxido de hidrogênio. Na segunda etapa, o mesmo foi feito utilizando o tempo de contato de 15 min. Sendo assim, foram 3 semanas para cada etapa, totalizando 6 semanas de análises. A vazão do gás variou de 0,57 a 1,87  $L \text{ min}^{-1}$  para os ensaios de 7 min e entre 0,52 e 2,49  $L \text{ min}^{-1}$  para os ensaios de 15 min. Os ensaios foram realizados em triplicata, para cada dose e tempo de contato.

A dose de peróxido de hidrogênio foi determinada de modo a se ter uma relação peróxido de hidrogênio: ozônio de 0,2 e 0,6, respectivamente.

As soluções de peróxido de hidrogênio foram aplicadas na parte inferior da coluna por meio de uma seringa. A aplicação do peróxido de hidrogênio foi realizada da seguinte forma: o volume total da solução de peróxido de hidrogênio foi aplicado no início da ozonização.

Imediatamente após cada etapa de contato, uma alíquota da amostra foi retirada para a medição do peróxido de hidrogênio dissolvido residual e o restante da amostra foi encaminhado para determinação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Hidráulica Geral e Saneamento do Departamento de Engenharia Civil de Bauru-UNESP.

#### 4.6 ANÁLISES

Na Tabela 4.5 estão apresentadas as análises que foram realizadas durante os ensaios de ozonização e peroxidação, bem como os métodos utilizados.

Após os ensaios de ozonização com efluente proveniente dos alagados construídos foram analisados apenas os parâmetros: oxigênio dissolvido, pH, DQO, Turbidez, Cor verdadeira, formaldeído, coliformes totais e *E. coli*, devido ao objetivo inicial ter sido principalmente testar o equipamento de ozonização. Porém devido aos resultados obtidos, optou-se por apresentá-los e comparar com a eficiência na desinfecção do efluente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio.

Para avaliar se existem diferenças significativas nos valores médios das variáveis analisadas, o método estatístico de comparação das médias de duas amostras foi utilizado, no caso o teste *t* Student (MILLER; MILLER, 1993).

Tabela 4.5: Métodos e análises realizados com amostras do reator compartimentado para ensaios de desinfecção por ozônio e peróxido.

Parâmetros	Descrição do método
(*) Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Titulação potenciométrica com ácido sulfúrico/método 2320B
(*) <i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Método 9221- Sistema Enzimático <i>Colitag</i> ; Estufa de cultura Fanem <i>ORION 502</i>
(*) Coliformes Totais (UFC/100 mL)	Método 9221- Sistema Enzimático <i>Colitag</i> ; Estufa de cultura Fanem <i>ORION 502</i>
(*) Concentração O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> ).	Método colorimétrico índigo – 4500 O <sub>3</sub> -B
(*) Concentração O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ).	Método Iodométrico – 4500 Cl – B
Concentração residual de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> ).	Método Iodométrico modificado (JEFFERY et al., 1989)
(*) Cor verdadeira (Pt-Co)	Método 2120 C e espectrofotômetro HACH-DR 2000
(*) Demanda Química de Oxigênio (DQO) (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> ).	Colorimétrico – DR 2500 Hach (Refluxo fechado)-5220 D
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	Método 8110 (MBTH Method) – kit da HACH- DR 5000
(*) Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	Nitrato: Método 8171 (Cadmium Reduction Method) – kit da HACH- DR 5000
(*) Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	Nitrito: Método 8507 (Diazotization Method) – kit da HACH- DR 5000
(*) Nitrogênio Total Kjeldahl	Método Kjeldahl- 4500 B
(*) Nitrogênio amoniacal (NH <sub>3</sub> ) (mg N L <sup>-1</sup> ).	Aparelho Thermo mod. <i>ORION 720 A+</i> (eletrodo seletivo para amônia)
Temperatura (°C)	Leitura direta com termômetro de mercúrio
(*) Turbidez (NTU)	Método 2130 B e turbidímetro HACH 2100N
Condutividade	Eletrodo seletivo Condutivímetro Thermo <i>ORION STAR</i>
Sólidos Totais dissolvidos-STD	Eletrodo seletivo Condutivímetro Thermo <i>ORION STAR</i>
(*) pH	Método 4500-H <sup>+</sup> B e pHmetro Orion-210A
(*) Série de Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	Gravimétrica- Filtração em membrana (1,2µm) – 2540 D
(*) Série de sólidos totais	Gravimétrico – 2540B
Oxigênio Dissolvido	Medidor de Oxigênio dissolvido portátil SX751-AKSO (0.00 a 40.00 mg L <sup>-1</sup> )
Tempo de contato (min)	Cronômetro
(*) Metodologias contidas em Rice et al. (2012).	

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS

A seguir são apresentados os resultados e as discussões dos ensaios de ozonização com efluente proveniente dos A.C., cujas características estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características do Efluente proveniente dos Alagados Construídos.

Parâmetro	Efluente
<b>pH</b>	6,7 ± 0,2
<b>DQO (mg L<sup>-1</sup>)</b>	36 ± 20
<b>Cor (Pt-Co)</b>	97 ± 20
<b>OD (mg L<sup>-1</sup>)</b>	2,96 ± 0,09
<b>Formadeído (mg L<sup>-1</sup>)</b>	46,7 ± 4,7
<b><i>E. coli</i> (NMP/100mL)</b>	3,36x10 <sup>5</sup>
<b>Coliformes totais (NMP/100mL)</b>	1,41x10 <sup>6</sup>
<b>Turbidez (UNT)</b>	10,79 ± 4,6

As eficiências médias na transferência de massa de ozônio, a concentração média de ozônio no *off-gas*, no ozônio residual dissolvido e no ozônio consumido são apresentados na Tabela 5.2, bem como na Figura 5.1. Nesta etapa da pesquisa, a temperatura ambiente aplicada foi de 17 a 24°C.

A eficiência na transferência de massa, que é a quantidade de ozônio consumida em relação à aplicada, foi de 94,4% para a dose de 5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e os tempos de contato de 5 e 10 min, 90,4% para a dose de 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempo de contato de 5 min e 82,8% para a dose de 10 mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup> e tempo de contato de 10 min. Houve diferença significativa (P = 0,05) dos valores médios do ozônio consumido somente entre as doses de ozônio aplicadas, ou seja, um maior tempo de contato não promoveu um maior consumo de ozônio.

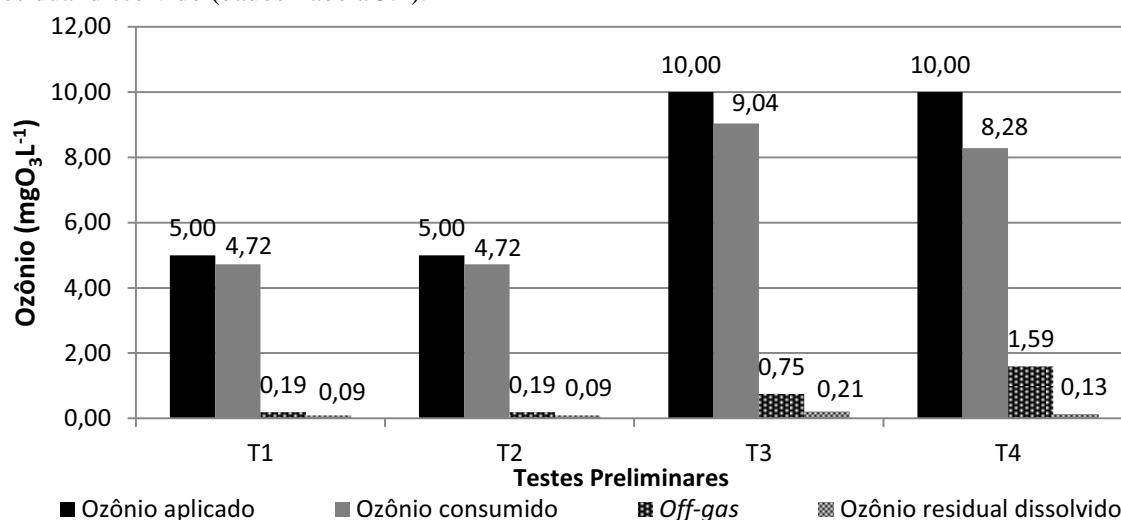
Silva et al. (2010) obtiveram uma eficiência na transferência de 76% para a dose de 5 mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup> e tempo de contato de 5 min, para a mesma dose e tempo de contato de 10 min, a eficiência foi de 79%. Para a dose de 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contato de 5 e 10 min a eficiência foi de 71%. A menor eficiência pode ser devido às condições empregadas, como a temperatura, que afeta a solubilidade do ozônio. Silva et al. (2010) utilizaram em seus estudos temperatura ambiente de 20 a 30 °C, enquanto que nesta etapa da pesquisa a temperatura ambiente aplicada foi de 17 a 24 °C. É importante lembrar que o aumento da temperatura da

água diminui a solubilidade do ozônio na mesma, ou seja, influencia a taxa de reação do ozônio (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

Tabela 5.2: Concentrações médias de ozônio consumido, ozônio residual dissolvido, *off-gas* e eficiências médias na transferência de massa de ozônio para as dosagens de 5 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.

Ensaio	Ozônio Aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de Contato (min)	Ozônio do <i>Off-gas</i> (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio Residual Dissolvido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio Consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio Transferido (%)
T1	5	5	0,19	0,09	4,72	94,4
T2	5	10	0,19	0,09	4,72	94,4
T3	10	5	0,75	0,21	9,04	90,4
T4	10	10	1,59	0,13	8,28	82,8

Figura 5.1: Dose de ozônio aplicada e concentrações médias de ozônio consumido, *off-gas* e ozônio residual dissolvido (dados Tabela 5.2).



## 5.1.1 Parâmetros Físico-Químicos

O acompanhamento dos parâmetros físico-químicos se torna necessário ao passo que este pode influenciar a ozonização, ou seja, a eficiência do ozônio em inativar patógenos.

### 5.1.1.1 Oxigênio Dissolvido

Houve diferença significativa entre a quantidade de oxigênio dissolvido antes e depois da ozonização, para todos os tempos de contato e doses aplicadas. As concentrações de oxigênio dissolvido para o efluente dos A.C. e para o efluente ozonizado e as diferentes doses e tempos de contato aplicados estão apresentados na Tabela 5.3.

O oxigênio dissolvido é de essencial importância para os organismos aeróbios. A solubilidade do OD varia com a altitude e a temperatura. Em corpos d'água, ao nível do mar,

na temperatura de 20 °C, sua concentração de saturação é igual a 9,2 mg L<sup>-1</sup>. Valores de OD superiores a saturação, em corpos d'água, são indicativos de presença de algas (fotossíntese, com geração de oxigênio puro) (VON SPERLING, 2005).

Tabela 5.3: Oxigênio dissolvido para o efluente A.C. e para o efluente ozonizado, para as doses de 5 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.

Ensaio	Oxigênio dissolvido inicial (mg L <sup>-1</sup> )	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Ozônio consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Oxigênio dissolvido final (mg L <sup>-1</sup> )
T1	2,96	5	5	4,72	18,26
T2	2,96	5	10	4,72	17,90
T3	2,96	10	5	9,04	17,75
T4	2,96	10	10	8,28	17,71

Os valores de OD obtidos com a ozonização são superiores ao de saturação. Esta supersaturação se deve injeção de oxigênio concentrado junto com o ozônio, já que o oxigênio do ar enriquecido, proveniente do concentrador de O<sub>2</sub>, é apenas parcialmente convertido a ozônio.

### 5.1.1.2 pH

O valor médio do pH do efluente proveniente dos A.C. foi de 6,7, e para o efluente ozonizado o mínimo e máximo foram, respectivamente 6,5 e 6,7 (Tabela 5.4). No que diz respeito à estabilização do ozônio, o pH determina qual o mecanismo predominante, e dependendo deste, ambos podem ocorrer simultaneamente. A oxidação por via direta ocorre em meio ácido e a oxidação por via indireta ocorre em meio básico (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

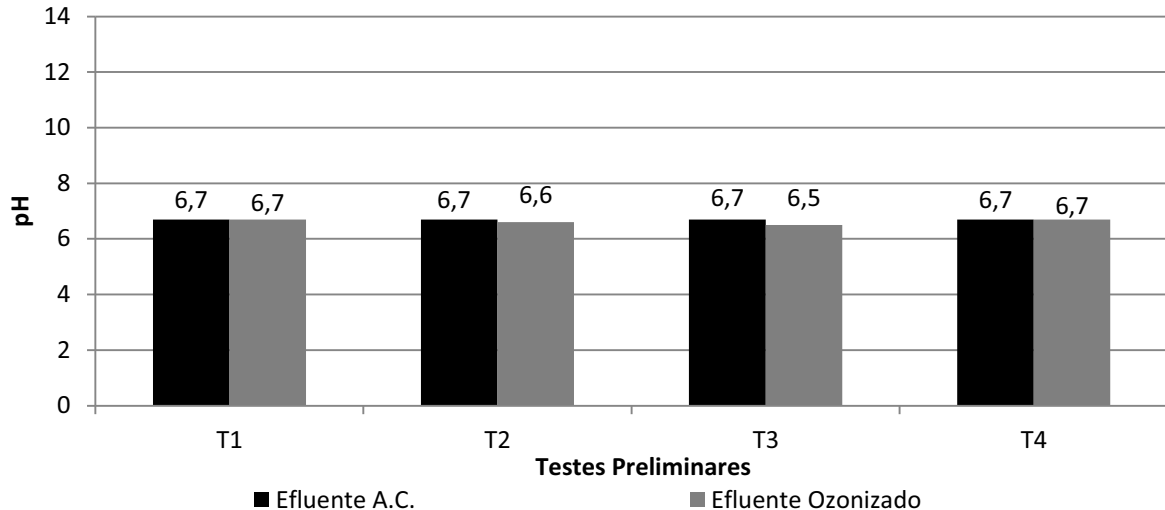
O pH é a variável mais importante pois afeta o processo de duas maneiras: a estabilização do ozônio e também determina o grau de ionização dos compostos orgânicos, o que é importante, uma vez que os ânions orgânicos altamente estabilizados reagem com o ozônio em taxas mais elevadas do que seus precursores não dissociados (BONCZ, 2002).

Não houve alteração significativa nos valores médios de pH após a ozonização, independente do tempo e dose aplicada (Figura 5.2), o que confirma os resultados obtidos por Martínez, Pérez-Parra e Suay (2011) e Kishimoto et al. (2007). Portanto, como o pH não variou significativamente, não foi observado sua influência sobre as demais variáveis analisadas.

Tabela 5.4: Valores médios de pH para o efluente proveniente dos alagados construídos e efluente ozonizado para as doses de 5 e 10 mg O<sub>3</sub>L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.

Ensaio	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Ozônio consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	pH	
				Efluente A.C.	Efluente Ozonizado
T1	5	5	4,72	6,7 ± 0,2	6,7 ± 0,2
T2	5	10	4,72	6,7 ± 0,2	6,6 ± 0,2
T3	10	5	9,04	6,7 ± 0,2	6,5 ± 0,2
T4	10	10	8,28	6,7 ± 0,2	6,7 ± 0,2

Figura 5.2: Valores médios de pH antes (efluente A.C.) e após a desinfecção (efluente ozonizado).



### 5.1.1.3 DQO

Os valores médios de DQO para o efluente ozonizado e para o proveniente dos A.C. e as diferentes doses e tempos de contato aplicados estão apresentados na Tabela 5.5. As remoções não foram significativas ( $P = 0,05$ ), independente do tempo e dose aplicada (Figura 5.3).

As remoções médias da DQO foram de 8,8 e de 21,7% para a dose aplicada de 5 mg O<sub>3</sub>L<sup>-1</sup> e os tempos de contato de 5 e 10 min, respectivamente, e de 21,7 e 18,9% para a dose aplicada de 10 mg O<sub>3</sub>L<sup>-1</sup> e os tempos de contato de 5 a 10 min, respectivamente.

Martínez, Pérez-Parra e Suay (2011) obtiveram remoções de 8% a 88% e citam que essa variação nas remoções de DQO ocorre devido ao efeito do ozônio sobre esta variável depender de muitos fatores diferentes. Bustos et al. (2014) conseguiram uma redução máxima de 36%.

Já Assirati (2005) em seu estudo de ozonização de efluentes de lagoas anaeróbia e filtros de areia verificou que não ocorreu alteração significativa na DQO, indicando que o desinfetante não promoveu degradação química da matéria orgânica.

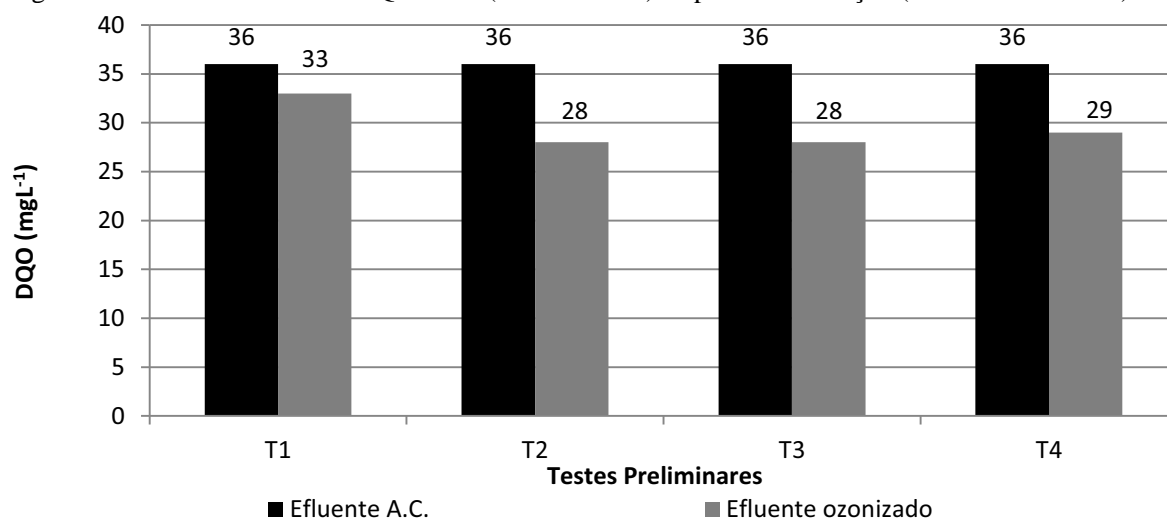
Tabela 5.5: Valores médios de DQO, eficiência média de DQO para o efluente proveniente dos alagados construídos e efluente ozonizado para as doses de 5 e 10 mg O<sub>3</sub>L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.

Ensaio	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Ozônio consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	DQO (mg L <sup>-1</sup> )		
				Efluente A.C.	Efluente Ozonizado	Eficiência na remoção (%)
T1	5	5	4,72	36 ± 20	33 ± 20	8,8
T2	5	10	4,72	36 ± 20	28 ± 19	21,7
T3	10	5	9,04	36 ± 20	28 ± 23	21,7
T4	10	10	8,28	36 ± 20	29 ± 22	18,9

Silva et al. (2010) obtiveram remoção de 27 a 44% para doses aplicadas semelhantes, porém a concentração da matéria orgânica era maior do que a do efluente utilizado neste estudo, atingindo valores superiores a 100 mg de DQO L<sup>-1</sup>, podendo também, a remoção obtida pelo autor, ter sido causada pelo stripping de alguns gases, como o metano.

Portanto, a baixa eficiência obtida na remoção de DQO, pode estar relacionada tanto ao baixo valor médio apresentado pelo efluente (antes da ozonização), quanto a este ser em grande parte matéria orgânica recalcitrante.

Figura 5.3: Valores médios de DQO antes (efluente A.C.) e após a desinfecção (efluente ozonizado).



#### 5.1.1.4 Turbidez

Ocorreu uma redução nos valores de turbidez após os ensaios de ozonização com efluente proveniente dos A.C. (Tabela 5.6). Porém não houve uma diferença significativa ( $P = 0,05$ ), entre as doses e tempos de contatos aplicados, para a remoção de turbidez, que foi em média 24,4%, segundo os testes estatísticos aplicados.

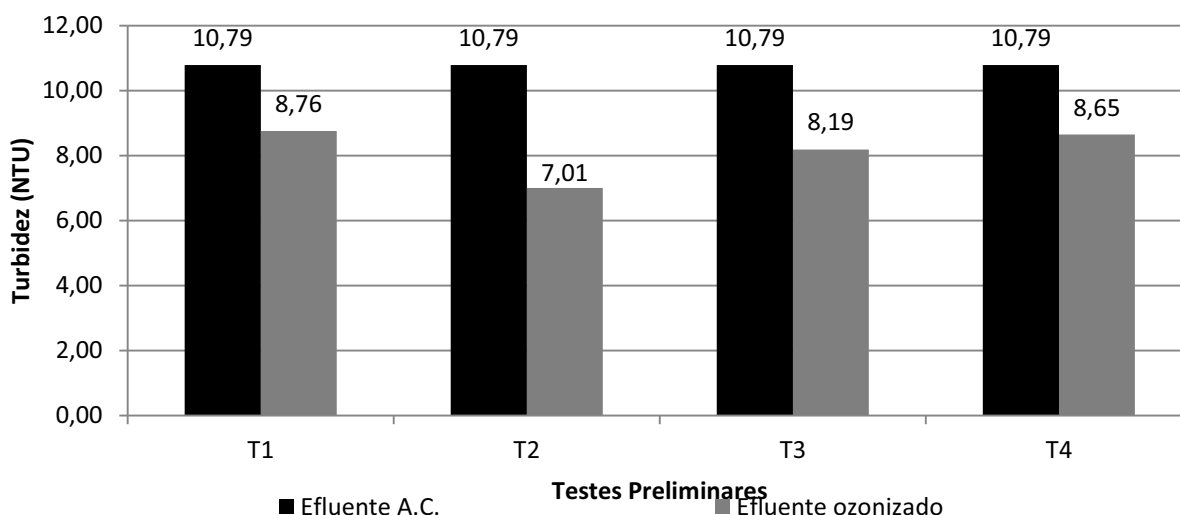


Uma remoção significativa de turbidez não foi observada durante este estudo, devido à boa qualidade do efluente neste aspecto e porque os A.C. já promovem uma remoção eficiente de turbidez, com concentrações médias de 10,79 NTU (Figura 5.4).

Tabela 5.6: Valores médios de Turbidez para o efluente proveniente dos alagados construídos e efluente ozonizado para as doses de 5,00 e 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.

Ensaio	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Ozônio consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Turbidez (NTU)	
				Efluente A.C.	Efluente ozonizado
T1	5	5	4,72	10,79 ± 4,56	8,76 ± 4,55
T2	5	10	4,72	10,79 ± 4,56	7,01 ± 3,90
T3	10	5	9,04	10,79 ± 4,56	8,19 ± 3,87
T4	10	10	8,28	10,79 ± 4,56	8,65 ± 4,17

Figura 5.4: Valores médios de turbidez antes (efluente A.C.) e após a desinfecção (efluente ozonizado).



### 5.1.1.5 Cor Verdadeira

A remoção da cor verdadeira foi em média 54% (Tabela 5.7). No entanto, não houve diferença significativa entre as doses e tempos de contato para sua remoção (Figura 5.5).

Tabela 5.7: Valores médios de cor verdadeira para o efluente proveniente dos alagados construídos e efluente ozonizado para as doses de 5,00 e 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.

Ensaio	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Ozônio consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Cor verdadeira (Pt-Co)	
				Efluente A.C.	Efluente ozonizado
T1	5	5	4,72	97 ± 20	54 ± 16
T2	5	10	4,72	97 ± 20	41 ± 29
T3	10	5	9,04	97 ± 20	39 ± 34
T4	10	10	8,28	97 ± 20	43 ± 18

A cor desempenha um papel significativo numa elementar avaliação da qualidade da água ou de águas residuárias, especialmente para uma primeira impressão (MEHRJOUET et

al, 2010). E como se pode observar na Figura 5.6, o resultado obtido é importante uma vez que se visa o reuso do efluente desinfetado.

Figura 5.5: Valores médios de cor verdadeira antes (efluente A.C.) e após a desinfecção (efluente ozonizado).

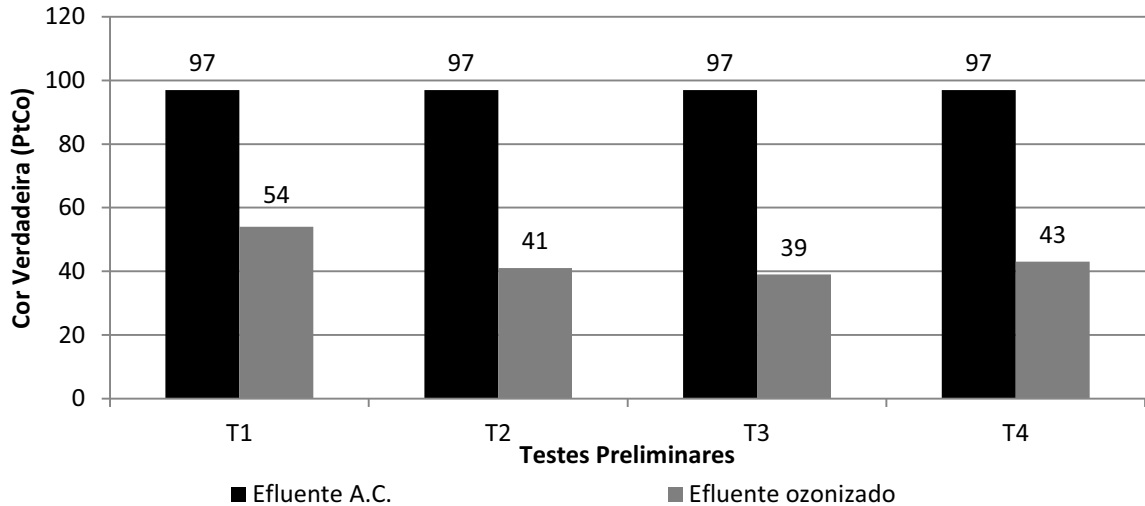


Figura 5.6: Efluente antes da ozonização (a) e após a ozonização (b) para a dose de  $10,00 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  e tempo de contato de 5 min.



### 5.1.2 Coliformes Totais e *E. coli*

A eficiência na inativação de coliformes totais e *E. coli* foram altas em quase todos os ensaios realizados (Tabela 5.8). Como o pH se manteve entre 6,5 e 6,7, não houve influência de pH na inativação de coliformes totais e *E. coli*, como indica Langlais, Reckhow e Brink (1991) e Silva et al. (2010).

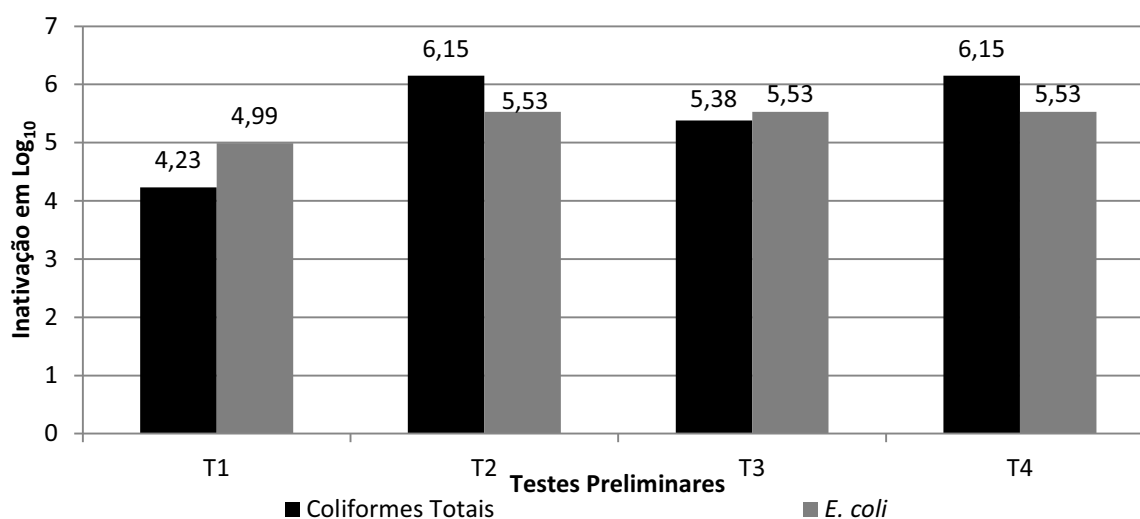
Tabela 5.8: Inativação média de coliformes totais e *E. coli* em função do tempo de contato e concentração de ozônio efetivamente consumido para o efluente ozonizado.<sup>a</sup>

Ensaio	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Ozônio consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Efluente A.C.		Efluente Ozonizado		Inativação em log <sub>10</sub>	
				Coliformes Totais	<i>E. coli</i>	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>
T1	5	5	4,72	1,41x10 <sup>6</sup>	3,36x10 <sup>5</sup>	8,24x10 <sup>1</sup>	5,43	4,23	4,99
T2	5	10	4,72	1,41x10 <sup>6</sup>	3,36x10 <sup>5</sup>	<2	<2	>6,15	>5,53
T3	10	5	9,04	1,41x10 <sup>6</sup>	3,36x10 <sup>5</sup>	9,28	<2	5,38	>5,53
T4	10	10	8,28	1,41x10 <sup>6</sup>	3,36x10 <sup>5</sup>	<2	<2	>6,15	>5,53

<sup>a</sup> Coliformes Totais e *E. coli* em NMP/100mL.

Assim como o obtido por Silva (2008), não houve diferenças significativas ( $P = 0,05$ ) na inativação entre as diferentes doses e tempos de contato aplicados (Figura 5.7). Silva et al. (2010) aplicaram as mesmas doses utilizadas neste estudo, porém com tempo de contato de 5, 10 e 15 min. No entanto, também não observaram diferenças significativas na inativação de coliformes totais e *E. coli*.

Figura 5.7: Inativação média de coliformes totais e *E. coli* para os ensaios de ozonização realizados com efluente proveniente dos Alagados Construídos.



A pouca dependência do tempo de contato para inativação de coliformes, como o observado neste estudo, está de acordo com o observado por Assirati (2005) e Finch & Smith (1989).

No estudo de Assirati (2005), tanto 2,3 min e dose de 9 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> quanto 4,6 min e dose de 17 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, causaram a mesma resposta que tempos de contato de até 12 minutos. Aos efluentes do filtro de areia, foram aplicadas doses entre 3 e 6 mg L<sup>-1</sup> de ozônio, sendo que, tempos de contato de aproximadamente 2, 4 e 10 min não apresentam diferença significativa entre si na inativação de coliformes, ou seja, a partir de 2 min de tempo de contato não houve mais variação no número de microrganismos. Finch & Smith (1989),

consideram que a não dependência do tempo de contato na inativação de coliformes como sendo devida à rápida cinética de reação desses microrganismos com o ozônio.

Ao contrário deste estudo, onde uma dose de  $5,00 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  foi suficiente para adequação do efluente aos padrões estabelecidos pela OMS (WHO, 2006) para reuso agrícola; nas pesquisas realizadas por Assirati (2005), doses de ozônio entre 8 e  $21 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  foram necessárias para a adequação dos efluentes de lagoa anaeróbia aos mesmos padrões.

### 5.1.3 Formaldeído

A formação de formaldeído para as diferentes doses e tempos de contato aplicados é apresentada na Tabela 5.9. Todas as dosagens e tempos de contato promoveram formação de formaldeído no efluente desinfetado (Figura 5.8). Houve apenas diferença significativa entre a dose de  $5 \text{ mg L}^{-1}$  e 5 minutos e a dose de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  tanto para 5 quanto para 10 min. Como praticamente não houve variação no pH e este se manteve próximo ao neutro, pode-se concluir que não afeto diretamente a formação de formaldeído.

Tabela 5.9: Valores médios de formação de formaldeído para as doses de 5 e  $10 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  e tempos de contatos de 5 e 10 minutos.

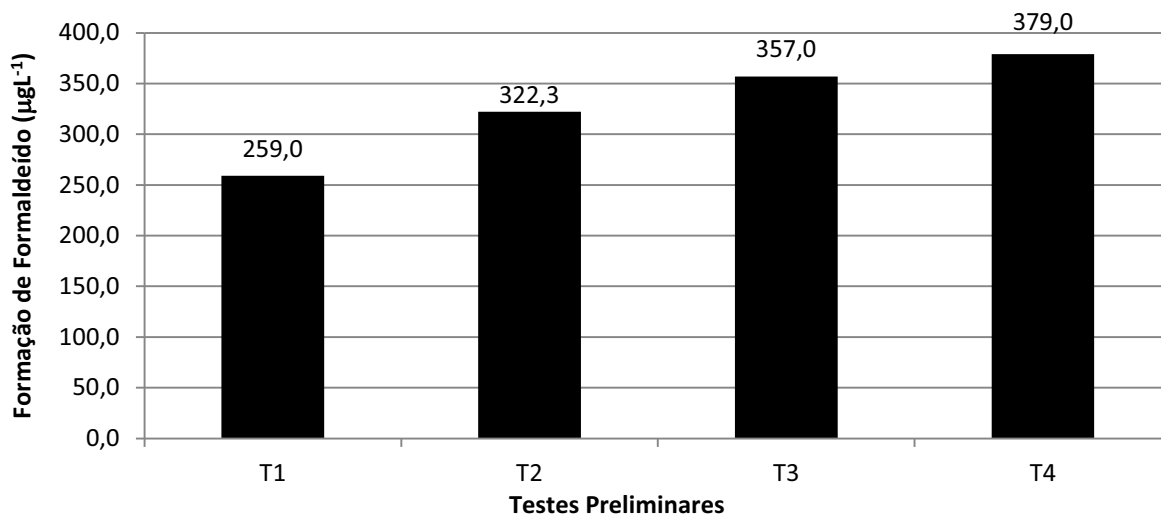
Ensaio	Ozônio aplicado ( $\text{mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ )	Tempo de contato (min)	Ozônio consumido ( $\text{mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ )	Formação de Formaldeído ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
T1	5	5	4,72	259,0
T2	5	10	4,72	322,3
T3	10	5	9,04	357,0
T4	10	10	8,28	379,0

Outra variável, além do pH e a dose de ozônio, que pode influenciar a formação de formaldeído, de acordo com Nawrocki et al. (2002) é o tempo de contato. Em seu estudo, o tempo de contato teve menor importância em comparação com a dose de ozônio para o potencial de formação dos aldeídos durante a etapa de ozonização. Embora o tempo de contato apresente menor importância na formação de aldeídos, os resultados desta etapa do estudo, indicam que esse fator também foi responsável pela diferença na formação de formaldeído para uma mesma dose aplicada.

Os testes estatísticos, no entanto, não mostraram uma diferença significativa ( $P = 0,05$ ) entre os tempos de contatos em relação a uma mesma dose, os resultados obtidos sugerem assim, que a dose de ozônio aplicada foi mais importante. Concordando assim com estudos feitos por Silva et al. (2010) que cita em seu estudo que a formação de aldeídos variou com a dose aplicada, porém o tempo de contato não foi significativo, o que confirma que a

concentração de formaldeído é fortemente dependente da dose de ozônio (NAWROCKI et al., 2002).

Figura 5.8: Valores médios de formação de formaldeído para os ensaios realizados.



No Brasil, como em muitos outros países, não há níveis permissíveis de formaldeído para descarte de efluente tratado em corpos d'água. De modo a fazer uma comparação, alguns valores permissíveis para o formaldeído na água potável foi utilizado.

Os valores de formação de formaldeído por ozonização estavam abaixo dos limites estabelecidos pela OMS (2002) e pela Austrália (AUSTRALIAN DRINKING WATER GUIDELINES, 2011), para água potável, mas estavam acima dos limites de países como o Japão (SUGAYA et al., 2001); e Polônia (NAWROCKI; BILOZOR, 1997). Estes valores indicam que deve haver alguma preocupação com a formação de formaldeído porque a pesquisa mostra que tem potencial carcinogênico e mutagênico.

#### **5.1.4 Conclusões da ozonização com efluente proveniente dos Alagados Construídos**

- Ozonização obteve uma eficiência de transferência de massa acima de 80%. Como o pH não variou substancialmente após a ozonização, não foi aferido sua influência sobre as demais variáveis analisadas.
- A porcentagem de remoção da turbidez, cor verdadeira e DQO foram relativamente baixas.

- A dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  com tempo de contato de 5 min foi suficiente para promover reduções significativas na concentração de patógenos (*E. coli*) no efluente dos A.C. para se enquadrar para reuso agrícola (WHO, 2006).
- A formação de formaldeído esteve abaixo dos limites da OMS (WHO, 2002).

## 5.2 OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DO REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO

A seguir, são apresentados os resultados e as discussões dos ensaios de ozonização para o qual foi utilizado efluente proveniente do Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio, cujas características de seu afluente (entrada) e efluente (saída) no período de coleta para estes ensaios estão apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Caracterização do efluente Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio (valores médios).

Parâmetros	Afluente	Efluente
Temperatura (°C)	26,90	28,00
OD (mg L <sup>-1</sup> )	-	1,80
pH	7,3	7,1
Turbidez (NTU)	21,23	5,62
Cor verdadeira (Pt-Co)	180	119
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	2,20	6,10
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,04	1,74
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	268	59
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	189	206
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	27,03	24,69
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	31,3	3,4
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	7,0	1,1
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	24,3	2,3
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	327,3	596,0
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	132,0	218,0
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	195,3	378,0
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$1,42 \times 10^6$	$2,42 \times 10^4$
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	$4,80 \times 10^6$	$8,50 \times 10^4$

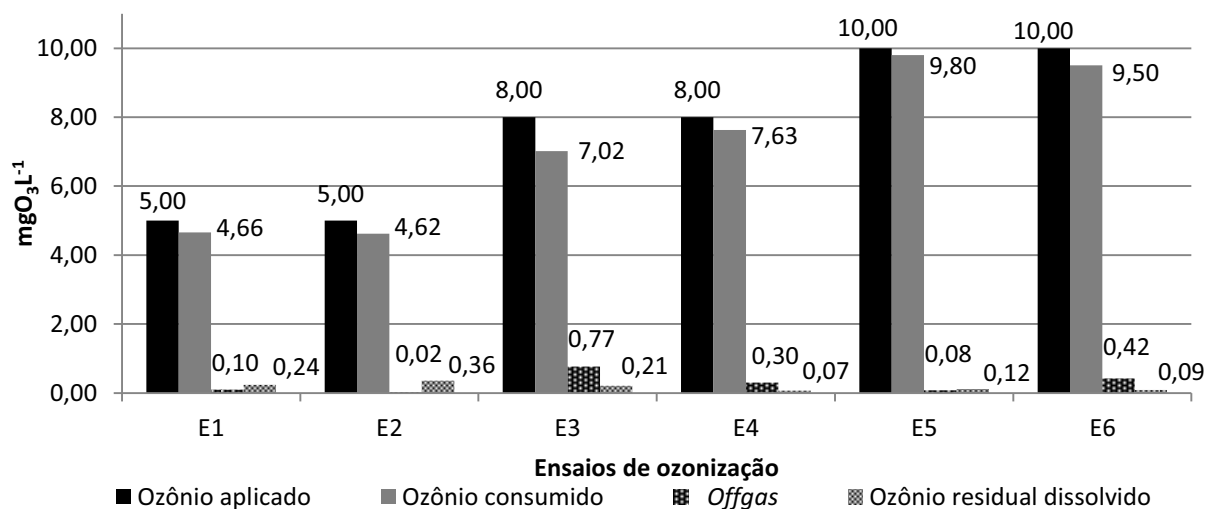
A partir dos resultados é possível observar que o reator compartimentado anaeróbio/aeróbio já proporcionou uma melhora no efluente, como redução nos valores de pH, turbidez, cor verdadeira, cor aparente, DQO, nitrogênio total Kjeldahl, série de sólidos em suspensão totais, *E. coli* e coliformes totais.

As eficiências médias na transferência de massa de ozônio, a concentração média de ozônio no *off-gas*, no ozônio residual dissolvido e no ozônio consumido são apresentados na Tabela 5.11, bem como na Figura 5.9. Nesta etapa da pesquisa, a temperatura ambiente aplicada durante os ensaios de ozonização foi entre 25,0 e 27,1 °C, superior à dos ensaios de ozonização com efluente proveniente dos A.C. (17 a 24°C).

Tabela 5.11: Concentrações médias de ozônio consumido, ozônio residual dissolvido, *off-gas* e eficiências médias na transferência de massa de ozônio para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 7 e 15 minutos.

Ensaio	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Ozônio do <i>Off-gas</i> (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio residual dissolvido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio transferido (%)
E1	5	7	0,10	0,24	4,66	93,20
E2	5	15	0,02	0,36	4,62	92,40
E3	8	7	0,77	0,21	7,02	87,75
E4	8	15	0,30	0,07	7,63	95,38
E5	10	7	0,08	0,12	9,80	98,00
E6	10	15	0,42	0,09	9,50	95,00

Figura 5.9: Dose de ozônio aplicado em cada ensaios e as concentrações médias de ozônio consumido, *off-gas* e ozônio residual dissolvido.



Para os ensaios E1 e E2 nos quais se utilizou a mesma dose que nos ensaios de ozonização com efluente proveniente dos A.C., T1 e T2 (5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>), mesmo com um tempo de contato respectivamente maior, não houve maior eficiência na transferência de ozônio, talvez devido às características diferentes dos efluentes utilizados. Porém, os ensaios E5 e E6, que utilizaram a mesma dose que os ensaios T3 e T4 (10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>), tiveram uma maior eficiência em um tempo de contato maior.

Houve diferença significativa ( $P = 0,05$ ) no ozônio consumido, para a dose aplicada de  $8 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  entre os tempos de contato de 7 e 15 min. O mesmo ocorreu para a dose de  $10 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  entre os tempos de contato de 7 e 15 min.

## 5.2.1 Parâmetros Físico-Químicos

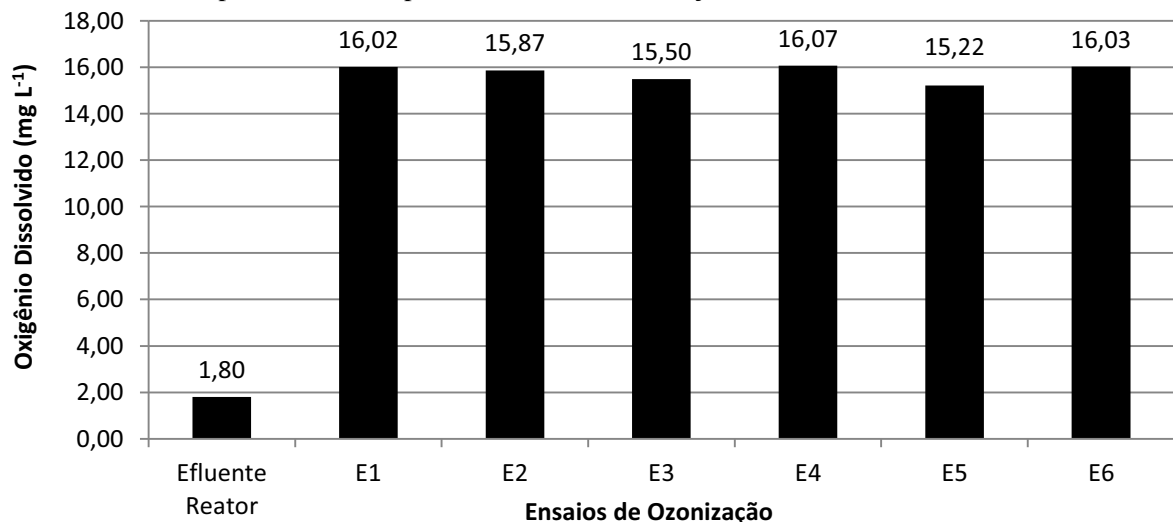
O acompanhamento dos parâmetros físico-químicos se torna necessário ao passo que este pode influenciar a ozonização, ou seja, a eficiência do ozônio em inativar patógenos.

### 5.2.1.1 Oxigênio Dissolvido

Houve diferença significativa entre a quantidade de oxigênio dissolvido antes e depois da ozonização, para todos os tempos de contato e doses aplicadas. O oxigênio dissolvido para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio, e para o efluente ozonizado para os ensaios realizados estão apresentado na Figura 5.10.

Os valores médios de oxigênio dissolvido foram menores que obtidos nos ensaios de ozonização com efluente proveniente dos A.C., também ocorrendo a supersaturação.

Figura 5.10: Valores médios de oxigênio dissolvido para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



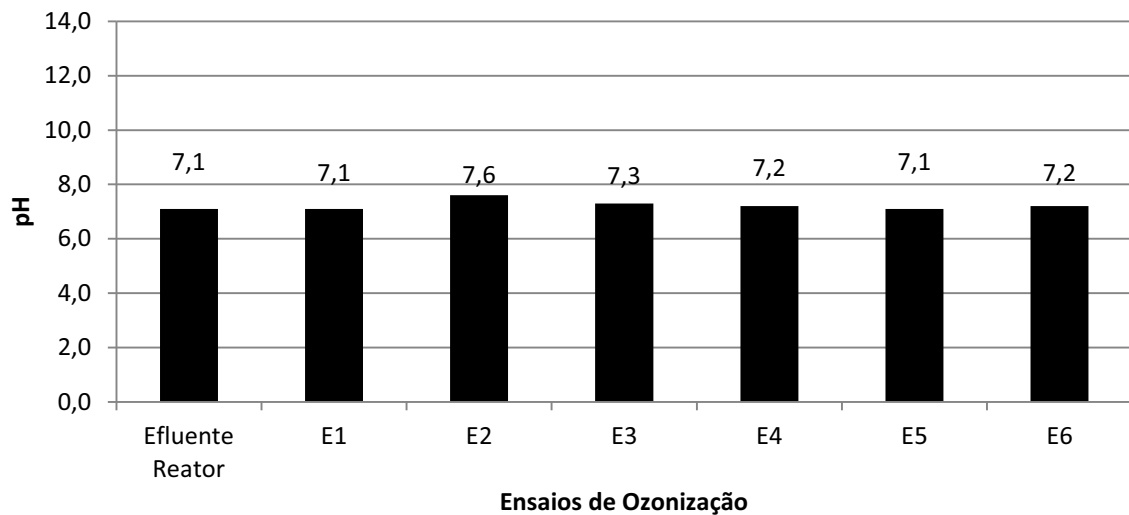
### 5.2.1.2 pH

O valor médio do pH do efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio foi de 7,08 e para o efluente ozonizado o mínimo e máximo foram, respectivamente 7,1 e 7,6 (Figura 5.11).



O aumento obtido no pH nos ensaios E2, E3, E4 e E6, não foi significativo, independente do tempo e dose aplicada, o que confirma os resultados obtidos nos ensaios de desinfecção com efluente proveniente dos A.C. e por Martínez, Pérez-Parra e Suay (2011) e Kishimoto et al. (2007). Portanto, não foi aferido a influência do pH sobre as demais variáveis analisadas.

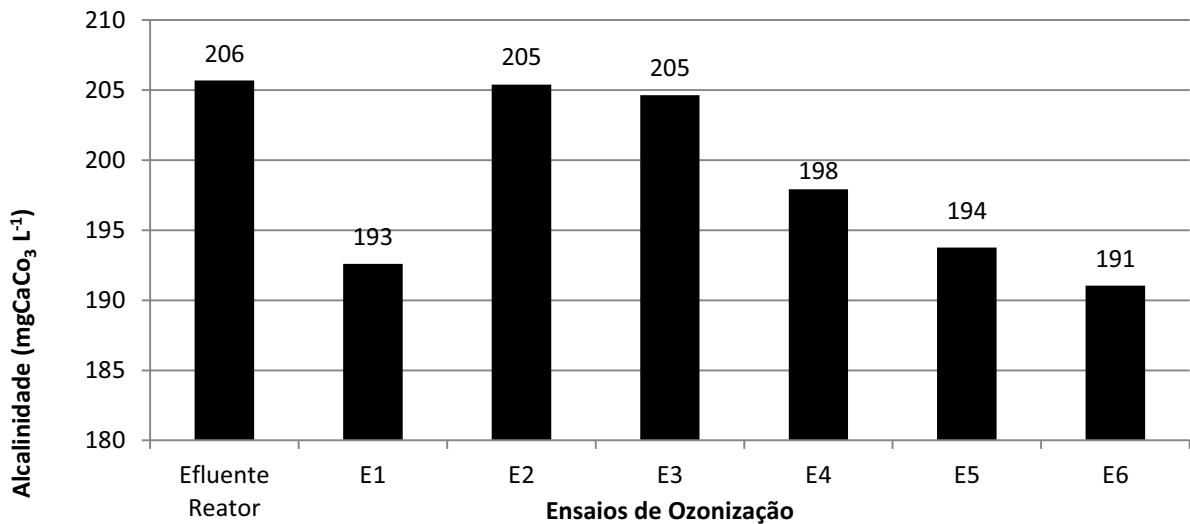
Figura 5.11: Valores médios de pH para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



### 5.2.1.3 Alcalinidade

Os valores médios de alcalinidade do efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e do efluente após a ozonização estão apresentados na Figura 5.12.

Figura 5.12 Valores médios de alcalinidade para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



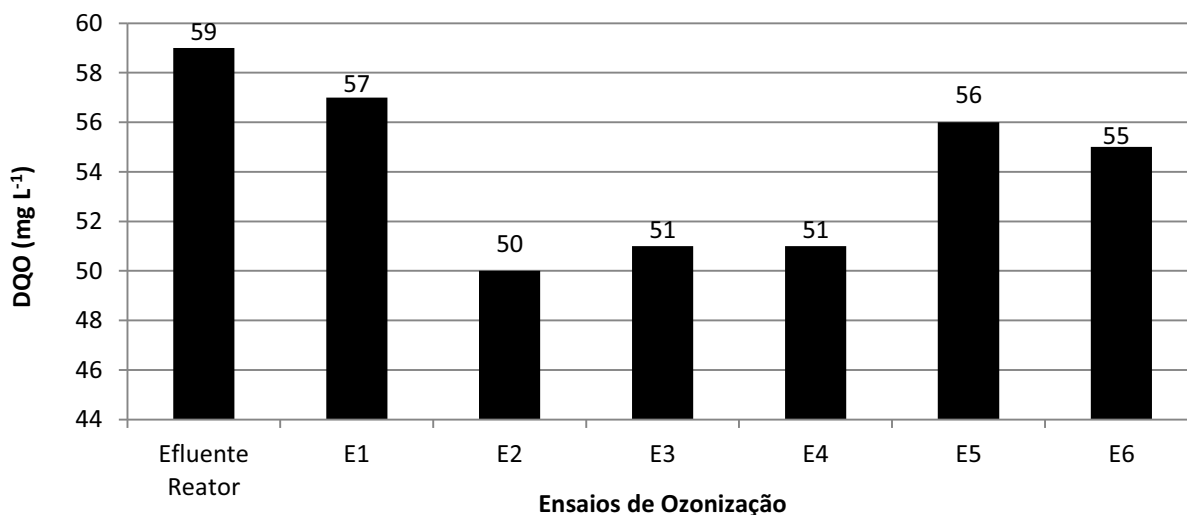
Nos ensaios E2 e E3 praticamente não houve alteração no valor médio da alcalinidade, porém nos outros ensaios (E1, E4, E5 e E6) ocorreu uma maior redução. Este comportamento é esperado, já que a alcalinidade sofre uma diminuição com a aplicação de ozônio, favorecendo as reações diretas (ozônio molecular), a qual é responsável pela desinfecção (MEDEIROS, 2010; SILVA, 2008).

Assim como Silva (2008), apesar da diminuição dos valores médios de alcalinidades, não se pode avaliar esta diminuição como significativa ( $P = 0,05$ ) de acordo com os valores observados.

#### 5.2.1.4 DQO

Os valores médios de DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente ozonizado após os ensaios de ozonização estão apresentados na Figura 5.13. Apesar de todos os ensaios promoverem redução nos valores médios de DQO, estas reduções não foram significativas ( $P = 0,05$ ), independentemente do tempo e dose aplicada, estando de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de ozonização com efluente dos A.C. e por Assirati (2005).

Figura 5.13: Valores médios de DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



No entanto a diminuição dos valores médios de DQO indica que parte da massa de ozônio foi consumida na oxidação de matéria orgânica, o que diminui a eficiência da desinfecção (BILOTTA, 2000). As reduções médias da DQO estão apresentadas na Tabela 5.12.

A eficiência na redução de DQO foi menor do que a obtida nos testes preliminares para uma mesma dose, apesar de um maior tempo de contato aplicado. Porém, o valor médio da DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado é maior que o encontrado no efluente proveniente dos A.C., o que pode indicar uma maior concentração de matéria orgânica recalcitrante.

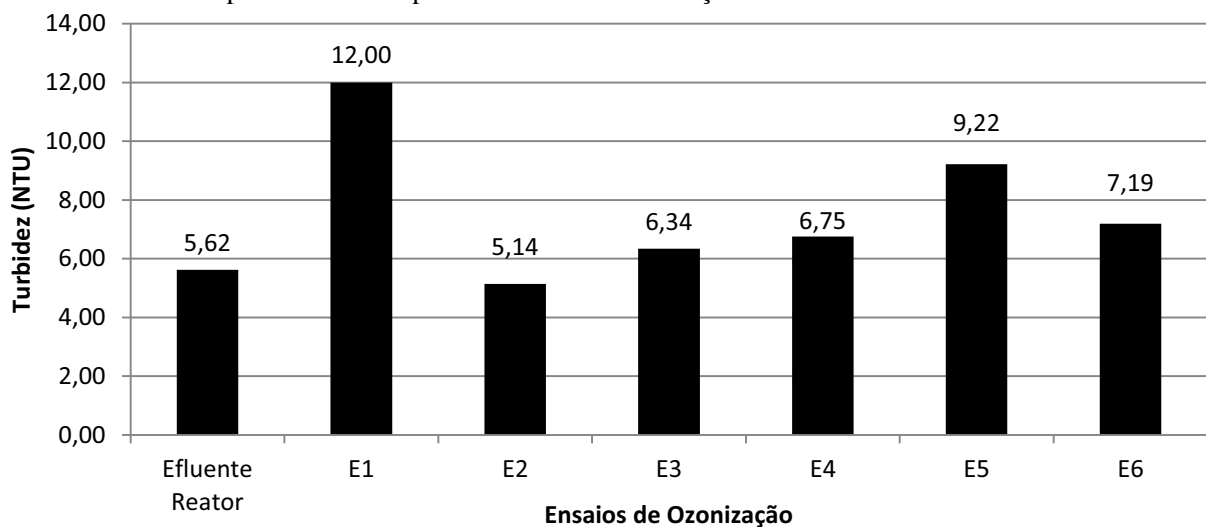
Tabela 5.12: Eficiência na redução de DQO.

Ensaio de ozonização	Eficiência na remoção de DQO (%)
E1	3,41
E2	14,48
E3	13,36
E4	13,64
E5	5,11
E6	6,55

### 5.2.1.5 Turbidez

Não houve diferença significativa nos valores de turbidez entre o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e do efluente após os ensaios de ozonização (Figura 5.14). Diferentemente da ozonização do efluente dos A.C., durante os ensaios de ozonização com efluente do reator compartimentado ocorreu um aumento do valor médio de turbidez, mesmo que não significativo.

Figura 5.14: Valores médios de turbidez para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.

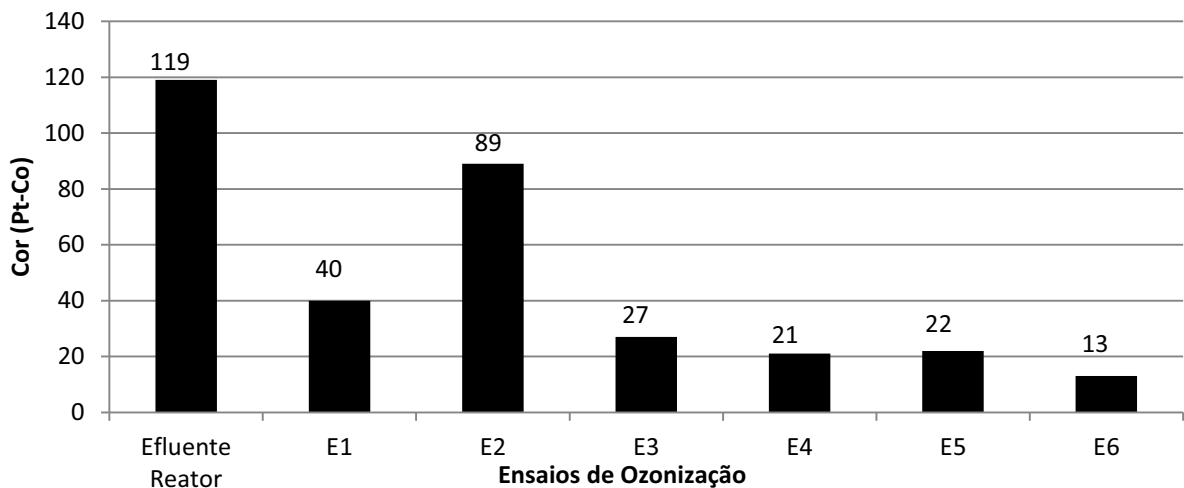


### 5.2.1.6 Cor Verdadeira

A remoção da cor verdadeira foi em média 70% (Figura 5.15), ou seja, considerável. No entanto, os testes não indicaram diferença significativa, pois o mesmo utiliza além da média, o desvio padrão, que foi alto, pois a cor verdadeira variou bastante a cada semana, o que pode ser observado nos resultados individuais apresentados no APÊNDICE E.

Houve uma remoção significativa na cor verdadeira nos ensaios E5 e E6, além de uma diferença significativa entre os ensaios E3 e E6.

Figura 5.15: Valores médios de cor verdadeira para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



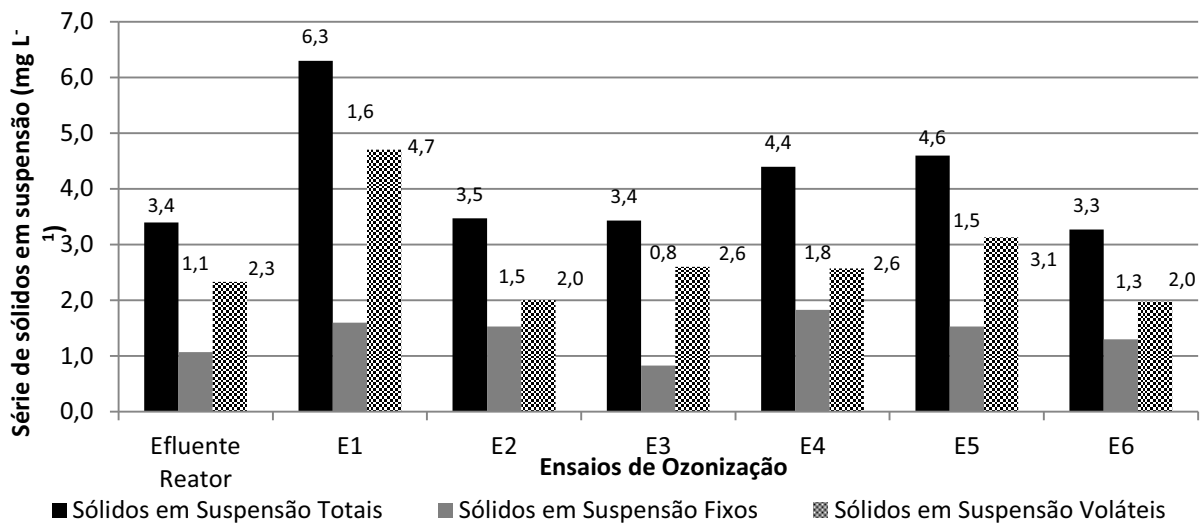
### 5.2.1.7 Série de Sólidos em Suspensão

Os valores médios dos sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização estão apresentados na Figura 5.16.

Apenas o ensaio E6 não promoveu um aumento nos sólidos em suspensão totais. No entanto o aumento dos sólidos em suspensão totais no efluente após a ozonização, observados nos demais ensaios, não foi significativo ( $P = 0,05$ ). Quanto aos sólidos em suspensão fixos apenas o E3 promoveu uma redução e não um aumento em sua concentração. Já para os sólidos em suspensão voláteis, foram os ensaios E2 e E6 que sofreram uma redução.

O aumento dos sólidos é preocupante, pois interfere negativamente nos níveis de inativação dos coliformes (ASSIRATI, 2005), aumentando a dose necessária para uma boa eficiência (LAZAROVA et al., 1998; BASSANI et al., 2002).

Figura 5.16: Valores médios de sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



Ao contrario da inconsistência encontrada nos resultados desta etapa da pesquisa, Silva (2008), ao aplicar as mesmas doses aplicadas neste estudo, obteve sempre uma redução nos valores de sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis.

Os valores médios obtidos neste estudo podem apresentar irregularidades diante da metodologia utilizada que não é muito precisa, onde se filtra uma quantidade de efluente e utiliza apenas a parte que ficou retida no papel filtro para análise, sendo que foi necessária a filtragem de 1 L de efluente devido às características do mesmo, como baixa DQO e turbidez.

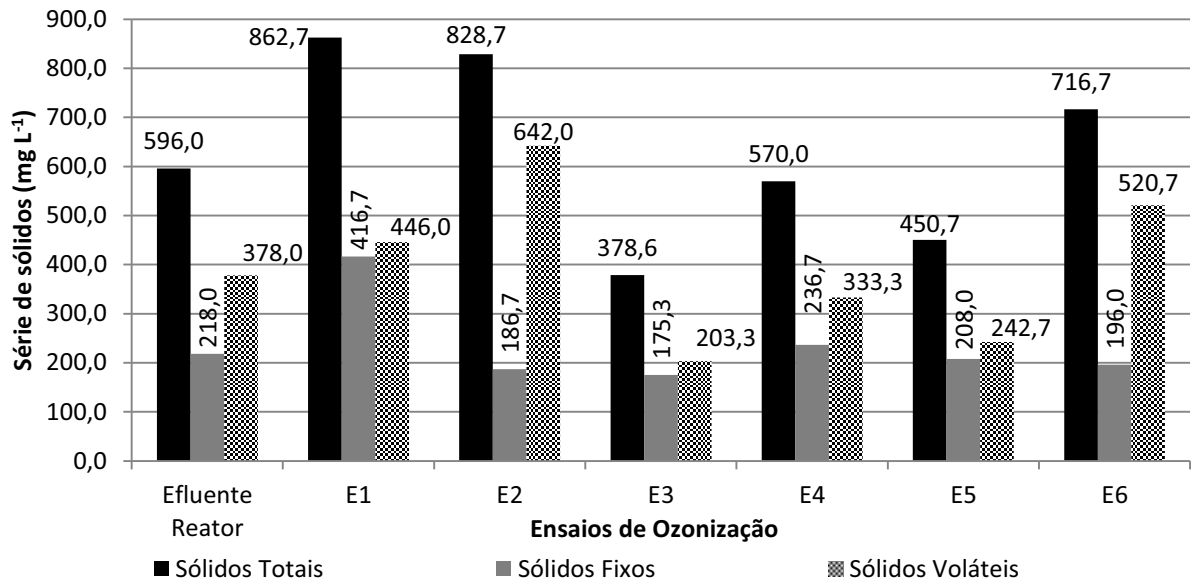
### 5.2.1.8 Série de Sólidos Totais

Os valores médios de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio estão apresentados na Figura 5.17.

Os ensaios E3 e E5 promoveram uma redução nos valores de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis, estando de acordo com os resultados obtidos por Silva (2008) e Medeiros (2010). Porém os ensaios E1, E2, E4 e E6 promoveram um aumento na formação de sólidos, ou seja, promoveu uma precipitação de certos compostos antes dissolvidos.

Apesar das alterações observadas nos ensaios de ozonização - tanto a redução quanto o aumento nos valores médios dos sólidos totais, fixos e voláteis- essas mudanças não foram significativas ( $P = 0,05$ ).

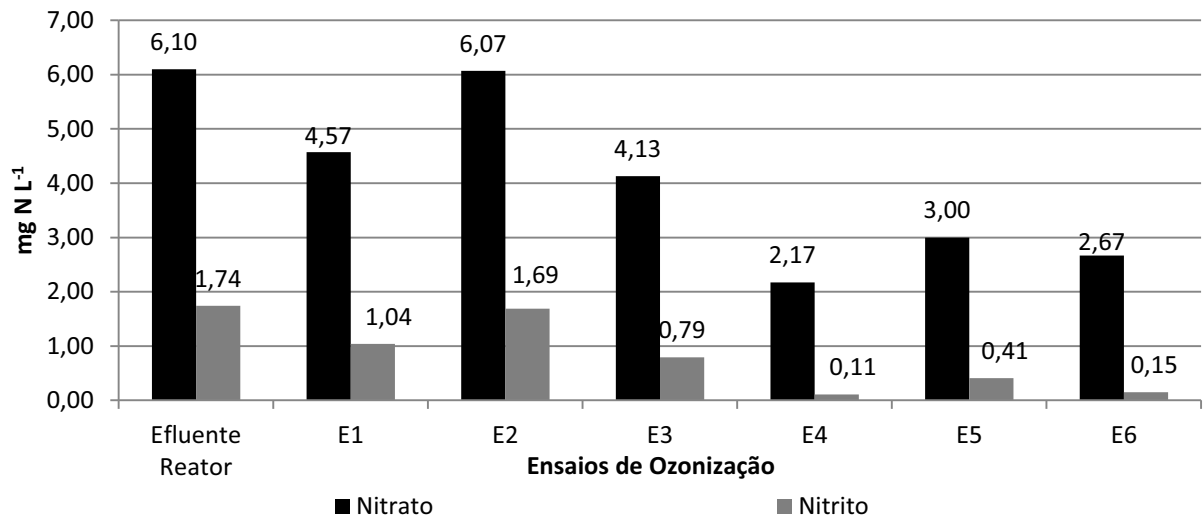
Figura 5.17 Valores médios de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



### 5.2.1.9 Série de Nitrogênio

Os valores médios de nitrato e nitrito para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização estão apresentados na Figura 5.18.

Figura 5.18 Valores médios de nitrato e nitrito para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



Todos os ensaios promoveram uma redução nas concentrações de nitrato e nitrito. Sendo que para o nitrato as porcentagens de remoção foram de 25,08; 4,92; 32,30; 64,43; 50,82 e 56,23 % para os ensaios E1, E2, E3, E4, E5 e E6, respectivamente. Para o nitrito, as porcentagens de remoção foram de 40,23; 2,87; 54,60; 93,68; 76,44 e 91,40% para os ensaios

E1, E2, E3, E4, E5 e E6, respectivamente. Portanto, tanto para nitrato quanto para nitrito, a melhor remoção foi ao aplicar uma dose de  $8,00 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  e um tempo de contato de 15 min (E4).

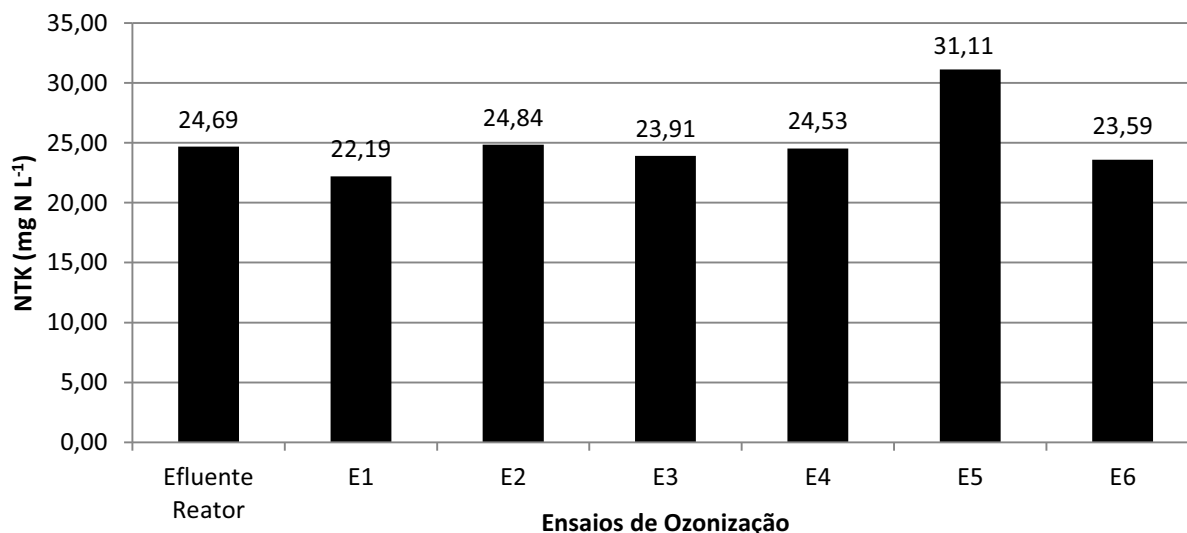
Silva (2008) também conseguiu remoções semelhantes ao se aplicar as mesmas doses de ozônio, estando de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de ozonização.

Os valores médios de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização estão apresentados na Figura 5.19.

Não houve alterações significativas nos valores médios de NTK independente da dose e tempo de contato aplicado. O valor médio para o NTK foi de  $24,69 \text{ mg N L}^{-1}$  para o efluente proveniente do reator compartimentado, e para o efluente ozonizado este chegou a uma média de  $31,11 \text{ mg N L}^{-1}$ , reforçando não haver diferença significativa, por se tratar de um valor médio.

Assim como Silva (2008), os resultados apresentados revelam pouca ou nenhuma influência do ozônio sobre o Nitrogênio Total Kjeldahl, o qual inclui nitrogênio amoniacal e nitrogênio orgânico.

Figura 5.19 Valores médios de nitrogênio total Kjeldahl para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



## 5.2.2 Coliformes Totais e *E. coli*

Os valores médios de coliformes totais e *E. coli* encontrados no efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e no efluente após os ensaios de ozonização estão apresentados na Tabela 5.13. Como o pH se manteve praticamente constante e entre a

faixa de 6 a 8, não houve influência do pH na inativação de coliformes totais e *E. coli*, como indica Langlais, Reckhow e Brink (1991) e Silva et al. (2010).

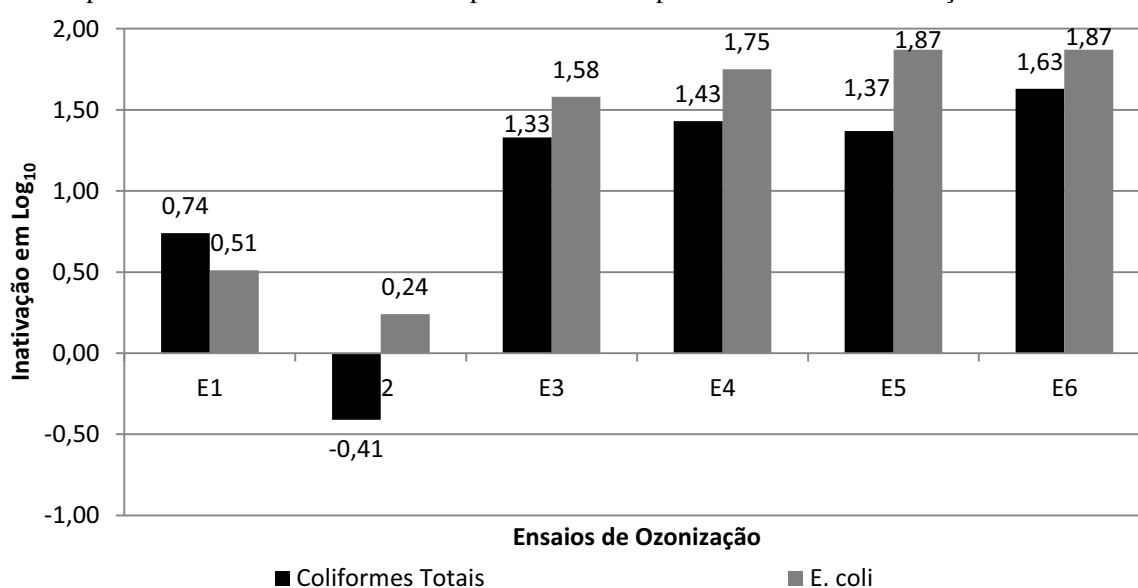
Assim como na ozonização do efluente proveniente dos A.C., não houve diferenças significativas ( $P = 0,05$ ) na inativação entre as diferentes doses e tempos de contato aplicados durante os ensaios para coliformes totais, sendo que para *E. coli*, somente entre os ensaios E1 e o E3 houve diferença significativa na inativação (Figura 5.20). Portanto, como o esperado, o tempo de contato não afetou significativamente a inativação de coliformes, assim como o ocorrido com o efluente dos A.C. durante a ozonização, nos estudos realizados por Assirati (2005) e Silva et al. (2010). Isto significa que é possível obter uma mesma eficiência pela utilização de pequenas doses e tempos de contato em efluente com características semelhantes ao efluente utilizado neste estudo.

Tabela 5.13: Inativação média de Coliformes totais e *E. coli* para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.<sup>a</sup>

Ensaio	Efluente Reator		Efluente Ozonizado		Inativação em $\log_{10}$	
	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>
E1	$7,79 \times 10^4$	$8,20 \times 10^3$	$2,43 \times 10^4$	$1,50 \times 10^3$	0,74	0,51
E2	$7,79 \times 10^4$	$8,20 \times 10^3$	$4,48 \times 10^4$	$2,09 \times 10^4$	-0,41	0,24
E3	$7,79 \times 10^4$	$8,20 \times 10^3$	$2,05 \times 10^3$	$3,83 \times 10^2$	1,33	1,58
E4	$7,79 \times 10^4$	$8,20 \times 10^3$	$1,38 \times 10^3$	$3,06 \times 10^2$	1,43	1,75
E5	$7,79 \times 10^4$	$8,20 \times 10^3$	$1,04 \times 10^3$	$3,53 \times 10^2$	1,37	1,87
E6	$7,79 \times 10^4$	$8,20 \times 10^3$	$1,04 \times 10^3$	$1,91 \times 10^2$	1,63	1,87

<sup>a</sup> Coliformes Totais e *E. coli* em NMP/100mL.

Figura 5.20: Valores médios de inativação de coliformes totais e *E. coli* para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de ozonização.



Os ensaios que promoveram um efluente adequado para reuso agrícola, em termos de coliformes fecais, foram os ensaios E3, E4, E5 e E6. Portanto para o efluente proveniente do



reator compartimentado anaeróbio/aeróbio com a aplicação apenas de ozônio foi necessária uma dose de  $8 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  para que o efluente se enquadre para reuso agrícola (WHO, 2006), ou seja, uma dose maior que a aplicada para o efluente proveniente dos A.C., devido talvez as características do efluente, como a quantidade de sólidos presentes e o valor médio de DQO.

Porém a inativação obtida nos ensaios de ozonização com efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio foi menor do que a obtida na ozonização com efluente proveniente dos alagados construídos. Os resultados podem estar associados ao fato de que o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio apresenta uma maior DQO, ou seja, quantidade de matéria orgânica, além de que os sólidos presentes podem ter dificultado a inativação devido à proteção fornecida por estes aos microrganismos durante a desinfecção (BILOTTA, 2000; SAVOYE; JANEX; LAZAROVA, 2001; WHITE, 1999), afetando diretamente a inativação dos coliformes (BASSANI et al., 2002).

Ficou evidente na inativação de coliformes que o ensaio E2 promoveu valores inconsistentes com o esperado e assim como o formaldeído e outros parâmetros, estes resultado serão discutidos no item 5.2.4. Onde, para verificar os possíveis motivos dessas inconsistências, são apresentados os resultados de um novo ensaio de ozonização com a mesma dose e tempo de contato, porém com fluxo de gas diferente.

### 5.2.3 Formaldeído

Os valores médios de formaldeído encontrados no efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e no efluente após os ensaios de ozonização estão apresentados na Figura 5.21 e os valores médios de formação de formaldeído após os ensaios de ozonização, na Figura 5.22.

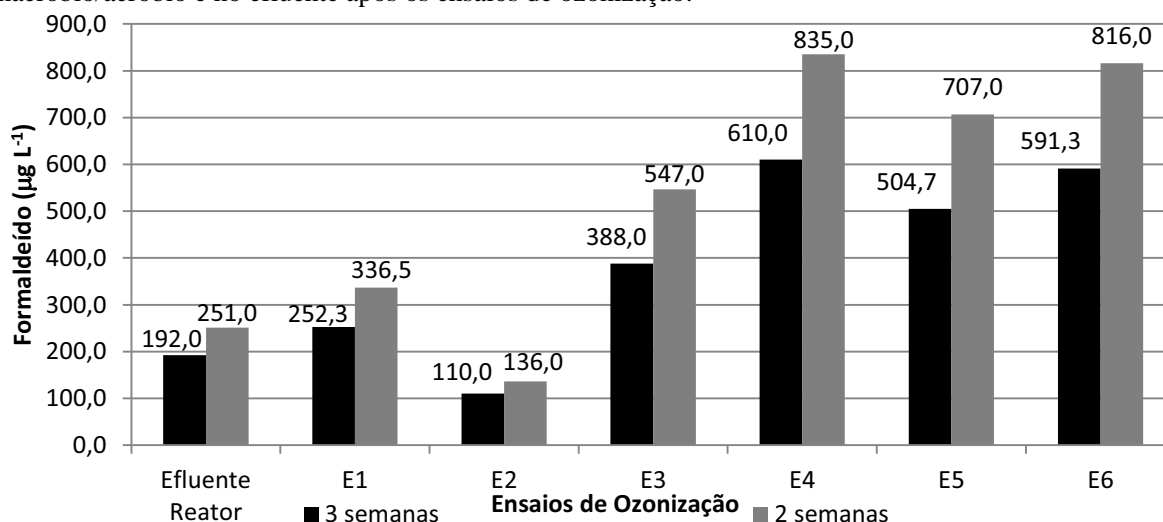
Nas Figuras 5.21 e Figura 5.22 é possível observar tanto os resultados para as três semanas de ensaios quanto apenas para as duas primeiras. A escolha por apresentar os resultados dessa forma foi devido à terceira semana apresentar resultados bem diferentes (inferiores) aos das duas primeiras semanas.

Uma das prováveis causas seria o aumento considerável nas concentrações de nitrito e nitrato (nitrificação). Sendo que, o nitrito em concentrações a partir de  $8 \text{ mg L}^{-1}$  interfere no resultado de formaldeído obtido devido ao método utilizado. Portanto, para demonstrar este efeito, foi decido apresentar os dois resultados, porém para discussão foi considerado apenas os resultados referentes às duas primeiras semanas.

Quase todos os ensaios de ozonização promoveram a formação de formaldeído no efluente desinfetado. Apenas após os ensaios E1 e E2 o valor médio de formaldeído detectado não foi significativo em relação ao efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio, devido a se tratar de valores médios. Sendo que também não houve diferença entre os valores médios dos ensaios E4 e E6.

Ao contrario dos resultados encontrados na ozonização do efluente proveniente dos A.C. e por Silva et al. (2010), onde o tempo de contato não influenciou significativamente a formação de formaldeído para uma mesma dose aplicada, os resultados destes ensaios indicam que o tempo de contato influenciou significativamente ( $P = 0,05$ ) na formação de formaldeído para uma mesma dose aplicada.

Figura 5.21: Valores médios de formaldeído no efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e no efluente após os ensaios de ozonização.

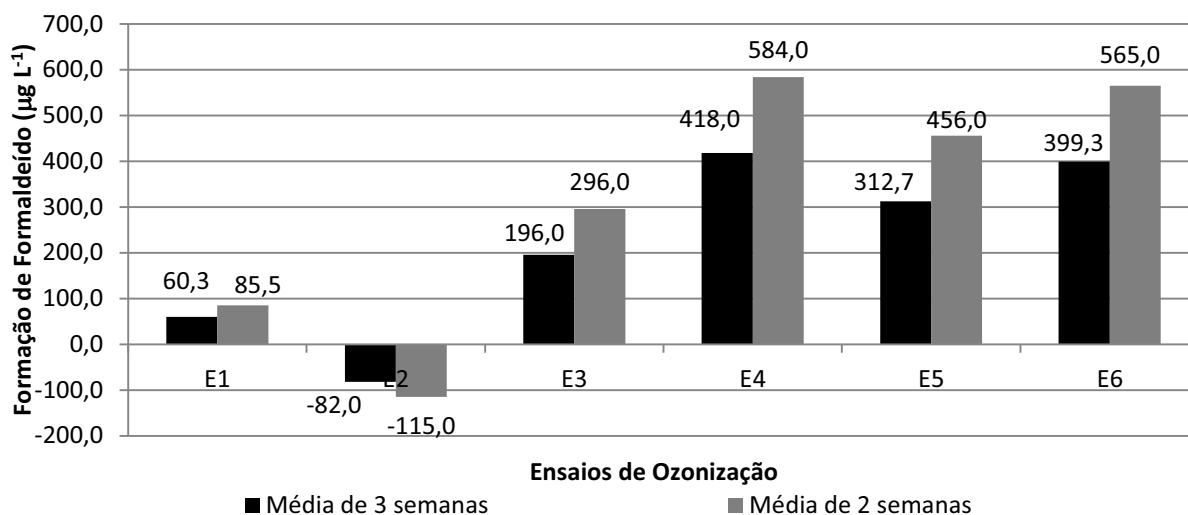


No entanto, durante a desinfecção do efluente dos A.C., a dose de 5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> (T1 e T2), a mesma utilizada nos ensaios E1 e E2, promoveu uma formação maior de formaldeído apesar de tempos de contato relativamente menores (5 e 10 min) do que o usado nos ensaios E1 e E2 (7 e 15 min, respectivamente). Porém para uma dose maior como a de 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, a mesma utilizada nos ensaios E5 e E6, os ensaios de ozonização com efluente proveniente dos A.C. (T3 e T4) promoveram uma formação menor de formaldeído. O que demonstra que a matéria orgânica presente no efluente proveniente do reator compartimentado necessita de uma maior dose de ozônio aplicada para uma maior formação de formaldeído em relação ao efluente proveniente dos A.C..

Todos os valores de formaldeído encontrados após os ensaios de ozonização estão dentro do limite da OMS (WHO, 2002), porém apenas os E1 e E2 estão dentro dos limites

impostos pela Austrália (AUSTRALIAN DRINKING WATER GUIDELINES, 2011) e nenhum esta dentro dos limites impostos por Japão (SUGAYA et al., 2001); e Polônia (NAWROCKI; BILOZOR, 1997).

Figura 5.22: Valores médios de formação de formaldeído para o efluente após os ensaios de ozonização.



O ensaio E2 promoveu valores inconsistentes com o esperado, pois o formaldeído é o subproduto mais formado durante a ozonização (WERT et al., 2007). Os problemas nos valores encontrados no ensaio E2 para formaldeído e para a formação de formaldeído serão discutidos no item 5.2.4.

#### 5.2.4 Teste adicional

Como se pôde observar na discussão dos resultados dos ensaios de ozonização, o ensaio E2 apresentou resultados inconsistentes com os outros ensaios, apresentando pouco ou nenhuma eficiência.

Vale lembrar que, como explicado no APÊNDICE C, ao calibrar o ozonizador, se varia tanto a vazão de O<sub>2</sub> no concentrador de oxigênio (de 0 a 5 L min<sup>-1</sup>) quanto a porcentagem de produção de O<sub>3</sub> no ozonizador (mínimo, 25%, 50%, 75% e máximo), de modo a conseguir a produção da dose requerida em um determinado tempo de contato.

Como este era o único ensaio que utilizava um fluxo de O<sub>2</sub> superior a 2 L m<sup>-1</sup> (2,49 L min<sup>-1</sup>) e uma produção de O<sub>3</sub> “mínima”, decidiu-se pela realização de testes adicionais com a dose de ozônio e o tempo aplicado no E2, porém com um fluxo menor de O<sub>2</sub> (0,24 L min<sup>-1</sup>) e com uma produção de ozônio maior (25%), de modo a verificar se os resultados obtidos foram consequências de problemas com os equipamentos.

Na Tabela 5.14 é possível observar tanto os resultados obtidos no ensaio E2 quanto os resultados obtidos no teste adicional. Apesar das características diferentes do efluente nos dois ensaios, ainda é possível verificar a eficiência para a dose e o tempo de contato analisado.

Tabela 5.14: Comparação entre o ensaio E2 e o teste adicional.

Ensaios	E2		Teste adicional	
	Efluente Reator	Efluente ozonizado	Efluente Reator	Efluente ozonizado
Temperatura laboratório (°C)	-	26,43	-	18,33
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	0,36	-	1,56
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	-	0,02	-	0,11
OD	1,80	15,87	3,15	15,39
pH	7,1	7,6	7,4	7,5
Turbidez (NTU)	5,62	5,14	1,55	1,49
Cor verdadeira (Pt-Co)	119	89	91	42
Cor aparente (Pt-Co)	196	175	117	53
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	6,10	6,07	29,27	25,4
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,74	1,69	9,22	7,18
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	59	50	40	32
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	148,3	110,0	75,8	163,2
Alcalinidade (mgCaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	206	205	219	212
Nitrogênio Total Kjeldahl	24,69	24,84	39,98	41,4
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	3,4	3,5	2,2	1,8
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,1	1,5	0,1	0,1
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	2,3	2,0	2,1	1,7
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	596,0	828,7	490,7	363,3
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	218,0	186,7	225,3	170,7
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	378,0	642,0	265,3	192,7
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	8,20x10 <sup>3</sup>	2,09x10 <sup>4</sup>	4,21x10 <sup>2</sup>	3,25x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	7,79x10 <sup>4</sup>	4,48x10 <sup>4</sup>	9,24x10 <sup>3</sup>	2,71x10 <sup>3</sup>

Quanto ao pH, no teste adicional, houve um aumento após a ozonização, porém menor do que o ocorrido no E2. A turbidez durante o teste adicional, comparada ao ensaio E2, estava muito menor, o que pode ter favorecido novamente a sua redução no teste adicional (de 1,55 para 1,49 NTU).

A eficiência na remoção de cor verdadeira foi de 25,28% (E2) para 53,68% (teste adicional), sendo que a cor aparente foi de 10,71% (E2) para 54,98% (teste adicional). Portanto tanto a cor verdadeira quanto a aparente tiveram visíveis melhoras no teste adicional.

O formaldeído foi o que apresentou a maior diferença. Enquanto no ensaio E2 seu valor médio era menor do que o encontrado no efluente não ozonizado (a saber, que a ozonização promove a formação de formaldeído), no teste adicional houve a formação de formaldeído (87,34 µg L<sup>-1</sup>) como esperado.

Apesar de o efluente utilizado no teste adicional apresentar inicialmente uma menor concentração de coliformes totais e *E. coli* que no ensaio E2, no teste adicional obteve-se um log de inativação de 0,53, ao contrario do ensaio E2, onde a inativação não ocorreu (apresentado no item 5.2.2).

Após análises dos resultados, duas possibilidades ocorrem. Primeiramente existe a possibilidade de que a regulagem “mínima” do ozonizador estivesse com problemas, já que todas as outras foram testadas e realmente estavam produzindo ozônio normalmente.

Uma segunda possibilidade é a interferência do fluxo de gás na entrada da coluna. O fluxo utilizado inicialmente, ou seja, maior, pode não ter permitido que o ozônio interagisse de forma eficiente com o efluente, devido à velocidade de ascensão das bolhas na coluna.

Este fato ocorrido demonstra a importância tanto de manutenção regular do equipamento utilizado quanto de uma escolha apropriada do fluxo de gás a se utilizado.

### 5.2.5 Conclusões

- Para os ensaios de ozonização aplicando uma dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  a eficiência na transferência de massa de ozônio foi menor que a obtida na ozonização ode efluente proveniente dos A.C., provavelmente devido às diferenças nas características dos efluentes utilizados em cada um. Porém ao se aplicar uma dose maior ( $10 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ ), uma eficiência maior também foi observada.
- Para os ensaios de ozonização E2, E3, E4 e E6 foi observado um aumento nos valores de pH dos efluentes ozonizados. Porém este aumento não é considerado significativo. Por meio do teste estatístico realizado verificou-se que para faixa de concentração de ozônio aplicada não há influência significativa na remoção da alcalinidade, como o tempo de contato também não foi.
- As concentrações de ozônio e tempos de contatos aplicados não promoveram alteração significativa nem nos sólidos em suspensão totais nem nos sólidos totais. Logo a concentração de sólidos no efluente pode ter influenciado negativamente na inativação de patógenos.
- Os ensaios de ozonização promoveram reduções em torno de 70 % para cor verdadeira, porém de acordo com os testes estatísticos, estas remoções não foram significativas, devido ao alto desvio padrão. Diferentemente da desinfecção do

efluente dos A.C., a ozonização do efluente proveniente do reator compartimentado promoveu um aumento na turbidez, porém a mesma não foi significativa.

- Todos os ensaios de ozonização promoveram reduções nas concentrações de nitrato e nitrito, porém essas remoções não foram significativas, independente das doses e tempos de contato aplicados. O nitrogênio total Kjeldahl sofreu pouca ou nenhuma influência do ozônio, pois o ozônio pouco reage com o nitrogênio.
- Nos ensaios que se aplicou  $5 \text{ mg O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$  e tempos de contato de 7 e 15 min, a formação de formaldeído não foi significativa. Para as doses aplicadas de 8 e  $10 \text{ mg O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$  e tempos de contato de 7 e 15 min, a concentração média de formaldeído no efluente ozonizado foi significativamente maior que a encontrada no efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio.
- Todos os ensaios de ozonização promoveram concentrações de formaldeído que estavam dentro do limite imposto pela OMS (água potável), porém superior aos limites impostos pela Austrália, Japão e Polônia.
- De acordo com o teste estatístico realizado é possível afirmar que não houve diferença significativa entre as doses de ozônio e o tempos de contato para a inativação de coliformes totais e *E. coli*. Sendo que a inativação obtida foi menor que a observada nos testes preliminares, possivelmente devido à quantidade de sólidos presentes, que afetam negativamente a desinfecção.
- Os ensaios de ozonização que promoveram um efluente adequado para reuso agrícola em termos de coliformes fecais, foram os ensaios E3, E4, E5 e E6. Portanto para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio com a aplicação apenas de ozônio foi necessária uma dose de  $8 \text{ mg O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$  para que o efluente se enquadre para reuso agrícola (WHO, 2006), ou seja, uma dose maior que a aplicada para o efluente proveniente dos A.C., devido talvez às características do efluente, como a quantidade de sólidos presentes e o valor médio de DQO.

### 5.3 PEROXIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVENIENTE DO REATOR COMPARTIMENTADO ANAERÓBIO/AERÓBIO

A seguir são apresentados os resultados e as discussões dos ensaios de peroxização, para o qual foi utilizado efluente proveniente do Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio.

Devido a grande quantidade de análises, os ensaios foram divididos em duas etapas; na primeira etapa foram feitos ensaios utilizando o tempo de contato de 7 min, e na segunda, o tempo de contato de 15 min. e cujas características do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio no período de coleta para estes ensaios estão apresentadas na Tabela 5.15.

A partir dos resultados é possível observar que o reator compartimentado anaeróbio/aeróbio já proporcionou uma melhora no efluente, como redução nos valores de pH (apenas durante o ensaio de peroxidação a 7 min), turbidez, cor verdadeira, cor aparente, DQO, alcalinidade, nitrogênio total Kjeldahl, Série de sólidos em suspensão totais, série de sólidos totais (apenas durante o ensaio de peroxidação a 15 min), *E. coli* e coliformes totais. No entanto promoveu um aumento de nitrato (apenas durante o ensaio de peroxidação a 15 min) e nitrito, devido provavelmente à injeção de ar na quarta câmara aeróbia que pode promover a nitrificação.

Tabela 5.15: Caracterização do efluente Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio.

Tempo de contato	7 min		15 min	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
<b>Parâmetros</b>				
<b>Temperatura (°C)</b>	28,00	25,27	27,70	27,00
<b>OD</b>	-	1,87	-	2,82
<b>pH</b>	7,1	7,1	7,3	7,2
<b>Turbidez (NTU)</b>	14,90	2,86	25,67	1,94
<b>Cor verdadeira (Pt-Co)</b>	194	74	248	96
<b>Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (mg N L<sup>-1</sup>)</b>	2,03	1,90	2,33	5,10
<b>Nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) (mg N L<sup>-1</sup>)</b>	0,20	1,87	0,01	1,87
<b>DQO (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>)</b>	114	30	163	39
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>)</b>	203	135	342	234
<b>Nitrogênio Total Kjeldahl</b>	32,63	14,69	63,79	39,69
<b>Sólidos em Suspensão Totais (mg L<sup>-1</sup>)</b>	37,9	4,5	36,3	2,0
<b>Sólidos em Suspensão Fixos (mg L<sup>-1</sup>)</b>	11,8	1,8	9,5	1,7
<b>Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L<sup>-1</sup>)</b>	26,1	2,7	26,8	0,3
<b>Sólidos Totais (mg L<sup>-1</sup>)</b>	390,0	566,0	420,0	374,0
<b>Sólidos Fixos (mg L<sup>-1</sup>)</b>	198,0	204,0	242,7	246,0
<b>Sólidos Voláteis (mg L<sup>-1</sup>)</b>	192,0	362,0	177,3	128,0
<b><i>E. coli</i> (NMP/100 mL)</b>	1,83x10 <sup>5</sup>	5,40x10 <sup>3</sup>	1,60x10 <sup>6</sup>	3,22x10 <sup>3</sup>
<b>Coliformes Totais (NMP/100 mL)</b>	1,54x10 <sup>6</sup>	6,30x10 <sup>4</sup>	6,78x10 <sup>6</sup>	4,04x10 <sup>4</sup>

As eficiências médias na transferência de massa de ozônio, a concentração média de ozônio no *off-gas*, de ozônio residual dissolvido, peróxido de hidrogênio residual dissolvido e no ozônio consumido são apresentados na Tabela 5.16, bem como na Figura 5.23 e Figura 5.24. Nesta etapa da pesquisa, para o tempo de contato de 7 min (EP1 a EP6) a temperatura

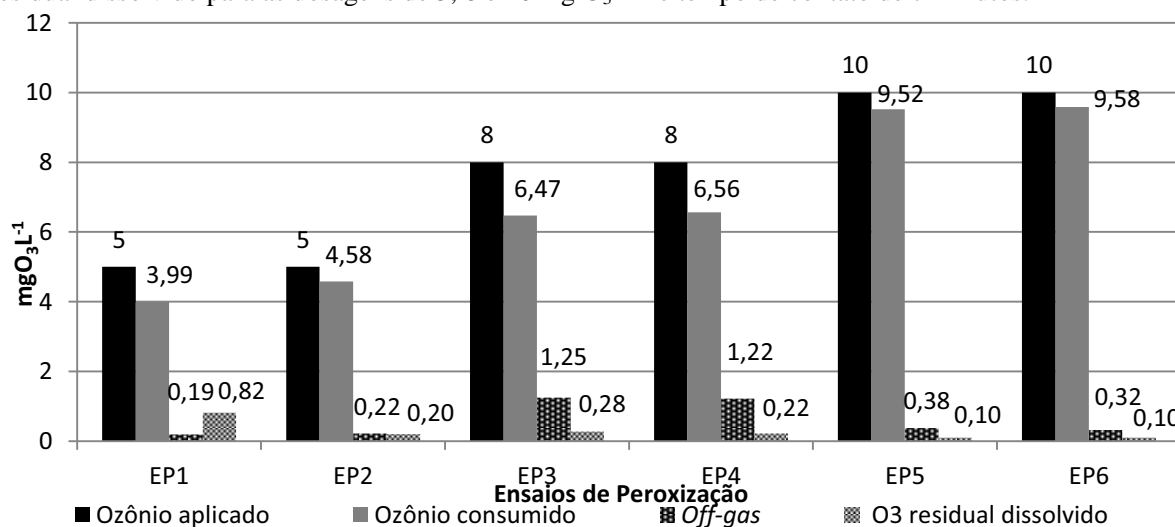
ambiente foi de 24,0 a 28,1°C e para o tempo de contato de 15 min (EP7 a EP12) a temperatura ambiente foi de 22,7 a 27,8 °C.

A eficiência na transferência de massa de ozônio variou entre 79,8 (EP1) e 95,8% (EP6). Para uma mesma dose de ozônio e tempo de contato, ao se variar a dose de peróxido de hidrogênio não se observou uma diferença significativa no consumo de ozônio. Sendo que para uma mesma dose de ozônio e de peróxido de hidrogênio, um tempo de contato maior favoreceu um aumento significativo no ozônio consumido apenas quando se aplicou 8 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, ou seja, entre os ensaios EP3 e EP9 e entre EP4 e EP10.

Tabela 5.16: Concentrações médias de ozônio consumido, ozônio residual dissolvido, *off-gas* e eficiências médias na transferência de massa de ozônio para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 7 e 15 minutos.

Ensaio	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Peróxido de hidrogênio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Ozônio do Off-gas (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio residual dissolvido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio consumido (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Ozônio transferido (%)
EP1	5	1,0	7	0,19	0,82	3,99	79,8
EP2	5	3,0	7	0,22	0,20	4,58	91,6
EP3	8	1,6	7	1,25	0,28	6,47	80,9
EP4	8	4,8	7	1,22	0,22	6,56	82,0
EP5	10	2,0	7	0,38	0,10	9,52	95,2
EP6	10	6,0	7	0,32	0,10	9,58	95,8
EP7	5	1,0	15	0,21	0,23	4,56	91,2
EP8	5	3,0	15	0,28	0,13	4,59	91,8
EP9	8	1,6	15	0,37	0,05	7,58	94,7
EP10	8	4,8	15	0,40	0,07	7,53	94,1
EP11	10	2,0	15	0,48	0,05	9,47	94,7
EP12	10	6,0	15	0,46	0,06	9,48	94,8

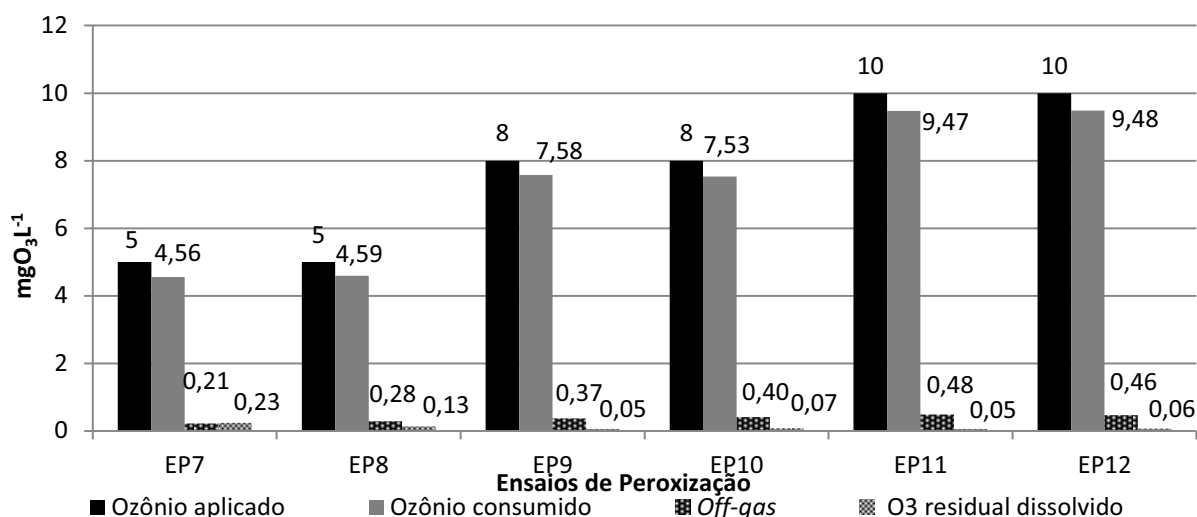
Figura 5.23: Doses de ozônio aplicada, concentrações médias de ozônio consumido, *off-gas* e ozônio residual dissolvido para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempo de contato de 7 minutos.





Apesar de mínima a diferença, de um modo geral os ensaios de peroxização promoveram uma menor transferência de massa de ozônio em relação aos ensaios de ozonização, quando da aplicação da mesma dose e tempo de contato. Ou seja, a adição de peróxido de hidrogênio não favoreceu um maior consumo de ozônio durante os ensaios.

Figura 5.24: Doses de ozônio aplicadas, concentrações médias de ozônio consumido, *off-gas* e ozônio residual dissolvido para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempo de contato de 15 minutos.



A eficiência no consumo de peróxido de hidrogênio pode se observada na Tabela 5.17. Para o tempo de contato de 7 min, ensaios de peroxização tiveram eficiência de transferência de massa de peróxido de hidrogênio de 23,00; 25,66; 70,62; 35,42; 23,50 e 33,33 % para os ensaios de peroxização de EP1 a EP6.

Tabela 5.17: Concentrações médias de peróxido de hidrogênio consumido, peróxido de hidrogênio residual dissolvido e eficiências médias no consumo de massa de peróxido de hidrogênio para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempos de contatos de 7 e 15 minutos.

Ensaio	Ozônio aplicado (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Peróxido de hidrogênio aplicado (mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	Tempo de contato (min)	Peróxido de hidrogênio residual dissolvido (mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	Peróxido de hidrogênio consumido (mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	Peróxido de hidrogênio consumido (%)
EP1	5	1,0	7	0,77	0,33	33,00
EP2	5	3,0	7	2,23	0,77	25,66
EP3	8	1,6	7	0,47	1,13	70,62
EP4	8	4,8	7	3,10	1,70	35,42
EP5	10	2,0	7	1,53	0,47	23,50
EP6	10	6,0	7	4,00	2,00	33,33
EP7	5	1,0	15	0,00	1,00	100,00
EP8	5	3,0	15	2,00	1,00	33,33
EP9	8	1,6	15	0,50	1,10	68,75
EP10	8	4,8	15	3,17	1,63	33,96
EP11	10	2,0	15	0,63	1,37	68,50
EP12	10	6,0	15	4,34	1,66	27,66

Para o tempo de contato de 15 min, a eficiência de transferência de massa de peróxido de hidrogênio foi de 100,00; 33,33; 68,75; 33,96; 68,50 e 27,66 % para os ensaios de peroxidação de EP7 a EP12.

O tempo de contato de um modo geral pouco afetou o consumo do peróxido de hidrogênio entre os diferentes tempos de contato para uma mesma dose. Deste modo a melhor eficiência de consumo de massa de peróxido de hidrogênio foi obtida no ensaio EP7 e a pior no ensaio EP1 (Figura 5.25 e Figura 5.26).

Figura 5.25: Doses de peróxido de hidrogênio aplicada, peróxido de hidrogênio consumido e peróxido de hidrogênio residual dissolvido para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempo de contato de 7 minutos.

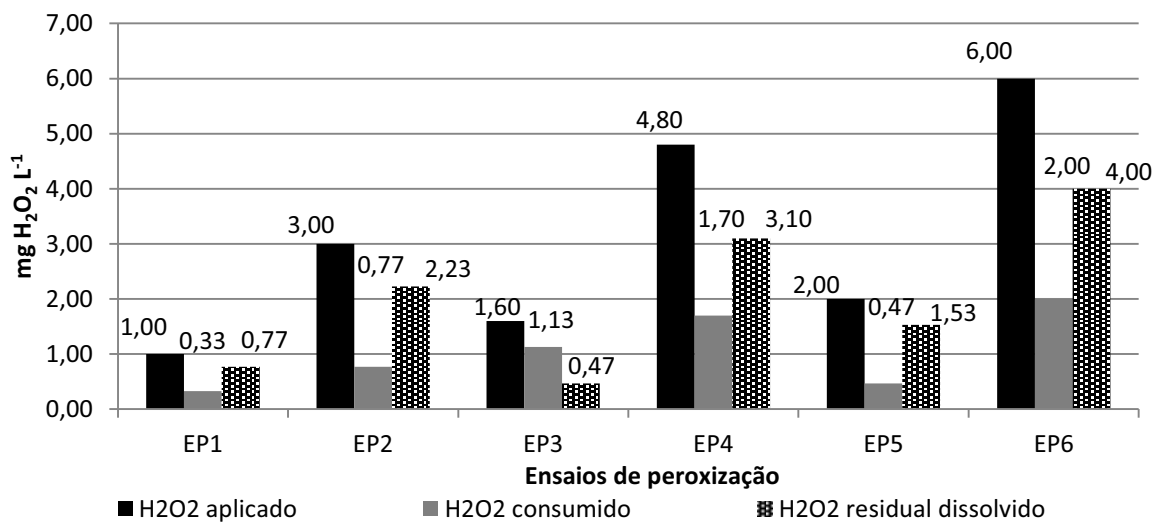
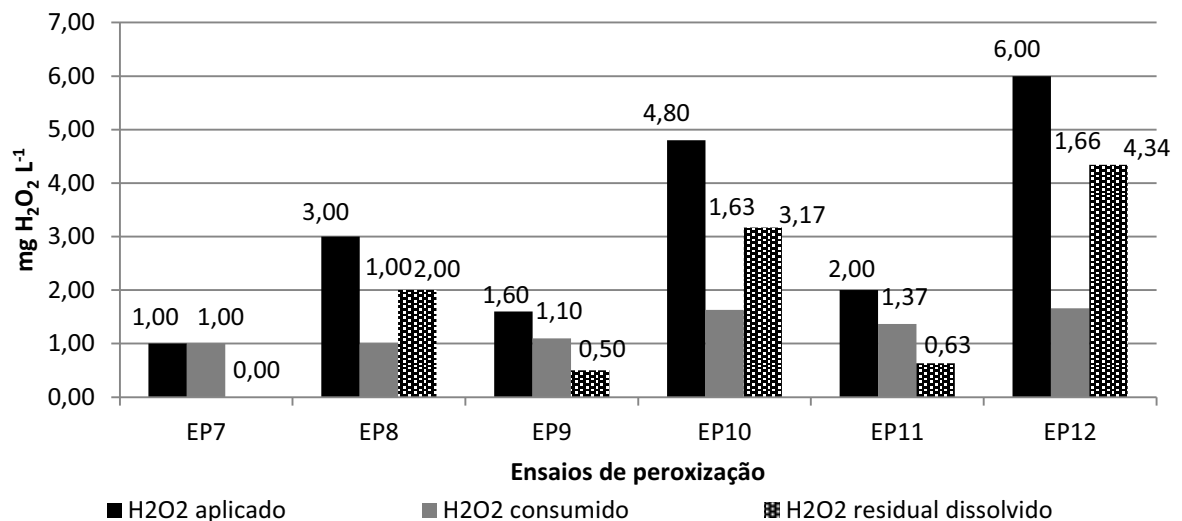


Figura 5.26: Doses de peróxido de hidrogênio aplicada, peróxido de hidrogênio consumido e peróxido de hidrogênio residual dissolvido para as dosagens de 5, 8 e 10 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e tempo de contato de 15 minutos.



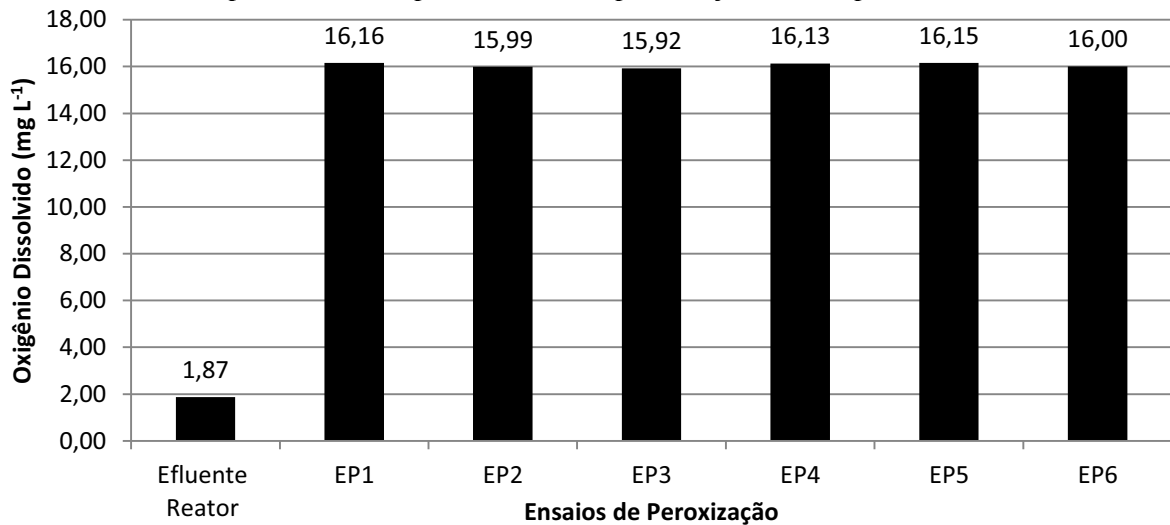
### 5.3.1 Parâmetros Físico-Químicos

O acompanhamento dos parâmetros físico-químicos se torna necessário ao passo que este pode influenciar a ozonização, ou seja, a eficiência do ozônio em inativar patógenos.

#### 5.3.1.1 Oxigênio Dissolvido

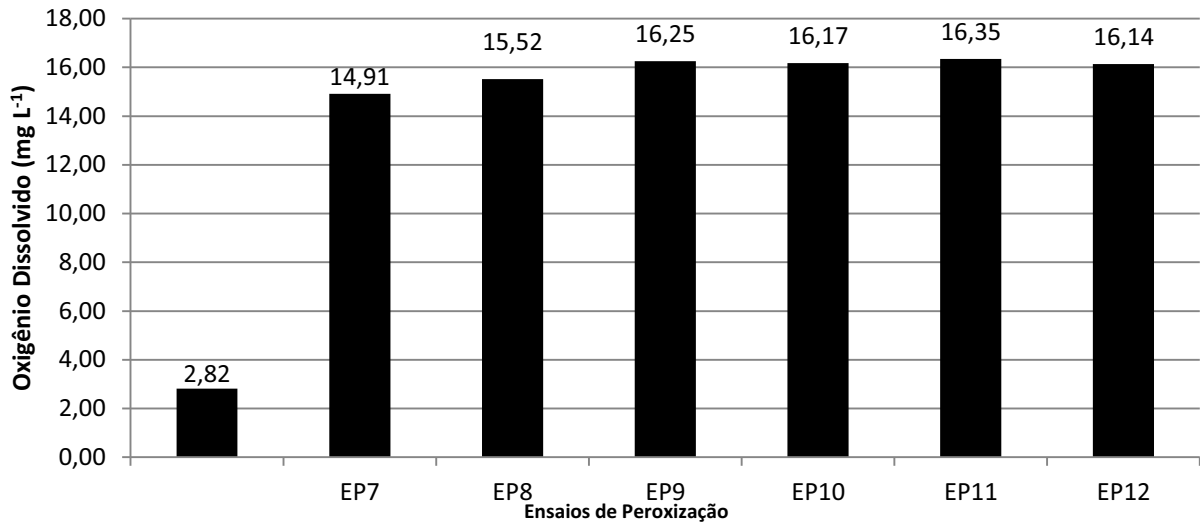
Houve diferença significativa entre a quantidade de oxigênio dissolvido antes e depois da peroxização, para todos os tempos de contato e doses aplicadas, porém não houve diferença significativa entre uma mesma dose aplicada e seus respectivos tempos de contato. O oxigênio dissolvido para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbico/aeróbico, e para o efluente após os ensaios de peroxização realizados estão apresentados nas Figura 5.27 e Figura 5.28.

Figura 5.27: Valores médios de oxigênio dissolvido para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbico/aeróbico e para o efluente após os ensaios de peroxização com tempo de contato de 7 min.



Os valores médios de oxigênio dissolvido estavam próximos ao obtido nos ensaios de ozonização; porém, assim como na ozonização do efluente proveniente dos A.C. e nos ensaios de ozonização do efluente do reator compartimentado, o oxigênio dissolvido após os ensaios de peroxização estavam acima do valor de saturação. Os valores de OD obtidos com a ozonização são superiores ao de saturação. Esta supersaturação se deve injeção de oxigênio concentrado junto com o ozônio, já que o oxigênio do ar enriquecido, proveniente do concentrador de O<sub>2</sub>, é apenas parcialmente convertido a ozônio.

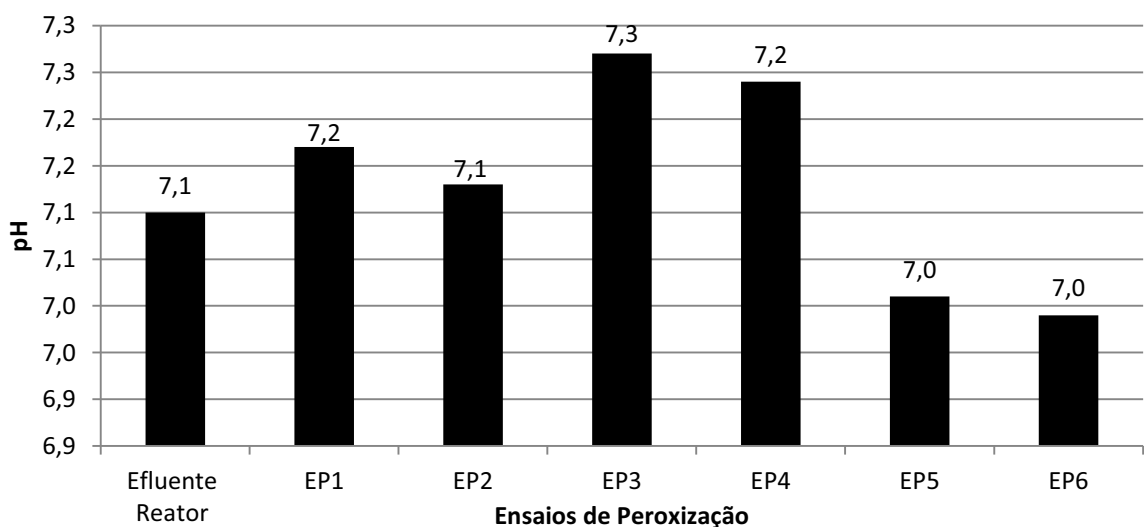
Figura 5.28: Valores médios de oxigênio dissolvido para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação com tempo de contato de 15 min.



### 5.3.1.2 pH

Os valores médios do pH do efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio foram de 7,1 para o tempo de contato de 7 min e de 7,2 para 15 min. Após a peroxidação, para o tempo de contato de 7 min, o mínimo e máximo foram 7,0 e 7,3 (Figura 5.29) e para o tempo de contato de 15 min, o mínimo e máximo foram de 7,4 e 7,4 (Figura 5.30), respectivamente.

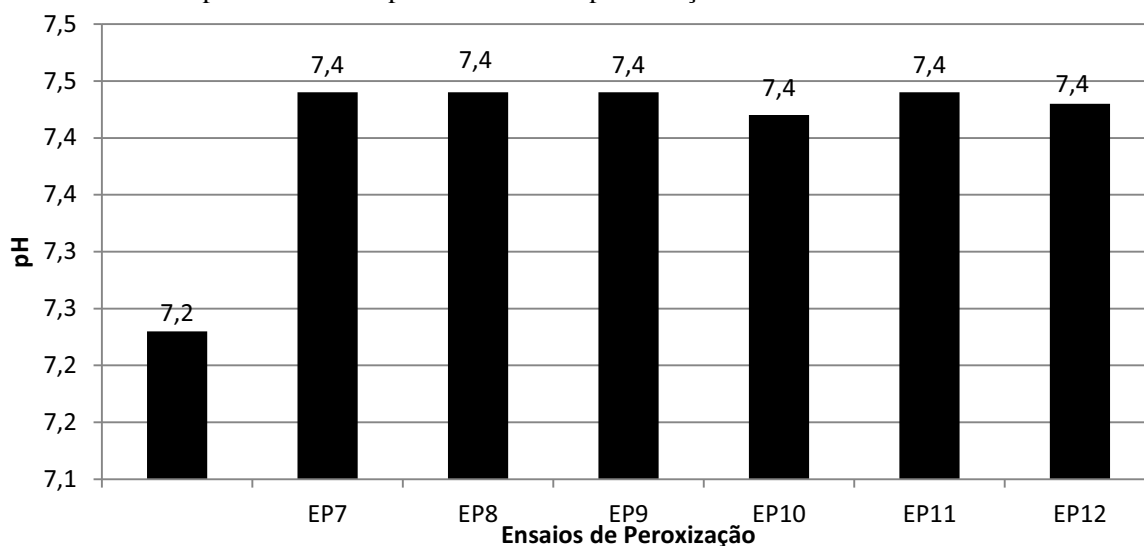
Figura 5.29: Valores médios de pH para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.



Durante os ensaios de peroxidação de 7 min, os ensaios EP5 e EP6 promoveram uma redução no valor do pH, porém a mesma não pode ser considerada como significativa ( $P = 0,05$ ), assim também como o aumento obtido pelos outros ensaios neste tempo de contato

também não o foram, o que confirma os resultados obtidos por Martínez, Pérez-Parra e Suay (2011) e Kishimoto et al. (2007).

Figura 5.30: Valores médios de pH para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 15 min.



Já durante os ensaios de peroxização de 15 min, os ensaios EP7, EP8, EP10 e EP11 promoveram um aumento significativo no pH em relação ao efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio, apesar de numericamente esta diferença ser pequena

### 5.3.1.3 Alcalinidade

Os valores médios de alcalinidade do efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e do efluente após a peroxização estão apresentados nas Figura 5.31 e Figura 5.32. No ensaio EP6 não houve alteração no valor médio da alcalinidade; com exceção do EP1 onde houve um aumento na alcalinidade, nos demais ensaios ocorreu uma redução no valor médio. Este comportamento é esperado, já que a alcalinidade sofre uma diminuição com a aplicação de ozônio, favorecendo as reações diretas (ozônio molecular), o qual é responsável pela desinfecção (MEDEIROS, 2010; SILVA, 2008).

A maior eficiência na remoção de alcalinidade foi do ensaio EP3 ( $8,00 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  e  $1,6 \text{ mg H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$ ). Entretanto, assim como nos resultados obtidos durante os ensaios de ozonização e por Silva (2008), apesar da diminuição dos valores médios de alcalinidades, não se pôde avaliar esta diminuição como significativa ( $P = 0,05$ ) de acordo com os valores observados.

Figura 5.31: Valores médios de alcalinidade para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.

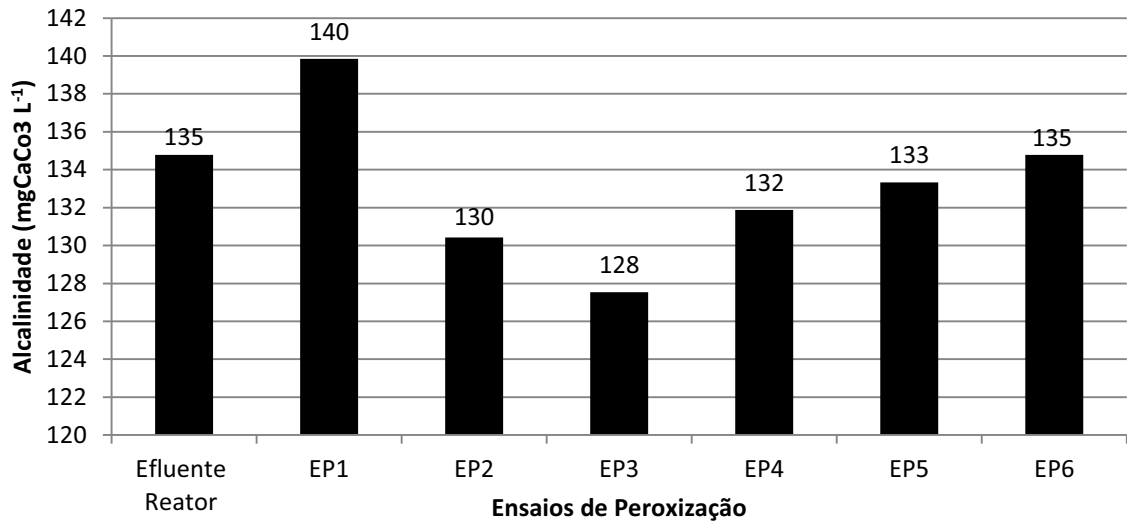
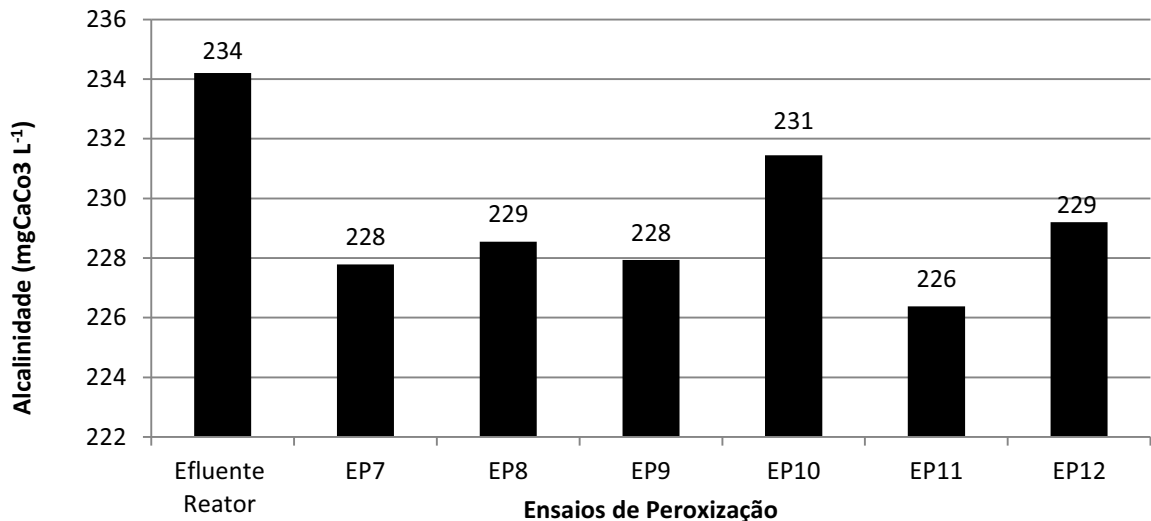


Figura 5.32: Valores médios de alcalinidade para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.



### 5.3.1.4 DQO

Os valores médios de DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação estão apresentados nas Figura 5.33 e Figura 5.34. As porcentagens de redução média da DQO estão apresentadas na Tabela 5.18.

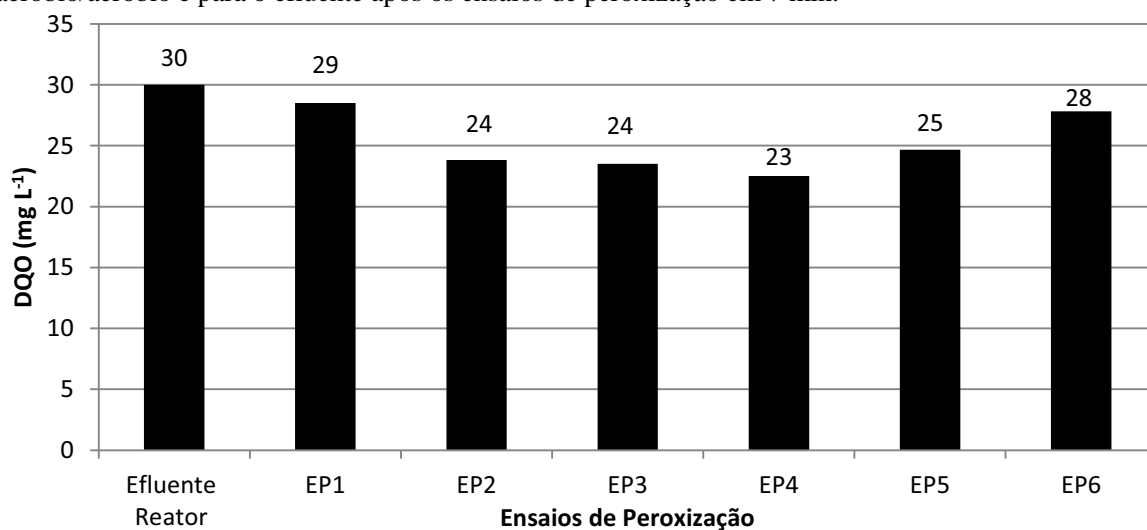
Apesar de todos os ensaios promoverem uma redução nos valores médios de DQO, estas remoções não foram diferenças significativas ( $P = 0,05$ ), independente do tempo e dose de ozônio e de peróxido de hidrogênio aplicados em relação ao efluente proveniente do reator

compartimentado anaeróbio/aeróbio, estando de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de ozonização tanto dos A.C. quanto do reator compartimentado.

Tabela 5.18: Eficiência na remoção de DQO após os ensaios de peroxização.

Ensaio de ozonização	Eficiência na remoção de DQO (%)
EP1	5,00
EP2	20,57
EP3	21,67
EP4	25,00
EP5	17,76
EP6	7,23
EP7	15,32
EP8	21,70
EP9	24,69
EP10	15,75
EP11	28,52
EP12	18,30

Figura 5.33: Valores médios de DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 7 min.

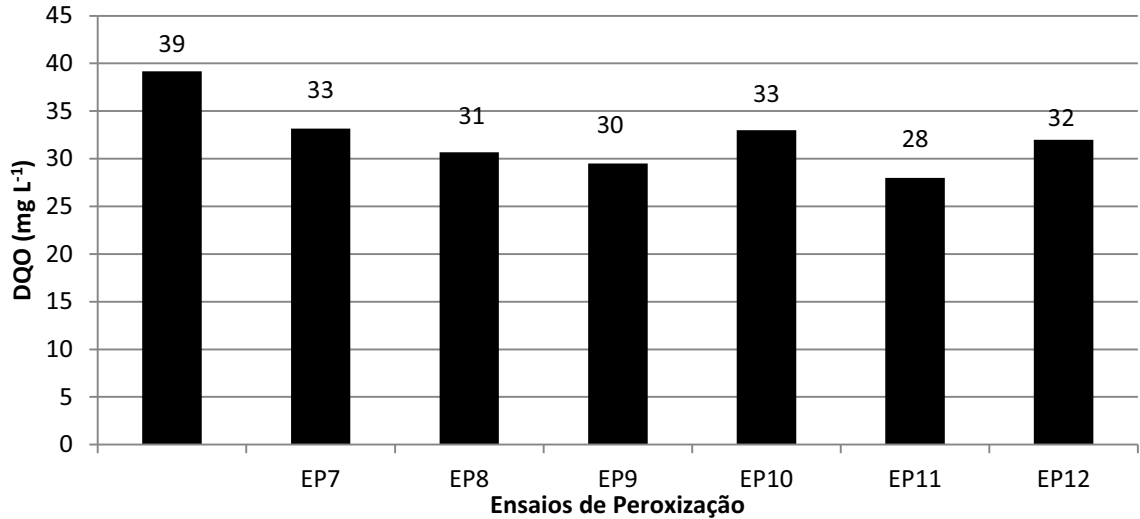


A eficiência na remoção de DQO durante os ensaios de peroxização, comparando uma mesma dose de ozônio aplicada, foi de um modo geral, maior do que a obtida nos ensaios de ozonização (apresentados no item 5.2.1), concordando com os resultados obtidos por Silva (2008) e Costa (2003). Outro fator é que o tempo de contato de 15 min (EP7 a EP12) promoveu uma remoção de DQO maior que o tempo de contato de 7 min (EP1 a EP6) em todos os ensaios, respectivamente, com exceção apenas do ensaio EP10, com eficiência menor que EP4.

Apesar de todos os ensaios promoverem uma redução nos valores médios de DQO, estas reduções não foram significativas ( $P = 0,05$ ) independentemente do tempo e dose de ozônio e de peróxido de hidrogênio aplicados em relação ao efluente proveniente do reator

compartimentado anaeróbio/aeróbio. Estando de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de ozonização tanto do efluente dos A.C. quanto do reator compartimentado.

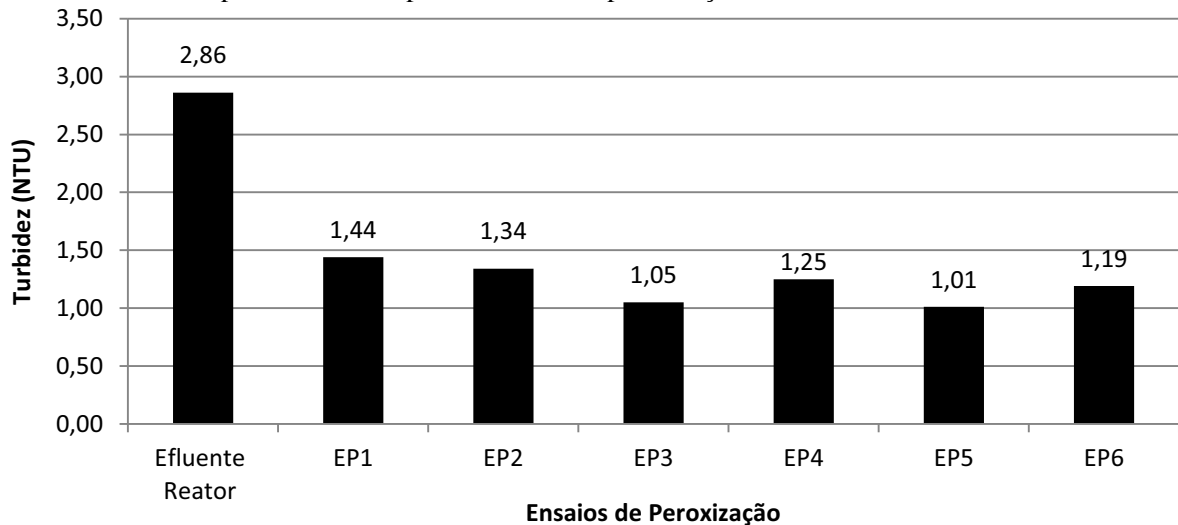
Figura 5.34: Valores médios de DQO para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min.



### 5.3.1.5 Turbidez

Em acordo com o ensaio de ozonização do efluente proveniente dos A.C. e diferentemente dos ensaios de ozonização do reator compartimentado, todos os ensaios promoveram uma redução nos valores médios de turbidez, chegando a uma porcentagem de 57,57% em média para o tempo de 7 min (Figura 5.35) e de 50,43% para o tempo de 15 min (Figura 5.36).

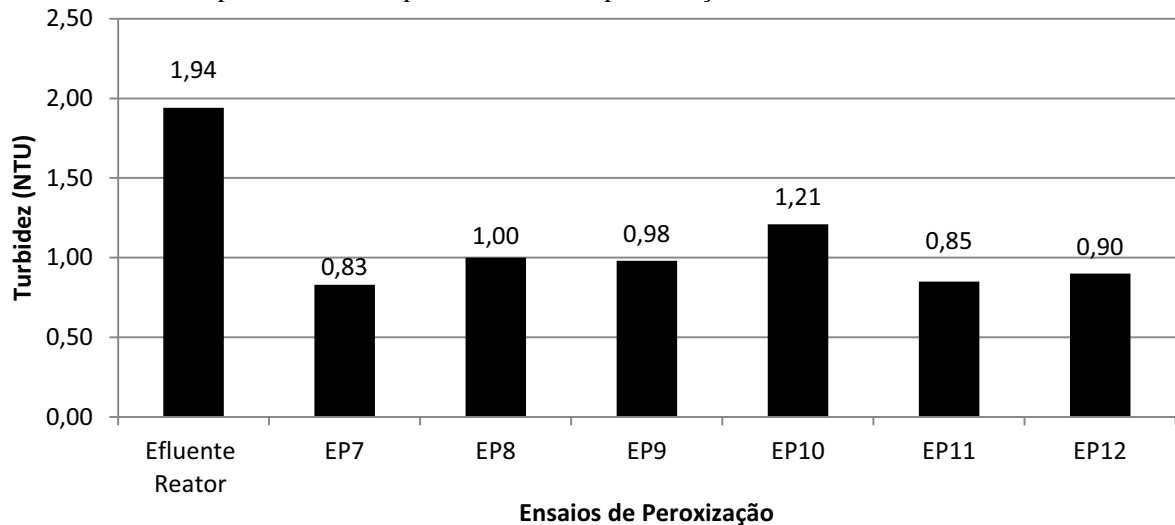
Figura 5.35: Valores médios de turbidez para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.





No entanto por se tratar de valores médios, não é possível considerar que houve diferença significativa nos valores de turbidez entre o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e do efluente após os ensaios de peroxidação, apesar de uma redução superior a obtida nos ensaios de ozonização do efluente proveniente dos A.C. (24,4%) onde usou apenas o ozônio. Portanto, os resultados indicam que a adição de peróxido de hidrogênio pode favorecer a remoção de turbidez.

Figura 5.36: Valores médios de turbidez para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min.



### 5.3.1.6 Cor Verdadeira

A remoção da cor verdadeira foi em média 80% para o tempo de contato de 7 min (Figura 5.37), e para o tempo de contato de 15 min a remoção da cor verdadeira foi em média 83,45% (Figura 5.38). Os ensaios de peroxidação com o tempo de contato tanto de 7 min e de 15 min obtiveram reduções significativas na redução da cor verdadeira.

Figura 5.37: Valores médios de cor verdadeira para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.

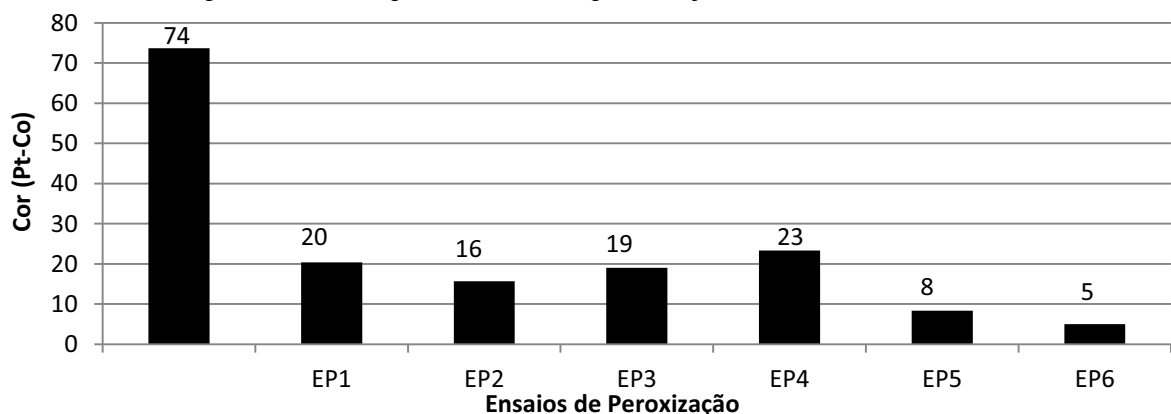
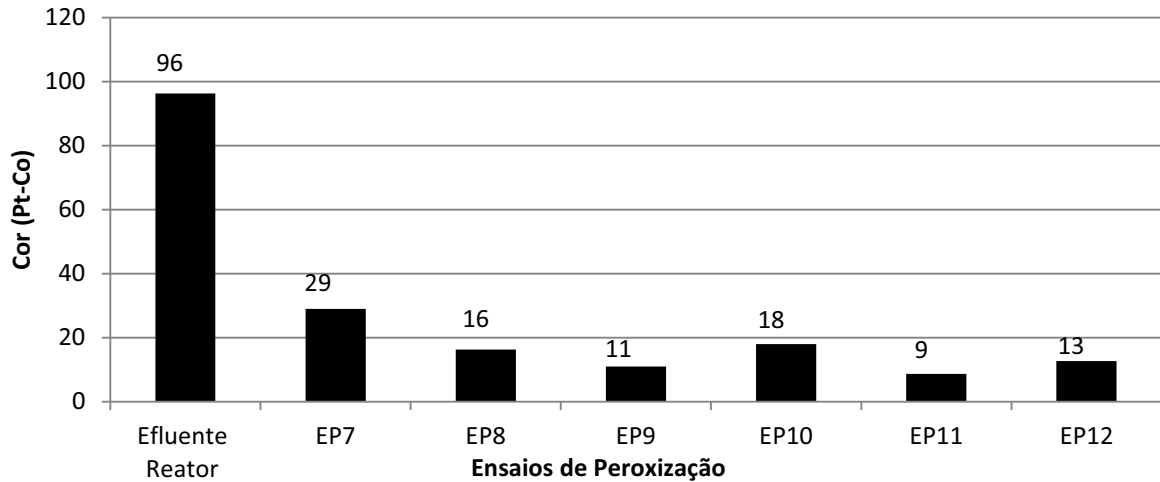


Figura 5.38: Valores médios de cor verdadeira para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 15 min.



Assim como para a turbidez, a adição de peróxido de hidrogênio promoveu um aumento na eficiência na remoção de cor verdadeira, pois a remoção foi maior do que a obtida nos ensaios de ozonização. Portanto a adição de peróxido de hidrogênio também pode favorecer a remoção de cor.

### 5.3.1.7 Série de Sólidos em Suspensão

Os valores médios dos sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização de 7 min e 15 min estão apresentados, respectivamente, na Figura 5.39 e Figura 5.40.

Todos os ensaios promoveram uma redução nos valores médios dos sólidos em suspensão totais. No entanto apenas os ensaios EP1, EP3, EP5, EP6 e P8 promoveram uma redução significativa.

Quanto aos sólidos em suspensão fixos apenas os ensaios EP8 e EP9 promoveram uma redução significativa, por se tratar de valores médios. Já para os sólidos em suspensão voláteis, os ensaios EP7, EP9, EP10, EP11 e EP12 promoveram um aumento nas concentrações médias.

Portanto, os ensaios de peroxização para um tempo de contato de 7 min apresentaram, de um modo geral, os melhores resultados, pois houve a redução (mesmo que não significativa) nas concentrações médias dos sólidos em suspensão totais, fixos e voláteis, demonstrando um que tempo maior de contato não necessariamente seria mais eficiente.

Os resultados obtidos para os ensaios de peroxidação para um tempo de contato de 7 min estão de acordo com o obtido por Silva (2008).

Figura 5.39: Valores médios de sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.

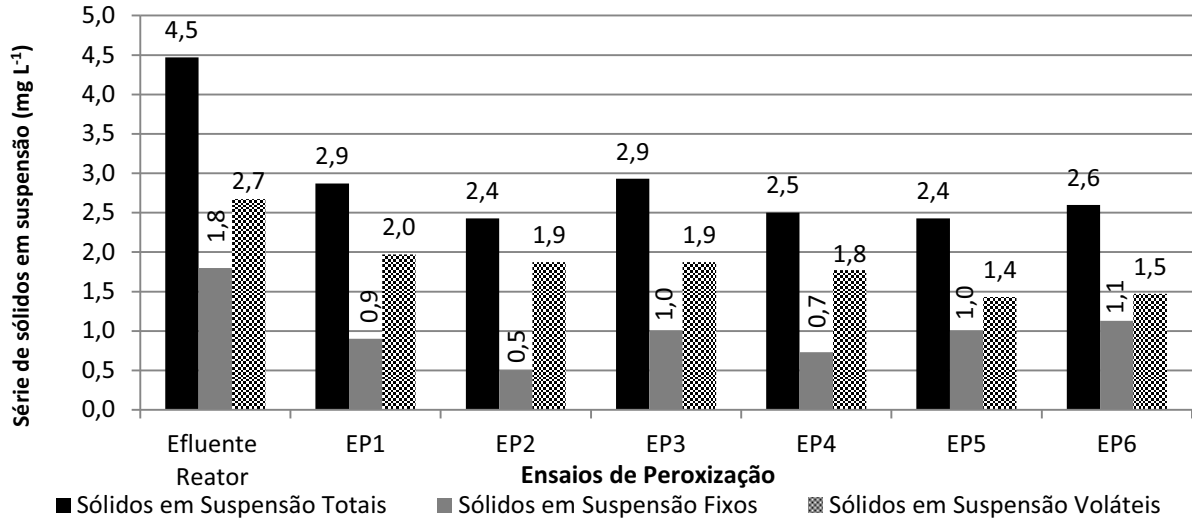
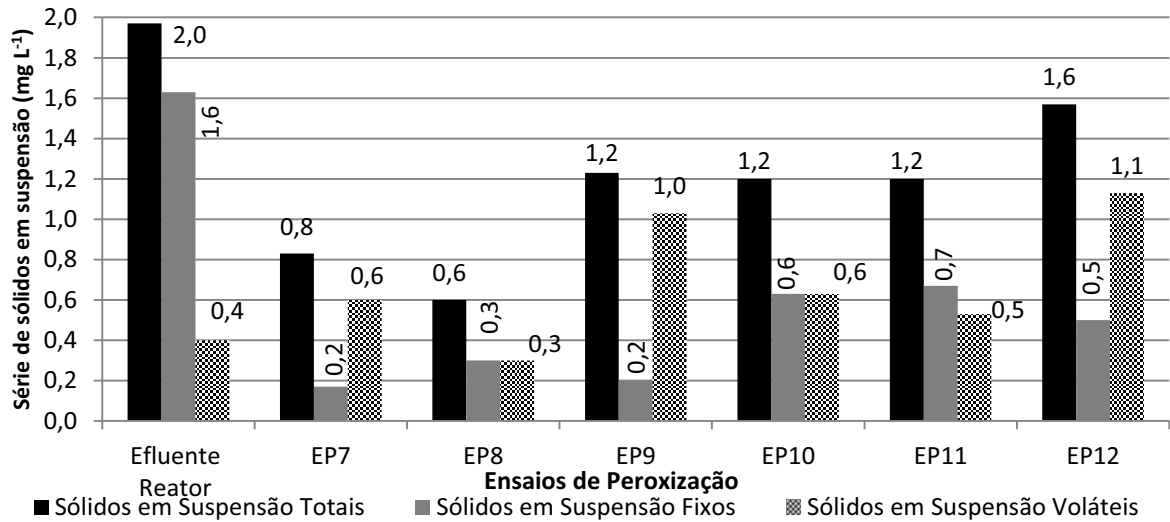


Figura 5.40: Valores médios de sólidos em suspensão totais, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min.



### 5.3.1.8 Série de Sólidos Totais

Os valores médios dos sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação de 7 min e 15 min estão apresentados respectivamente nas Figura 5.41 e Figura 5.42.

Os ensaios EP1, EP3, EP4 e EP5 promoveram uma redução nos valores de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis, estando de acordo com os resultados obtidos por Silva (2008). Porém, assim como ocorrido nos ensaios de ozonização, os ensaios de peroxidação para o tempo de 15 min (EP7 a EP12) promoveram aumento da concentração média de sólidos totais.

Figura 5.41: Valores médios de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.

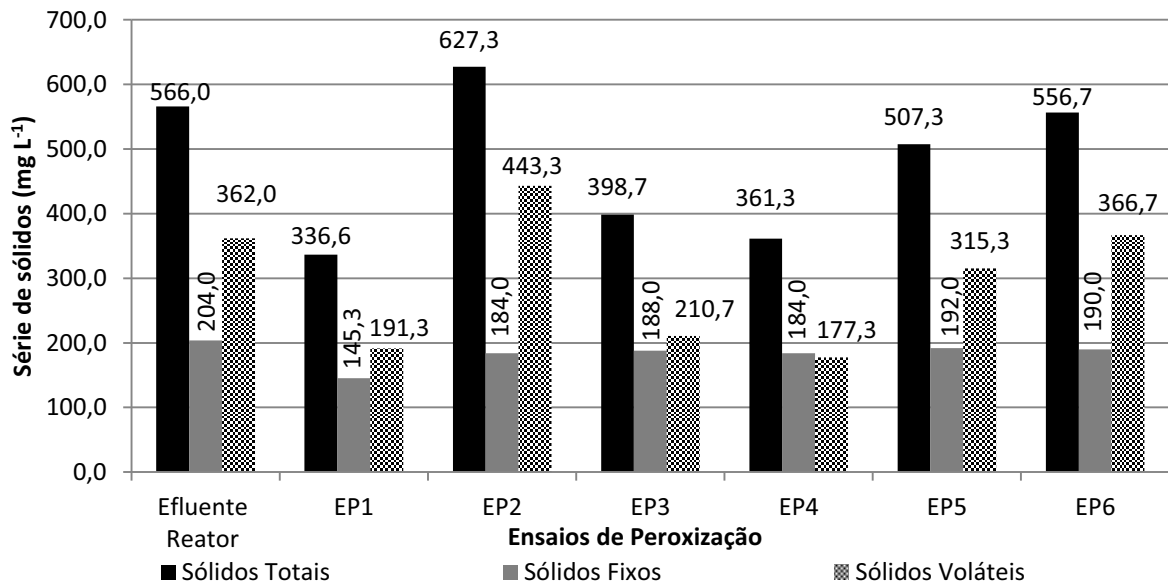
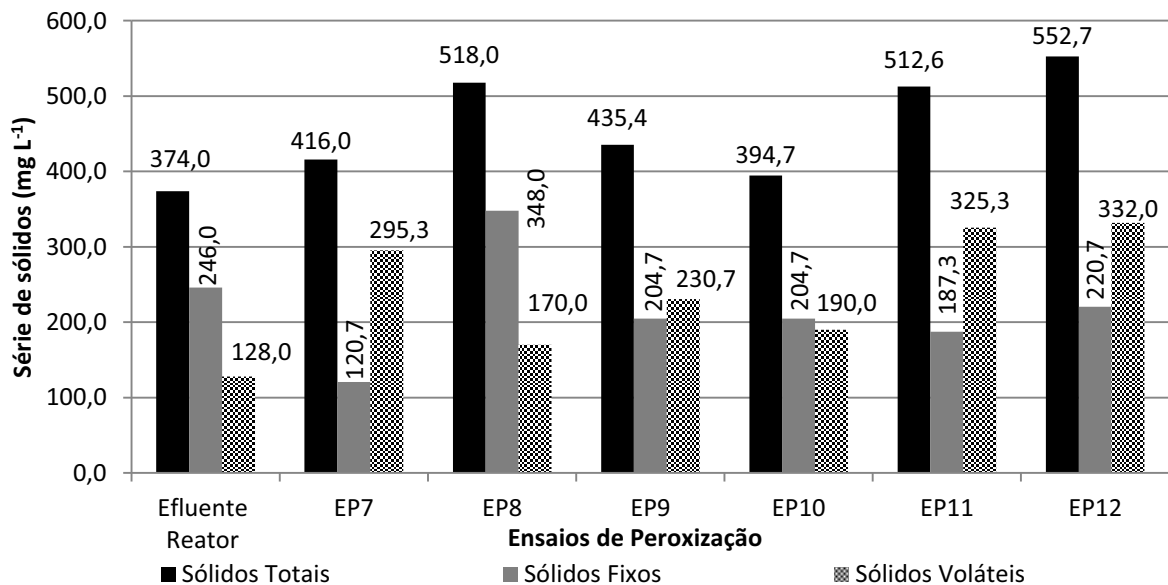


Figura 5.42: Valores médios de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min.



### 5.3.1.9 Série de Nitrogênio

Os valores médios de nitrato e nitrito para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação para os tempos de contato de 7 min e 15 min estão apresentados respectivamente na Figura 5.43 e Figura 5.44.

Figura 5.43: Valores médios de nitrato e nitrito para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.

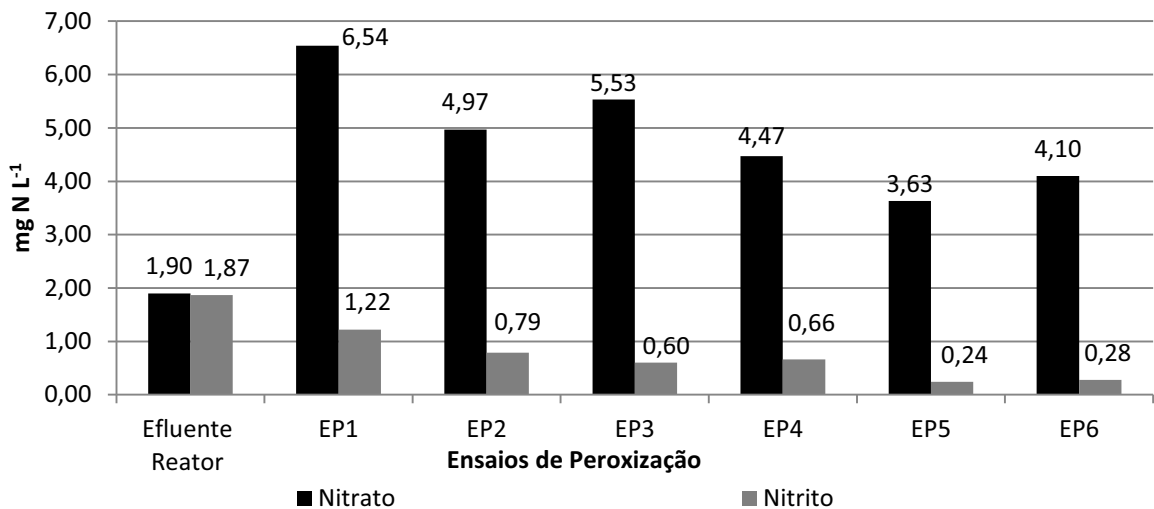
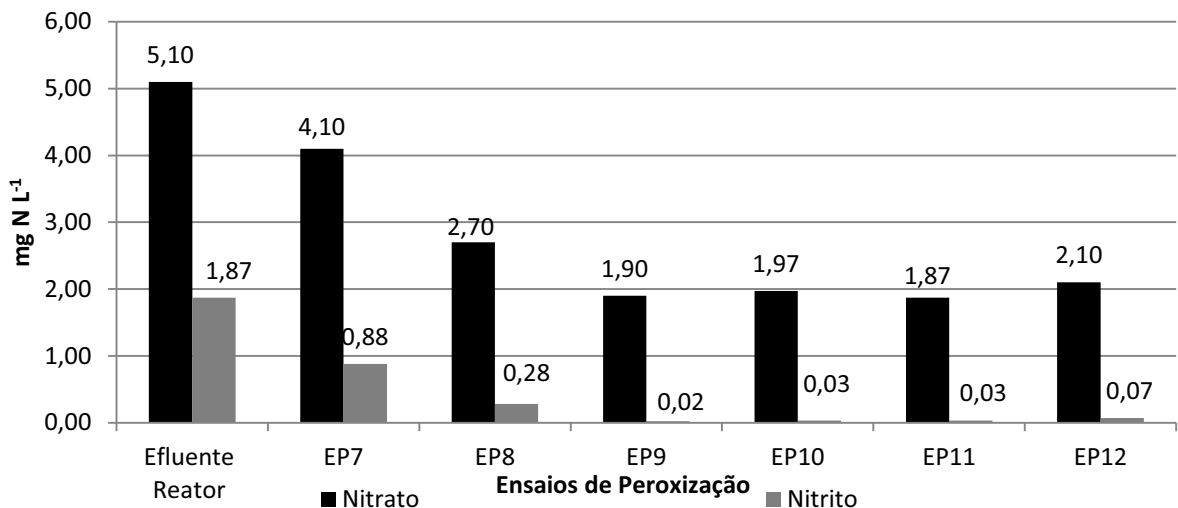


Figura 5.44: Valores médios de nitrato e nitrito para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min.



Os ensaios de peroxidação aplicando um tempo de contato de 7 min promoveram um aumento nas concentrações médias de nitrato. Apenas os ensaios de peroxidação aplicando um tempo de contato de 15 min promoveram uma redução nas concentrações médias de nitrato. O que indica que um tempo de contato maior favorece a remoção de nitrato. As porcentagens de remoção de nitrato foram 34,76; 57,75; 67,91; 64,71; 87,17 e 85,03 % para

os ensaios EP7, EP8, EP9, EP10, EP11 e EP12, respectivamente. Portanto, a melhor remoção de nitrato foi obtida com a dose de  $10 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  e  $2,0 \text{ mg H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$  em um tempo de contato de 15 min (EP11).

As reduções de nitrato obtidas a um tempo de contato de 15 min foram superiores às obtidas durante a ozonização do efluente do reator compartimentado para o mesmo tempo de contato e respectivas doses, logo a adição de peróxido de hidrogênio também favoreceu a redução de nitrato.

Tanto os ensaios de peroxidação aplicando um tempo de contato de 7 min quanto 15 min promoveram uma redução dos valores médios de nitrito. As porcentagens de remoção foram de 19,61; 47,06; 37,25; 38,63; 63,33 e 58,82% para os ensaios EP1, EP2, EP3, EP4, EP5 e EP6, com tempo de contato de 7 min respectivamente. Para o tempo de contato de 15 min, as porcentagens de remoção foram de 52,94; 85,03; 98,93; 98,40; 98,40 e 96,26% para os ensaios EP7, EP8, EP9, EP10, EP11 e EP12, respectivamente. Portanto, a melhor remoção de nitrito foi obtido com a dose de  $8 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$   $1,6 \text{ mg H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$  e um tempo de contato de 15 min (EP9).

Assim como para o nitrato, as reduções obtidas durante os ensaios de peroxidação com tempo de contato de 15 min foram superiores às obtidas durante os ensaios de ozonização do efluente do reator compartimentado para o mesmo tempo e respectivas doses. Porém o mesmo não foi observado para o tempo de contato de 7 min. Ou seja, a influência de peróxido de hidrogênio se tornou mais evidente em um tempo de contato maior.

Assim como o que ocorreu nos ensaios de ozonização, apesar da média dos valores de nitrito ser relativamente baixa, constata-se ao olhar os resultados individuais de cada semana de análise (APÊNDICE E), que quando este sofreu um aumento significativo, houve uma redução no valor de leitura do formaldeído, pois o nitrito em altas concentrações interfere no método utilizado.

Os valores médios de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação para os tempos de contato estão apresentados respectivamente nas Figura 5.45 e Figura 5.46.

Assim como nos ensaios de ozonização do efluente do reator compartimentado, não houve alterações significativas nos valores médios de NTK independente da dose e tempo de contato aplicado. Para o tempo de contato de 7 min, o valor médio para o NTK foi de  $14,69 \text{ mg N L}^{-1}$  para o efluente proveniente do reator compartimentado, e para o efluente após a peroxidação este chegou a uma média de  $15,94 \text{ mg N L}^{-1}$ .

Já para o tempo de contato de 15 min, o valor médio para NTK foi de 39,69 mg N L<sup>-1</sup> para o efluente proveniente do reator compartimentado, e para o efluente após a peroxidação este chegou a uma média de 39,22 mg N L<sup>-1</sup>. Assim como os resultados obtidos na ozonização e por Silva (2008), os resultados apresentados revelam pouca ou nenhuma influência do ozônio e do peróxido de hidrogênio para NTK, nitrogênio amoniacal e nitrogênio orgânico.

Figura 5.45: Valores médios de nitrogênio total Kjeldahl para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.

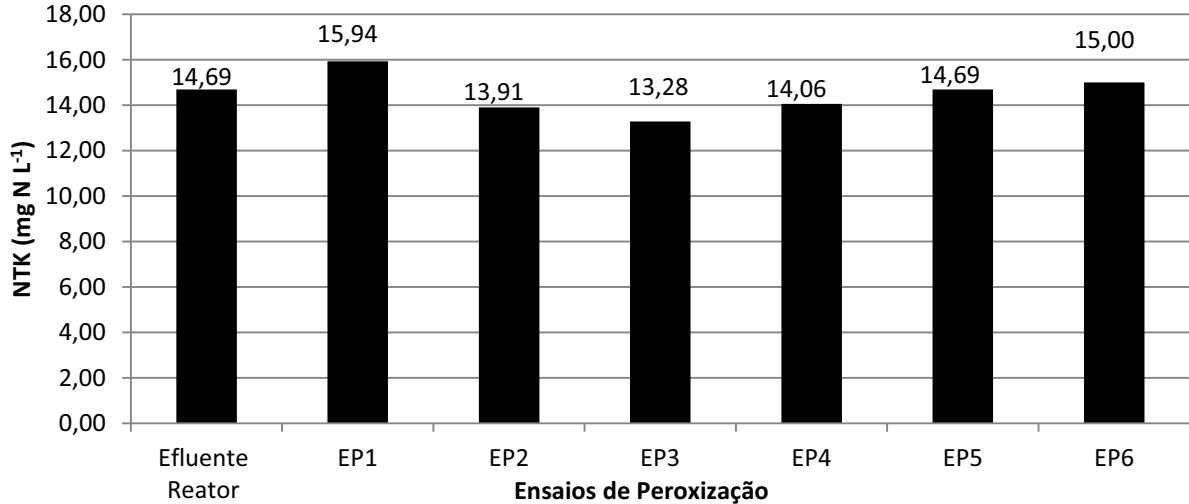
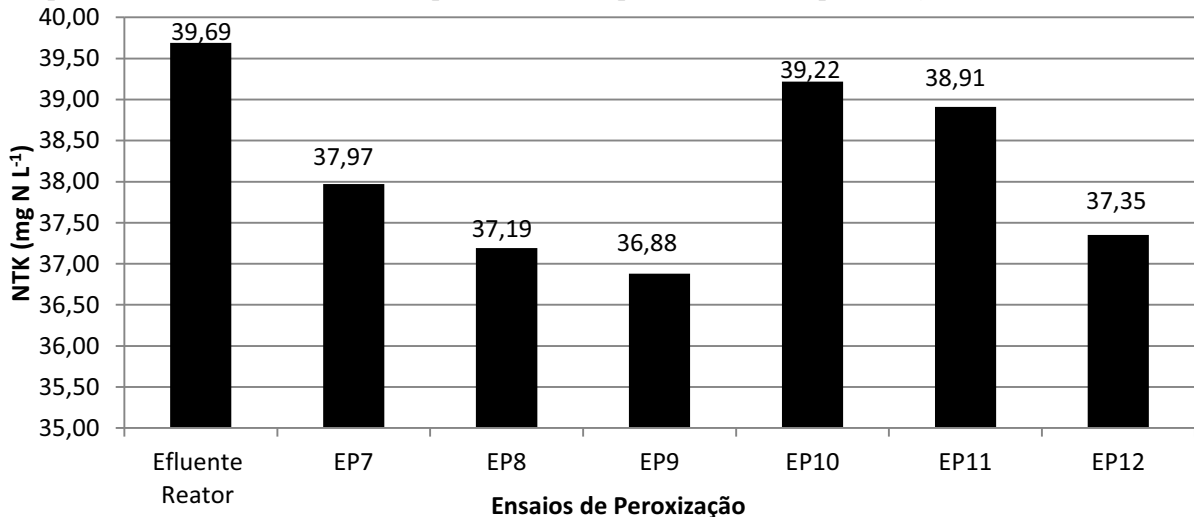


Figura 5.46: Valores médios de nitrogênio total Kjeldahl para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 15 min.



### 5.3.2 Coliformes Totais *E. coli*

Os valores médios de coliformes totais e *E. coli* encontrados no efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e no efluente após os ensaios de peroxidação estão apresentados na Tabela 5.19. Como o pH se manteve praticamente constante e entre 6 e

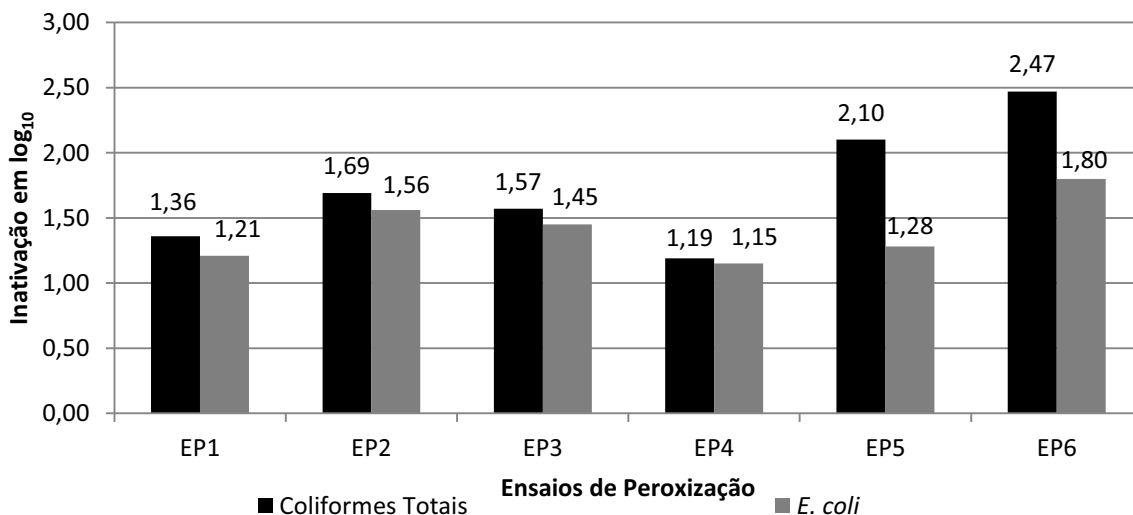
8, não houve influência de pH na inativação de coliformes totais e *E. coli*, como indica Langlais, Reckhow e Brink (1991) e Silva et al. (2010). Não houve diferenças significativas ( $P = 0,05$ ) na inativação entre as diferentes doses e tempos de contato aplicados durante os ensaios para coliformes totais e para *E. coli* (Figura 5.47 e Figura 5.48).

Tabela 5.19: Inativação média de Coliformes totais e *E. coli* para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação.<sup>a</sup>

Ensaio	Efluente Reator		Efluente desinfetado		Inativação em $\log_{10}$	
	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>
EP1	$6,30 \times 10^4$	$5,40 \times 10^3$	$2,74 \times 10^3$	$3,33 \times 10^2$	1,36	1,21
EP2	$6,30 \times 10^4$	$5,40 \times 10^3$	$1,29 \times 10^3$	$1,49 \times 10^2$	1,69	1,56
EP3	$6,30 \times 10^4$	$5,40 \times 10^3$	$1,68 \times 10^3$	$1,90 \times 10^2$	1,57	1,45
EP4	$6,30 \times 10^4$	$5,40 \times 10^3$	$4,04 \times 10^3$	$3,82 \times 10^2$	1,19	1,15
EP5	$6,30 \times 10^4$	$5,40 \times 10^3$	$5,00 \times 10^2$	$2,83 \times 10^2$	2,10	1,28
EP6	$6,30 \times 10^4$	$5,40 \times 10^3$	$2,12 \times 10^2$	$8,51 \times 10^1$	2,47	1,80
EP7	$4,04 \times 10^4$	$3,22 \times 10^3$	$5,72 \times 10^2$	$2,25 \times 10^2$	1,85	1,15
EP8	$4,04 \times 10^4$	$3,22 \times 10^3$	$1,05 \times 10^3$	$1,74 \times 10^2$	1,58	1,27
EP9	$4,04 \times 10^4$	$3,22 \times 10^3$	$3,65 \times 10^3$	$2,70 \times 10^2$	1,04	1,08
EP10	$4,04 \times 10^4$	$3,22 \times 10^3$	$1,36 \times 10^3$	$1,40 \times 10^2$	1,47	1,36
EP11	$4,04 \times 10^4$	$3,22 \times 10^3$	$5,71 \times 10^2$	$2,50 \times 10^2$	1,85	1,11
EP12	$4,04 \times 10^4$	$3,22 \times 10^3$	$3,69 \times 10^2$	$9,37 \times 10^1$	2,04	1,54

<sup>a</sup> Coliformes Totais e *E. coli* em NMP/100mL.

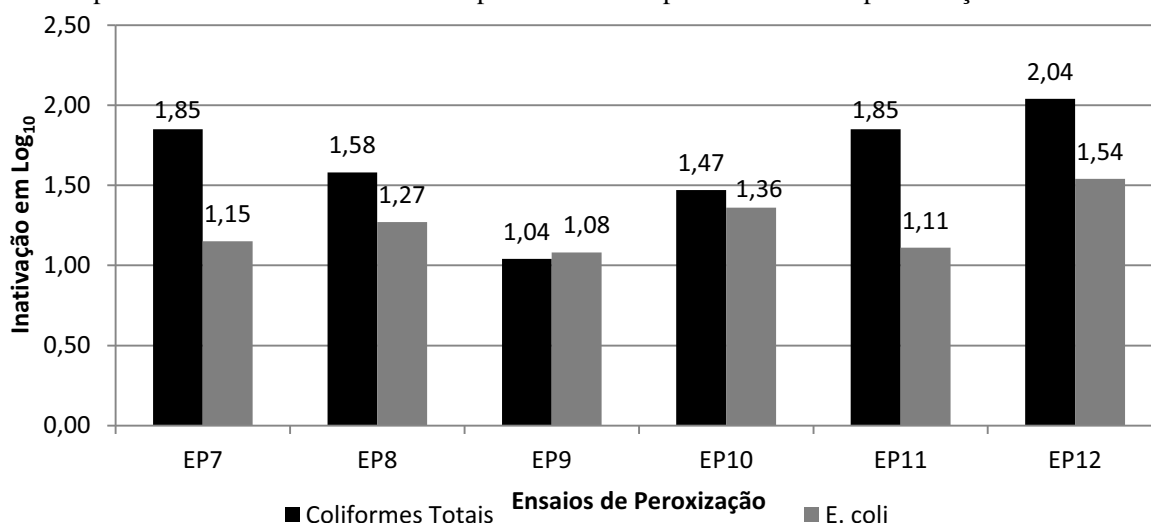
Figura 5.47: Valores médios de inativação de coliformes totais e *E. coli* para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxidação em 7 min.



Rizvi et al., verificaram em seus estudo que a adição de peróxido de hidrogênio, ou seja, a peroxidação, fez com que o tempo de contato fosse reduzido para 10 min em relação ao processo de ozonização, que foi de 25 min, para se conseguir uma inativação de 99,9%. Portanto, a adição de peróxido de hidrogênio resultou num aumento dos radicais hidroxila e da taxa de reação do ozônio.



Figura 5.48: Valores médios de inativação de coliformes totais e *E. coli* para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbico/aeróbico e para o efluente após os ensaios de peroxização em 15 min.



A inativação de *E. coli* não foi superior ao se adicionar de peróxido de hidrogênio. Já a inativação de coliformes totais foi na maioria dos testes superior aos resultados encontrados quando aplicado somente ozônio, sendo que o consumo de ozônio durante a peroxização foi menor que na ozonização. Pode assim concluir que a adição de peróxido de hidrogênio foi favorável à inativação de coliformes totais. Todos os ensaios de peroxização promoveram um efluente adequado para reuso agrícola em questão de coliformes fecais. Para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbico/aeróbico com a aplicação de ozônio e de peróxido de hidrogênio (peroxônio) foi necessária uma dose de 5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e 1 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> para que o efluente se enquadrasse para reuso agrícola (WHO, 2006), ou seja, a mesma dose aplicada para o efluente proveniente dos A.C., e menor que a usada durante os ensaios de ozonização. Deste modo conclui-se que a adição de peróxido de hidrogênio foi favorável na inativação de coliformes.

O tempo de contato, porém, assim como o indicado por Assirati (2005) e Finch & Smith (1999), não influenciou a inativação, já que tanto para o efluente proveniente dos A.C. quanto do reator compartimentado o enquadramento para reuso agrícola foi atingido no menor tempo de contato aplicado, indicando que a dose dos desinfetantes foi mais importante.

### 5.3.3 Formaldeído

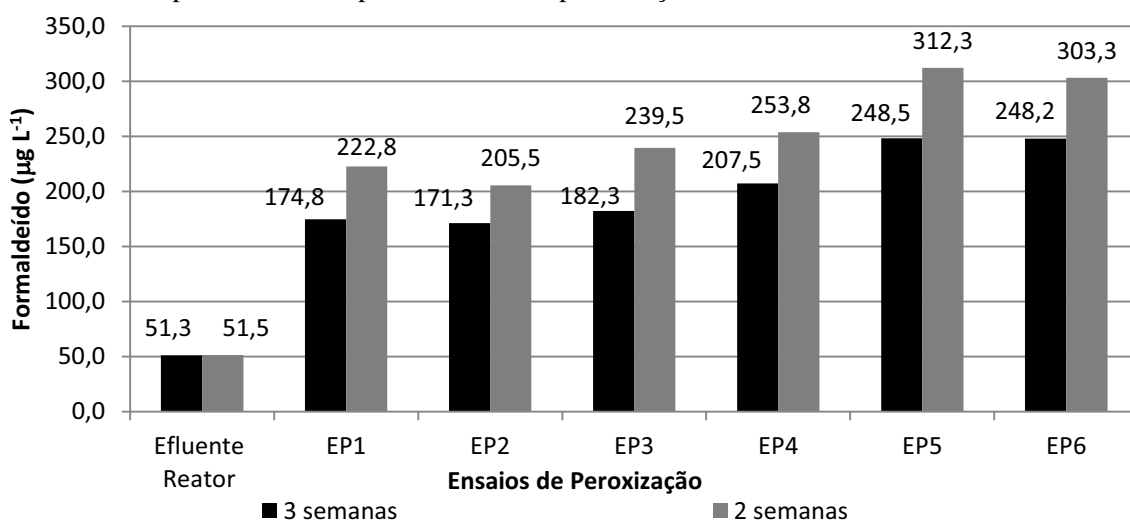
Os valores médios de formaldeído encontrado no efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbico/aeróbico e do efluente após os ensaios de peroxização para o tempo de 7 min estão apresentados na Figura 5.49 e para o tempo de 15 min na Figura 5.50.

Os valores médios de formação de formaldeído após os ensaios de peroxização com o tempo de 7 min estão apresentados na Figura 5.51 e para o tempo de 15 min, na Figura 5.52.

Assim como para os ensaios de ozonização, durante a terceira semana de ensaio de peroxização para o tempo de contato de 7 min e para a primeira semana do tempo de contato de 15 min houve maior formação de nitrito e nitrato. Portanto, nas Figura 5.49, Figura 5.50, Figura 5.51 e Figura 5.52 é possível observar tanto os resultados para as três semanas, quanto apenas para as duas semanas, onde a concentração de nitrito era menor, facilitando assim uma melhor comparação dos resultados obtidos.

Tanto para o período de estudo de três semanas quanto para o período de apenas duas semanas, houve a formação de formaldeído para todos os ensaios em que foi aplicado o peroxônio. Considerando as três semanas de ensaios, não houve diferença significativa entre o valor de formaldeído do efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e o valor encontrado no efluente após os ensaios de peroxização, nem entre os valores de formação de formaldeído. É importante lembrar que, o cálculo da diferença significativa utiliza a média e o desvio padrão, sendo que o desvio se encontrou alto devido a diferenças nos valores obtidos a cada semana, em consequência do alto valor de nitrito. Para melhor visualização dos valores individuais obtidos, consultar APÊNDICE E.

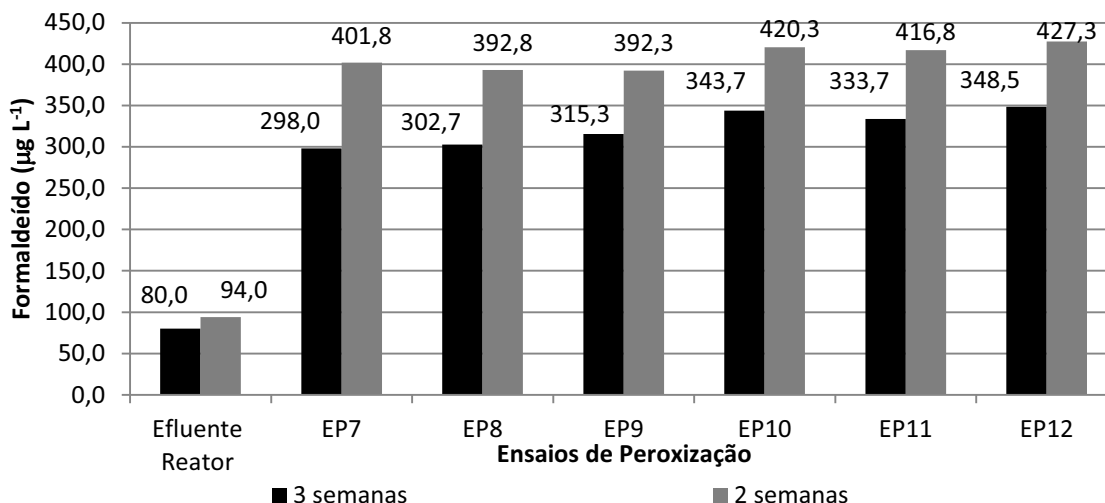
Figura 5.49: Valores médios de formaldeído para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 7 min.



Considerando apenas as duas semanas, houve diferenças significativas ( $P=0,05$ ) entre o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e os ensaios EP1, EP2 e EP3 para o tempo de contato de 7 min. Sendo que para o tempo de contato de 15 min, houve diferença significativa entre o efluente proveniente do reator compartimentado

anaeróbio/aeróbio e os ensaios EP7, EP8, EP9, EP10, EP11 e EP12, porém para nenhum tempo de contato houve diferença significativa entre os valores de formação de formaldeído.

Figura 5.50: Valores médios de formaldeído para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e para o efluente após os ensaios de peroxização em 15 min.



Em relação ao tempo de contato, houve um aumento significativo com o aumento do tempo de contato de 7 min para 15 min apenas quando aplicada uma dose de 5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>. Para as outras doses de ozônio e de peróxido de hidrogênio, o tempo de contato não foi significativo.

Os valores médios de formaldeído encontrados após os ensaios de peroxização ficaram abaixo dos limites impostos pela OMS (WHO, 2002) e Austrália (AUSTRALIAN DRINKING WATER GUIDELINES, 2011), para água potável, mas estavam acima dos limites de países como o Japão (SUGAYA et al., 2001); e Polônia (NAWROCKI; BILOZOR, 1997).

De acordo com Nawrocki e Kalkowska (1998) há controvérsias quanto à potencialização na formação de formaldeído exercida pela adição do peróxido de hidrogênio durante a ozonização. Existem linhas de pesquisa que afirmam seu incremento pelo aumento de radical hidroxila, assim como, linhas de pesquisas que acreditam na oxidação dos formaldeídos pelo aumento de radicais hidroxila.

Os ensaios de peroxização com uma dose de 5 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> tanto para o tempo de contato de 7 min (EP1 e EP2) quanto para 15 min (EP7 e EP8), promoveram uma média de formação de formaldeído maior que quando apenas aplicando somente a mesma dose de ozônio.

Figura 5.51: Valores médios de formação de formaldeído para o efluente após os ensaios de peroxização em 7 min.

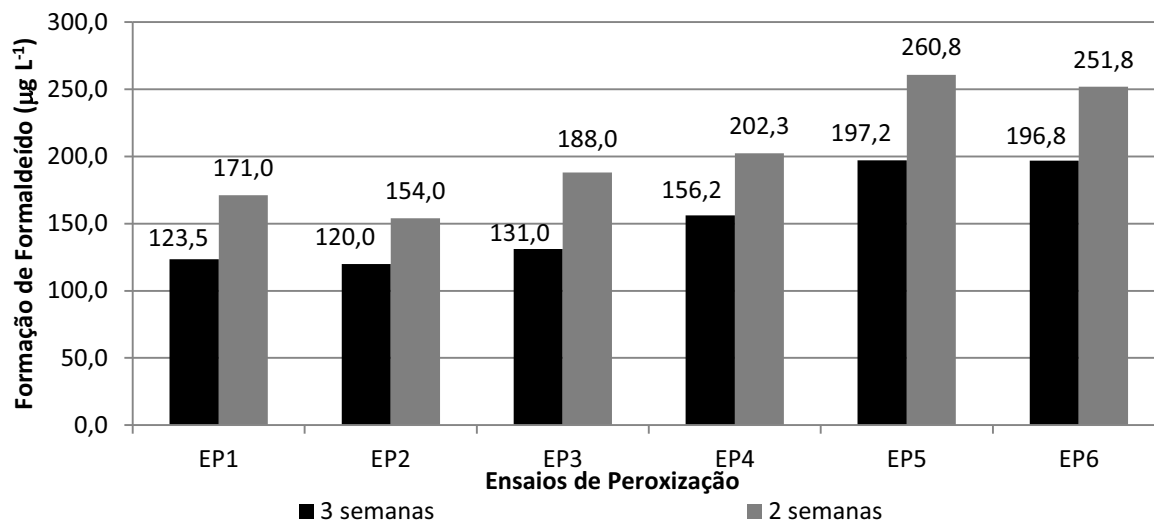
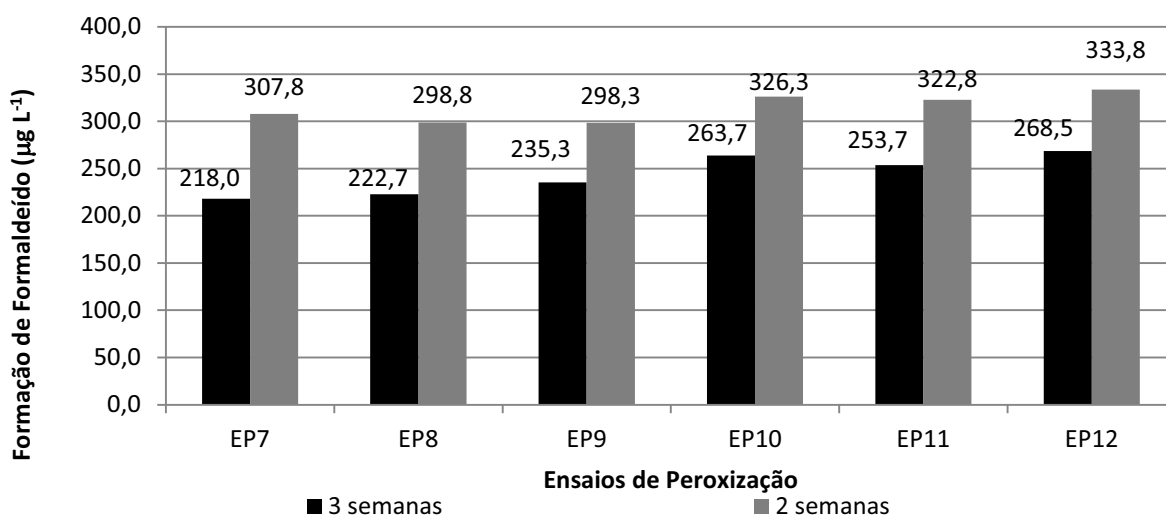


Figura 5.52: Valores médios de formação de formaldeído para o efluente após os ensaios de peroxização em 15 min.



Com uma dose de  $8 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  apenas o ensaio EP10 não promoveu um aumento na formação de formaldeído (tempo de contato de 15 e dose de  $4,8 \text{ mg H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$ ).

Já para a dose de  $10 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ , tanto o tempo de contato de 7 min (EP5 e EP6) quanto de 15 min (EP11 e EP12), a formação de formaldeído foi menor que quando aplicada somente a mesma dose de ozônio.

Os resultados obtidos indicam que, a oxidação de formaldeído pela adição de peróxido de hidrogênio é dependente tanto da dose de peróxido de hidrogênio utilizada quanto da dose de ozônio, de modo que doses maiores de ozônio favorecem mais a oxidação do formaldeído durante a desinfecção.

### 5.3.4 Conclusões

- Para uma mesma dose de ozônio e tempo de contato aplicado, uma dose maior de peróxido de hidrogênio não favoreceu um aumento significativo no consumo de ozônio. Portanto, a adição de peróxido de hidrogênio não favoreceu um maior consumo de ozônio durante os ensaios.
- Os valores de pH em um tempo de contato de 7 min tiveram alterações significativas para os efluentes peroxizados. Porém para os ensaios com tempo de contato de 15 min, alguns ensaios promoveram, segundo os testes estatísticos, um aumento significativo, no entanto numericamente essa diferença é mínima (de pH = 7,2 para pH = 7,4). Assim como o observado nos ensaios onde se aplicou apenas ozônio, a alcalinidade não teve uma redução significativa, portanto a adição de peróxido de hidrogênio não favoreceu uma maior redução da alcalinidade.
- De um modo geral, os ensaios de peroxização tiveram uma eficiência maior que a obtida quando da aplicação apenas do ozônio na remoção da DQO. Sendo que o tempo de contato de 15 min promoveu em quase todos os ensaios uma redução maior que o tempo de contato de 7 min. No entanto, assim como nos ensaios de ozonização, estas remoções não foram significativas.
- Os ensaios realizados com tempo de contato de 7 min promoveram uma melhor remoção de sólidos suspensos que o tempo de contato de 15 min. No entanto essas remoções, segundo os testes estatísticos não foram significativas.
- Os ensaios de peroxização com o tempo de contato tanto de 7 min e de 15 min apresentaram reduções significativas na redução da cor verdadeira.
- Assim como para a turbidez, a adição de peróxido de hidrogênio promoveu um aumento na eficiência na remoção de cor verdadeira, pois a remoção foi maior do que a obtida nos ensaios de ozonização. Portanto a adição de peróxido de hidrogênio favoreceu a remoção de cor verdadeira e turbidez.
- Todos os ensaios de peroxização promoveram a formação de formaldeído, sendo que os ensaios EP1, EP2, EP3, EP7, EP8, EP9, EP10, EP11 e EP12 promoveram uma diferença significativa no valor de formaldeído encontrado. Em relação ao tempo de

contato, houve um aumento significativo com o aumento do tempo de contato de 7 min para 15 min apenas quando aplicada uma dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ . Para as outras doses de ozônio e de peróxido de hidrogênio, o tempo de contato não foi significativo.

- Os ensaios de peroxização com uma dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  tanto para o tempo de contato de 7 min (EP1 e EP2) quanto para 15 min (EP7 e EP8), promoveram uma média de formação de formaldeído maior que quando apenas aplicando somente a mesma dose de ozônio. Com uma dose de  $8 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  apenas o ensaio EP10 não promoveu um aumento na formação de formaldeído (tempo de contato de 15 e dose de  $4,8 \text{ mg H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$ ). Já para a dose de  $10 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ , tempo de contato de 7 min (EP5 e EP6) quanto de 15 min (EP11 e EP12), a formação de formaldeído foi menor que quando aplicada somente a mesma dose de ozônio.
- Os resultados obtidos indicam que, a oxidação de formaldeído pela adição de peróxido de hidrogênio é dependente tanto da dose de peróxido de hidrogênio utilizada quanto da dose de ozônio. De modo que doses maiores de ozônio favorecem mais a oxidação do formaldeído durante a desinfecção.
- Não houve diferença significativa na inativação entre as diferentes doses e tempos de contato aplicados durante os ensaios para coliformes totais e para *E. coli*. A inativação de *E. coli* não foi superior ao se adicionar peróxido de hidrogênio. Já a inativação de coliformes totais foi na maioria dos testes superior aos resultados encontrado quando aplicado somente ozônio, sendo que o consumo de ozônio durante a peroxização foi menor que na ozonização. Pode assim concluir que a adição de peróxido de hidrogênio foi favorável à inativação de coliformes totais.
- Todos os ensaios de peroxização promoveram um efluente adequado para reuso agrícola em termos de coliformes fecais. Foi necessária uma dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  e  $1 \text{ mg H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$  para que o efluente se enquadrasse para reuso agrícola (WHO, 2006), ou seja, a mesma dose aplicada para o efluente proveniente dos A.C., e menor que a usada quando da aplicação apenas de ozônio. Deste modo pode concluir que a adição de peróxido de hidrogênio foi favorável na inativação de coliformes.

## 6 CONCLUSÕES FINAIS

- Foram obtidas remoções consideráveis na cor verdadeira, tanto para a ozonização quanto para a peroxização, sendo que a adição de peróxido de hidrogênio promoveu um aumento na eficiência na remoção de cor verdadeira. Este é um fator importante quando se visa o reuso de um efluente, pois a cor é um parâmetro físico que influencia a aceitação por parte da população consumidora.
- A formação de formaldeído foi fortemente dependente da dose de ozônio, porém um tempo de contato maior também favoreceu uma maior formação de formaldeído, mesmo que não significativa segundo os testes estatísticos aplicados.
- Os ensaios de peroxização com uma dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  promoveram uma média de formação de formaldeído maior que quando apenas aplicando somente a mesma dose de ozônio. Com uma dose de 8 e  $10 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ , a formação de formaldeído foi em geral menor que quando aplicada somente a mesma dose de ozônio. Ou seja, doses maiores de ozônio durante a peroxização favoreceram uma menor concentração de formaldeído no efluente final.
- Todos os ensaios de ozonização e peroxização promoveram concentrações de formaldeído que estavam dentro do limite imposto pela OMS (água potável).
- Tanto para o efluente dos A.C. quanto do reator compartimentado, doses maiores de ozônio ou um tempo de contato maior não favoreceu uma inativação significativamente maior.
- A inativação de *E. coli*, no efluente proveniente do reator compartimentado, não foi superior ao se adicionar peróxido de hidrogênio. Já a inativação de coliformes totais foi na maioria dos testes superior aos resultados encontrado quando aplicado somente ozônio, sendo que o consumo de ozônio durante a peroxização foi menor que na ozonização. Pode assim concluir que a adição de peróxido de hidrogênio foi favorável à inativação de coliformes totais.
- Para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio com a aplicação apenas de ozônio foi necessária uma dose de  $8 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  para que o efluente se enquadre para reuso agrícola (WHO, 2006), ou seja, uma dose maior que a aplicada

para o efluente proveniente dos A.C., devido talvez às características do efluente, como a quantidade de sólidos presentes e o valor médio de DQO.

- Todos os ensaios de peroxização promoveram um efluente adequado para reuso agrícola em termos de coliformes fecais. Assim a dose de  $5 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$  e  $1 \text{ mg H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$  foi suficiente para que o efluente proveniente do reator compartimentado se enquadrasse para reuso agrícola (WHO, 2006), ou seja, menor que a usada quando da aplicação apenas de ozônio. Deste modo pode concluir que a adição de peróxido de hidrogênio foi favorável na inativação de coliformes.
- O tempo de contato não influenciou a inativação, já que o enquadramento para reuso agrícola em todos os ensaios de desinfecção foi atingido no menor tempo de contato aplicado, indicando que a dose correta dos desinfetantes foi mais importante.
- Apesar de a peroxização apresentar resultados semelhantes ou ligeiramente superiores ao da ozonização, como de um modo geral essa melhora não foi significativa, a adição de peróxido de hidrogênio, portanto não apresentou um melhor custo benefício que justifique seu uso, em relação à ozonização.



## 7 RECOMENDAÇÕES

- Estudar com maior profundidade a influência do nitrito durante a análise de formaldeído, com possível desenvolvimento de técnicas ou adaptações de métodos para neutralizar essa interferência.
- Avaliar de forma mais concisa a interferência da adição de peróxido de hidrogênio na formação de formaldeído.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBÍCKER, C. A. O Ozônio e a Formação de Bromatos. *Agua Latinoamérica*. p 30-36. sept-oct, 2002.
- ALMEIDA et al. Problemática da Desinfecção. *Empresa Portuguesa de Águas Livres (EPAL)*. 17 p. [2002?].
- AMIN, M. M. et al. A review on wastewater disinfection. *International Journal of Environmental Health Engineering*, v. 2, n. 1, p. 22, 2013.
- ARSLAN, I., BALCIOGLU, I. Advanced oxidation of raw and bio-treated textile industry wastewater with O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV and their sequential application. *J. Chem. Tech. Biotech.* 76, 53, 2001.
- ASANO, T. (1998) Wastewater reclamation and reuse, Vol. 10. In: Eckenfelder WW, Malina JF, Patterson JW (eds) *Water quality management library*. CRC Press, Boca Raton.
- ASSIRATI, D. M. Desinfecção de Efluentes de ETE com ozônio para uso agrícola. 171 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil, na Área de Concentração de Saneamento Ambiental). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.
- AUSTRALIAN DRINKING WATER GUIDELINES 6, 2004/Australian Government National Health and Medical Research Council, Natural Resource Management Ministerial Council. 2011.
- BACHMANN, A.; BEARD, V.DL.; McCARTY, P.L. (1985), Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor, *Water Res.* 19, 99-106.
- BALOCH, M.I. Methanogenic granular sludge as a seed in an anaerobic baffled reactor. *Water Environ. J.* 25, 171-180, 2011.
- BASSANI, L. et al. Utilização do ozônio na desinfecção de efluentes sanitários. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 28. FEMISCA, 2002. p. 1-8.
- BILOTTA, P. Estudo comparativo da ação do ozônio e radiação ultravioleta na desinfecção de esgoto sanitário. 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2000.
- BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. Inativação de Indicadores Microbiológicos com Ozônio no Tratamento de Esgoto Sanitário Visando o Reuso de Água. *Revista AIDIS*, v. 4, n. 2, p. 48-56, 2011.
- BITTON, G. *Wastewater Microbiology*. Wiley-Liss, Inc. New York, Ny. (1994). 478p.
- BONCZ, M. Á. Selective Oxidation of Organic Compounds in Waste Water: by ozone-based oxidation processes. Thesis Wageningen University, Wageningen, the Netherlands- with summary in Dutch-168 p, 2002.
- BRITO, J. M.; RANGEL, M. C. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. *Química Nova*, v. 31, n. 1, p 114-122, 2008.
- BROSÉUS, R. et al. Ozone oxidation of pharmaceuticals, endocrine disruptors and pesticides during drinking water treatment. *Water research*, v. 43, n. 18, p. 4707-4717, 2009.
- BUSTOS, Y. et al. Disinfection of Primary Municipal Wastewater Effluents Using Continuous UV and Ozone Treatment. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 6, p. 16, 2014.
- CAMEL, V.; BERMOND, A. The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment. *Water Research*, v. 32, n. 11, p. 3208-3222, 1998.
- CAMPOS, J.C. et al. Tratamento do chorume do aterro sanitário de Pirai (RJ) utilizando wetlands. In: VI SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Vitória-ES: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002.

CAN, Z. S.; GUROL, M. Formaldehyde Formation During Ozonation Of Drinking Water. *Ozone: Science & Engineering The Journal of the International Ozone Association*. v. 25:1, p. 41 – 51. May, 2007.

CAO, W.; MEHRVAR M. Slaughterhouse wastewater treatment by combined anaerobic baffled reactor and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes. *Chem. Eng. Res. Des.* 89 (7), 1136-1143. 2011.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Águas Superficiais. Reuso de Água. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/39-Reuso-de-%C3%81gua> >. Acesso em: 29 mai 2013.

CHERNICHARO C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: biodigestores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, v.5, 1997.

CHIANG, P. C. et al. Modeling an ozone bubble column for predicting its disinfection efficiency and control of DBP formation. *Chemosphere*, v. 39, n. 1, p. 55-70, 1999.

CHO, M.; CHUNG, H.; YOON, J. Disinfection of water containing natural organic matter by using ozone-initiated radical reactions. *Applied and environmental microbiology*, v. 69, n. 4, p. 2284-2291, 2003.

COOPER, P. Constructed wetlands after 25 years of application: A review of the developments that we have made and the problems that we still have to overcome. 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Veneza, Itália, 4-9 Outubro 2010. 2010.

COSTA, H. S. Estudo do comportamento do processo de ozonização como pós-tratamento de efluentes de sistema de tratamento anaeróbio de águas residuárias domiciliares. 295 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

COSTA, H.; DANIEL, L. Estudo do comportamento do ozônio na desinfecção de águas residuárias domiciliares. Relatório Final PROSAB Edital 3 – Tema 2 – Desinfecção de Efluentes Sanitários, remoção de Patógenos e Substâncias Nocivas – Vitória, ES, Dezembro de 2002.

COSTA, J. B. Avaliação ecotoxicológica de efluente de tratamento secundário de esgoto sanitário após desinfecção com ácido peracético, cloro, ozônio e radiação ultravioleta. 2007. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

CRAFTSTORM, R. C. et al. Formaldehyde damage to DNA and inhibition of DNA repair in human bronchial cells *Science*, v. 220, n. 4593. p. 216-218, 1983.

DABROWSKA, A.; SWIETLIK, J.; NAWROCKI, J. Formation of aldehydes upon ClO<sub>2</sub> disinfection. *Water Research*. v. 37. p. 1161–1169, 2003.

DANIEL, L. A. (Coordenador) Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável. Rio de Janeiro ABES 2001. 155p. Projeto PROSAB.

DANIEL, L. A. Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta: fotoreativação e obtenção de parâmetros cinéticos. Tese (Doutorado) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1993..

DIAS, L. H. M.; STIPP, V; SOUZA, J. B. Processos empregados na desinfecção de esgotos sanitários. VI Semana de Estudos da Engenharia Ambiental. UNICENTRO. Irati, 2008.

DIAZ M. E., LAWS E., FRANK J. Control of pathogenic microorganisms and turbidity in poultry- processing chiller water using UV-enhanced ozonation. *Ozone Sci. Engin.* 23, (1), 53, 2001.

DISINFECTION byproducts Health effects. Lenntech-Water Treatment Solutions. c1998-2011. Disponível em: <<http://www.lenntech.com/water-disinfection/disinfection-byproducts-health.htm>>. Acesso em: 13 jan 2012.

DOE. Washington State Department of Ecology. Criteria for Sewage Works Design. In: Water Quality Program, USA, 1998.

- DOMENJOUR, B et al (2011): Ozone-Based Processes Applied to Municipal Secondary Effluents, *Ozone: Sci. & Eng: The Journal of the International Ozone Association*, 33:3, 243-249.
- DUGUET, J. P.; BRODARD, E.; DUSSERT, B.; MALLEVIALLE, J. (1985). Improvement in the effectiveness of ozonation of drinking water through the use of hydrogen peroxide. *Ozone: Sci. Eng.* v 7 (3) p. 241–258.
- EPA, 1992. Manual – Guidelines for Water Reuse. EPA/625/R-92/004, September 1992.
- FINCH, G.R.; SMITH, D.W. Ozone dose-response of *E. coli* in activated sludge effluent. *Water Research*. 23: 1017-1025. 1989.
- FORESTI, E. Anaerobic Treatment of domestic sewage: Established Technologies and Perspectives, In: 9<sup>th</sup> World Congress Anaerobic Digestion, Antwerpen, Belgium, p37-42, 2001.
- FOULK, C.W. Quantitative chemical analysis: an introduction to the science and practice of chemical measurement. 1 ed. New York : McGraw-Hill, (1952). 484 p.
- GARDONI D., VAILATI A., CANZIANI R. Decay of Ozone in Water: A Review. *Ozone Sci. Engin.* 34, (4), 233, 2012.
- GLAZE, W. H.; KANG, J. W. (1988). Advanced Oxidation Processes for Treating Groundwater Contaminated with TCE and PCE: Laboratory Studies. *Journal of American Water Works Association*, v. 88, n. 5, p. 57-63.
- GLAZE, W. H.; KOGA, M.; CANCELLA, D. Ozonation Byproducts. 2. Improvement of an Aqueous-Phase Derivatization Method for the Detection of Formaldehyde and Other Carbonyl Compounds Formed by the Ozonation of Drinking Water Environ. Sci. Technol, Vol. 23, No. 7, p. 838-847, 1989.
- GONÇALVES, R. F; coord. - Desinfecção de Esgotos Sanitário, FINEP/PROSAB, 2003.
- GOPALA KRISHNA, G. V. T.; KUMAR, P.; KUMAR, P. Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR). *Bioresource technology*, v. 99, n. 17, p. 8193-8200, 2008.
- GOTTSCHALK, C.; LIBRA, J. A.; SAUPE, A. *Ozonation of Water and Wastewater*. Wiley-VCH, 2000.
- GROBICKI, A.; STUCKEY, D. C. (1992), The combined biological nitrogen and phosphorus removal – design and large scale experiences, *Water Sci Technol* 26(9-11), 2241-2244.
- GROSVENOR, T. Strategies for Minimizing Ozonation By-Products in Drinking Water. *Water & Wastes Digest*. c2012. Disponível em: <<http://www.wwdmag.com/microfiltration/strategies-minimizing-ozonation-products-drinking-water>>. Acesso em 10 jan 2012.
- GUOKAI, F.; YIYUE, H.; ZHI, Z. A photocatalytic organic wastewater disposing system based on solar energy. *Procedia Engineering*, v. 23, p. 333-338, 2011.
- HESPANHOL, I et al. Proposta de reuso de esgotos tratados pela usina de geração de energia Carioba–II. CTH, maio de, 2001.
- HESPANHOL, I.; MIERZWA, J. C. Procedimentos e técnicas de tratamento de efluentes industriais para eliminar o potencial de riscos: Parte 4. *Gerenciamento Ambiental*, São Paulo, 2001.
- HUA, G.; RECKHOW, D. A. (2008). DBP formation during chlorination and chloramination: effect of reaction time, pH, dosage, and temperature. *Journal of American Water Works Association*. Vol. 100, n.8, p.82-95.
- HUGHES, S. Breakthrough in the removal of organics. *Water Waste Treat.* v. 35. p26-27, 1992.
- HUNT, N. K.; MARINAS, B. J. Inactivation of *Escherichia coli* with ozone chemical inactivation kinetics. *Water Res.* 33, 2633-2641, 1999.
- HUNT, N.; MARINAS, B. Kinetics of *Escherichia coli* inactivation with ozone. *Water Research*, v. 31, n. 6, p. 1355-1362, 1997.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008, Brasília, 2008

INCA Instituto Nacional de Câncer. Formol ou Formaldeído. c1996-2012. Disponível em: <[http://www1.inca.gov.br/conteudo\\_view.asp?ID=795](http://www1.inca.gov.br/conteudo_view.asp?ID=795)>. Acesso em: 17 jan 2012.

JAVAREZ JUNIOR, A.; PAULA JUNIOR, D. R.; GAZZOLA, J.. Avaliação do desempenho de dois sistemas modulares no tratamento anaeróbio de esgotos em comunidades rurais. *Eng. Agríc.* [online]. 2007, vol.27, n.3, pp. 794-803. ISSN 0100-6916. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162007000400024>>. Acesso em 17 abr 2014.

JEFFERY, G. H. et al. *Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis*. 5<sup>th</sup> ed. Longman, New York, USA, 1989.

JOHNSON, J. D. Disinfection Water and Wastewater. By American Arbor Science Publishers, Inc. (1975). 425 p.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 5 ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES Rio de Janeiro, 904p, 2009.

KARNIK, B. S. et al. The effects of combined ozonation and filtration on disinfection by-product formation. *Water Research* v. 39. p 2839–2850, 2005.

KIM, B. et al. Bactericidal effect of TiO<sub>2</sub> photocatalyst on selected food-borne pathogenic bacteria. *Chemosphere*, v. 52, n. 1, p. 277-281, 2003.

KISHIMOTO, N.; MORITA, Y.; TSUNO, H; YASUDA, Y. (2007) Characteristics of electrolysis, ozonation and their combination process on treatment of municipal wastewater. *Water Environ Res* 79(9):1033– 1042

KUMAR, A. T.; MEHROTRA, R. (2001). Performance evaluation of anaerobic baffled reactor for dairy waste treatment, 9th World Congress Anaerobic Digestion, Antwerpen, Belgium, 621-623.

LANGLAIS, B., RECKHOW, D.A., BRINK, D.R. Ozone in Water Treatment: Application and Engineering. Lewis Publishers, 569p. (1991).

LAZAROVA, V. et al. Advanced wastewater disinfection Technologies: short and long term efficiency. *Water Sci Technol* 38, p109-117, 1998.

LEE, Y.; VON GUNTEN, U.. Oxidative transformation of micropollutants during municipal wastewater treatment: Comparison of kinetic aspects of selective (chlorine, chlorine dioxide, ferrate<sup>VI</sup>, and ozone) and non-selective oxidants (hydroxyl radical). *Water research*, v. 44, n. 2, p. 555-566, 2010.

LEITE, V. D. et al. Tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. *Eng. sanit. ambient*, v. 9, n. 4, p. 280-284, 2004.

LETTINGA, G. et al. UASB-process design for various types of wastewaters. *Water Science Technology*, Vol. 24, p. 87-107, 1991.

LIU, R.; TIAN, Q.; CHEN, J. The developments of anaerobic baffled reactor for wastewater treatment: A review. *Afr J Biotechnol* 9(11), 1535-1542. 2010.

LOURENÇÃO, J. (2009). Avaliação da Resistência de Microrganismos Patogênicos à Desinfecção Sequencial com Ozônio-Radiação Ultravioleta e Cloro-Radiação Ultravioleta. São Carlos, 2009. 141p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MANARIOTIS I.D., GRIGOROPOULOS, S.G. Low-Strength Wastewater Treatment Using an Anaerobic Baffled Reactor, *Water Environ. Res.* 74, 170-176. 2002.

MANCUSO, P. C. S.; DOS SANTOS, H. F. Reuso de água. Editora Manole Ltda, 2003.

MARTÍNEZ, S. B.; PÉREZ-PARRA, J.; SUAY, R. Use of ozone in wastewater treatment to produce water suitable for irrigation. *Water resources management*, v. 25, n. 9, p. 2109-2124, 2011.

MEDEIROS, R. C. Comparação da resistência de protozoários patogênicos—giárdia spp. e *Cryptosporidium* spp.—e de microrganismos indicadores à desinfecção sequencial Cloro-Radiação Ultravioleta e Ozônio—Radiação Ultravioleta. 2010. 212 p. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)—Universidade de São Carlos, São Carlos.

MEHRJOUEI, M. et al. Decolorization of Wastewater Produced in a Pyrolysis Process by Ozone: Enhancing the performance of Ozonation. *Ozone: Science & Engineering*, v. 32: p. 349–354, sept-oct 2010.

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering treatment and reuse*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1819p, 2002.

MILLER, J.C., MILLER, J.N. *Statistic for Analytical Chemistry*, third ed. Ellis Horwood PTR Prentice Hall. 233 p. 1993.

MILTNER, R. J.; SHUKAIRY, H. M.; SUMMERS, R. S. Disinfection by-product formation and control by ozonation e biotreatment. *American WaterWorks Association* p. 53-55, 1992.

MONACO, B, P. Inativação de Indicadores Patogênicos em Sistemas Combinados de Tratamento e Pré-Desinfecção de Esgoto Sanitário. 136p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. (2006).

MUTTAMARA, S.; SALES, C. I.; GAZALI, Z. Formation of trihalomethane from chemical disinfectants and humic substances in drinking water. *J. Water Supply*. v. 13. p105-117, 1995.

NATIONAL Academy Press. *Formaldehyde and other Aldehydes*. Washington, D. C, 1981.

NAWROCKI, J. et al. Influence of Ozonation Conditions on Aldehyde and Carboxylic Acid Formation. 10 p, 2002.

NAWROCKI, J.; BILOZOR, S. Brominated oxidation by-products in drinking water treatment. *Journal of Water Supply Research and Technology – Aqua* 46 (6), 304. 1997.

NAWROCKI, J; KALKOWSKA, I. Effect of pH and hydrogen peroxide on aldehyde formation in the ozonation process. *J Water SRT – Aqua* Vol. 47, n 2, 50-56, 1998.

NIEHAUS, M. D. et al. Early childhood diarrhea is associated with diminished cognitive function 4 to 7 years later in children in a northeast Brazilian shantytown. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, v. 66, n. 5, p. 590, 2002.

NUVOLARI, A. *Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda./Fatec, 2003. 519 p.

ORANGE COAST WATCH. Issue paper. Issues regarding disinfection of wastewater using sodium hypochlorite. Califórnia, 2002. 47p.

OZONE: Its Properties and Industrial Uses. Nutech O3, Inc. c2008. Disponível em: <[http://www.nutech-o3.com/ozone\\_primer.htm](http://www.nutech-o3.com/ozone_primer.htm)>. Acesso em: 13 jan 2012.

PARASKEVA, P.; GRAHAM, N. J. D. Treatment of a secondary municipal effluent by ozone, UV and microfiltration: microbial reduction and effect on effluent quality. *Desalination*, v. 186, n. 1, p. 47-56, 2005.

PASQUALINI, L. N. Estudo da oxidação de matéria orgânica de lixiviado de aterro sanitário por meio de tratamento com ozônio, peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta. 2010. 144 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

PASSEGGI, M. et al. Modified UASB reactor for dairy industry wastewater: performance indicators and comparison with the traditional approach. *Journal of Cleaner Production*, 26, 90 – 94, 2012.

- PHILIPPI, L., SEZERINO P. H. Aplicação de Sistemas tipo Wetlands no tratamento de águas residuárias: Utilização de filtros plantados com macrófitas. Florianópolis Ed. do Autor. 2004. 144 p.
- QI, F. et al. Catalyzed ozonation decomposition of taste and odor-causing substances in water and simultaneous control of aldehyde generation. *Environmental Engineering Science*, v. 29, n. 7, p. 580-589, 2012.
- RENNECKER, J. L.; MARINAS, B. J.; OWENS, J. H. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone. *Water Res.* 33. p2481-2488, 1999.
- RICE, E.W., et al. (Eds.) (2012). Standard methods for the examination of water and waste water 22nd Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- RICHARDSON, S. D. et al, Identification of New Ozone Disinfection Byproducts in Drinking Water. *Environ. Sci. Technol.* 1999, 33, 3368-3377. VOL. 33, NO. 19, 1999.
- RIED, A.; MIELCKE, J.; WIELAND, A. The potential use of ozone in municipal wastewater. *Ozone: Science & Engineering*, v. 31, n. 6, p. 415-421, 2009.
- RIZVI, H. et al. Disinfection of UASB-Treated Municipal Wastewater by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV, Ozone, PAA, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Sunlight, and Advanced Oxidation Processes: Regrowth Potential of Pathogens. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 22, n. 4, p. 1153, 2013.
- ROBSON, C. M.; RICE R. G. (1991). Wastewater ozonation in the USA – history and current status – 1989. *Ozone Science and Engineering*. v.13, n. 1, p. 23-40.
- ROSAL, R. et al. Oxidation of dissolved organic matter in the effluent of a sewage treatment plant using ozone combined with hydrogen peroxide (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). *Chemical Engineering Journal* 149 (2009) 311–318, 2009.
- ROSENFELDT, E. J. et al. Comparison of the efficiency of dOH radical formation during ozonation and the advanced oxidation processes O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Water Research* 40 (2006) 3695 – 3704, 2006 .
- ROY, D.; ENGLEBRECHT, R.S.; CHIAN, E.S.K. (1980) Inactivation of Enteroviruses by Ozone. *Prog. Water Techn.*, v 12, p. 819-836.
- SALLA, M. R. (2006). Sistema de ozonização em esgoto de reator anaeróbio: Estudo da hidrodinâmica e das respostas oscilantes de DQO. São Carlos. 446p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SAVOYE, P. JANEX M.L., LAZAROVA, V. Wastewater disinfection by low-pressure UV and ozone: a design approach based on water quality. *Water Science & Technology*. 43 (10): 163-171. 2001.
- SCHEUPLEIN, R. J. Formaldehyde: The Food and Drug Administration's perspective. In: V. Turoski (ed.), *Formaldehyde - analytical chemistry and toxicology*. American Chemical Society, Washington, D.C. pp. 237-245. *Advances in Chemistry Series* 210, 1985.
- SELMA, M. V. et al. Effect of ozone on the inactivation of *Yersinia enterocolitica* and the reduction of natural flora on potatoes. *Journal of Food Protection*, v. 69, n. 10, p. 2357-2363, 2006.
- SELMA, M. V. et al. Elimination by ozone of *Shigella sonnei* in shredded lettuce and water. *Food microbiology*, v. 24, n. 5, p. 492-499, 2007.
- SILVA, G. H. R. et al. Anaerobic effluent disinfection using ozone: Byproducts formation. *Bioresource Technol.*, v. 101, 6981–6986, 2010.
- SILVA, G. H. R., Formação de aldeídos e triometanos da desinfecção por ozonização, cloração e ozonização/cloração de efluente de tratamento anaeróbio de esgoto sanitário. 2008. 409 f. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

SILVA, G. H. R.; NOUR, E. A. A. Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio: Sistema de baixo custo para tratamento de esgotos de pequenas comunidades. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.2, p.268-275, 2005 Campina Grande, PB, DEAg/UFCG, 2005.

SILVA, S. C. “Wetlands Construídos” de Fluxo vertical com Meio Suporte de Solo Natural Modificado no Tratamento de Esgotos Domésticos. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.TD-003/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília; Brasília-DF, 205 p., 2007.

SILVEIRA, I. C. T. Cloro e ozônio aplicados à desinfecção de efluente hospitalar tratado em contadores biológicos rotatórios, com avaliação de efeitos tóxicos em *Daphnia similis*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (dissertação mestrado). Porto Alegre, 2004.

SNIS. Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento – Diagnóstico de Serviços de Água e Esgotos - 2010. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. – Brasília: MCIDADES. SNSA, 2012.

SNYDER, S. A. et al. Ozone Oxidation of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals in Surface Water and Wastewater. Ozone: Science and Engineering, 28: 445–460, 2006.

SOUZA, J. B. Avaliação de métodos para desinfecção de água, empregando cloro, ácido peracético, ozônio e o processo de desinfecção combinado ozônio/cloro. 2006. 190 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SPELLMAN, F. R. Choosing disinfection alternatives for water/wastewater treatment. Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co., (1999). 128 p.

SPONZA, D .T.; DEMIRDEN, P. Relationships between chemical oxygen demand (COD) components and toxicity in a sequential anaerobic baffled reactor/aerobic completely stirred reactor system treating Kemicetine. Journal of Hazardous Materials 176 (2010) 64–75, 2010.

SUGAYA, N. et al. Analysis of Aldehydes in Water by Head Space-GC/MS. Journal of Health Science, 47(1) 21-27. 2001.

SWIETLIK, J. et al . Reactivity of natural organic matter fractions with chlorine dioxide and ozone. Water Research 38 (2004) 547–558, 2004.

TAWFIK, A.; SALEM, A.; EL-QELISH, M. Two stage anaerobic baffled reactors for bio-hydrogen production from municipal food waste. Bioresource Technology 102 (2011) 8723–8726, 2011.

TILCHE, A., VIEIRA, S.M.M. Discussion report on reactor design of anaerobic filters and sludge bed reactors, Water Sci Technol, v. 24(8), p193-206, 1991.

TOMKINS, B.; MCMAHON, J.; CALDWELL, W. Liquid chromatographic determination of total formaldehyde in drinking water. J. Assoc. Off. Anal. Chem., v. 72, p. 835-839, 1989.

TRATA BRASIL. Situação do Saneamento no Brasil. c2012. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/situacao-do-saneamento-no-brasil>>. Acesso em: 23 mai 2013.

TUNDISI, J. G. Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez. RiMa Editora/ Instituto Internacional de Ecologia. (2003). 247 p

TYRRELL, S. A.; RIPPEY, S. R.; WATKINS, W. D. Inactivation of bacterial and viral indicators in secondary sewage effluents, using chlorine and ozone. Water Research, (1995). v.29, n. 11, p. 2483-2490.

USEPA, U.S. Alternative disinfectants and oxidants. Guidance Manual, EPA 815-R-99-014, 1999.

USEPA-United States Environmental Protection Agency. Ozone Disinfection – Wastewater Technology Fact Sheet. EPA-832/R-99-063. Washington DC, 1999b.



- VARGAS, G. D. L. P. Tratamento terciário de esgoto sanitário através de processos oxidativos avançados para a obtenção de águas de reuso. 2008. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.
- VENOSA, A. D. (1972). Ozone as Water and Wastewater Disinfectant: A Literature Review. In: E.L. Evans H. (Ed.), Ozone in Water and Wastewater Treatment, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI.
- VON DREIFUS, T. Tratamento de águas residuárias por alagados construídos (*wetlands*) de fluxo subsuperficial horizontal, utilizando vetiver (*chrysopogon zizanioides l.*): avaliação e desempenho de três leitos distintos. 84f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012.
- VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 3 ed. v.1 Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 452 p.
- WANG, J., HUANG, Y., ZHAO, X. Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor. *Bioresour Technol* 93, 205–208. 2004.
- WEF-Water Environment Federation – *Wastewater Disinfection – Manual of Practice*. FD-10. Alexandria, VA: Water Environment Federation, US, 1996.
- WERF. Water Environment Research Foundation. *DISINFECTION Comparison of UV Irradiation to Chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance*.EUA. Project 91-WWD-1. (1995).
- WERT, E.C. et al. Formation of oxidation byproducts from ozonation of wastewater. *Water Research* 41 (7), 1481–1490. 2007.
- White G.C., 1999. *Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants*, fourth ed. Wiley-Interscience, John Wiley and Sons Inc., NY.
- WHO. 2002. Concise International Chemical Assessment Document (CICAD) no. 40. Formaldehyde. Geneva, World Health Organization.
- WHO. 2006. World Health Organization Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. vol. 1: Policy and regulatory aspects.
- WHO. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Genebra, 1989.
- WU J., WANG T. Ozonation of aqueous azo dye in a semibatch reactor. *Water Res.* 34, 1093, 2001.
- XU, P. et al. Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research* 36, 1043–1055, 2002.
- ZHANG Y., GRANT A., SHARMA A., CHEN D., CHEN L. (2010) Alternative water resources for rural residential development in Western Australia. *Water Resour Manage* 24:25–36.

## APÊNDICE A

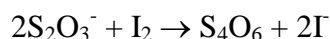
Preparação e padronização do Tiosulfato de sódio (LOURENÇÃO, 2010).

### *Preparação de solução de tiosulfato 0,025N*

O equivalente do tiosulfato é o mol, 248,18. Para se preparar uma solução de 0,025 N dissolve-se 6,2 g de tiosulfato de sódio cristalizado em um litro de água, em um balão volumétrico. Essa solução pode ser padronizada por vários métodos, podendo ser usado iodato de potássio, dicromato de potássio, solução padrão de iodo e sulfato de cério (IV).

### *Padronização da solução de tiosulfato de sódio*

O tiosulfato não é um padrão primário, pois existe uma incerteza sobre o seu conteúdo exato de água. Assim torna-se necessário realizar a padronização dessa solução. A padronização com o iodato de potássio é realizada através das seguintes equações:



O iodato reage com o iodeto de potássio liberando iodo. Portanto, é necessário pesar, com exatidão 0,14 – 0,15 g de iodato de potássio puro e seco, dissolver em 25 ml de água destilada fervida e fria, adicionar 2 g de iodeto de potássio e 5 ml de ácido sulfúrico 1M.

Titular, com agitação constante, o iodo liberado com a solução de tiosulfato. Quando a cor estiver pálida, adicionar solução de amido e continuar a titulação até que a cor mude de azul para incolor. Titular em triplicada.

Se o amido é adicionado quando a cor amarela ainda estiver muito intensa, um complexo precipitado pode ocorrer na forma de grânulos escuros. Uma vez formada, essas partículas escuras se dissolvem lentamente e podem confundir a verdadeira determinação do ponto final da titulação. Esses grânulos escuros indesejados são evitados adicionando-se o amido quando a cor da solução na titulação estiver amarela-palha (FOULK, 1952).

Com a padronização da solução de tiosulfato, pode-se saber com exatidão o valor da sua normalidade. Essa solução padronizada pode ser então usada para titular soluções com diversas concentrações de iodo formado com a reação do iodeto de potássio e o ozônio. O iodato é o correspondente ao ozônio.

Com o valor do volume usado de tiosulfato de sódio nessa titulação, poder-se-á saber a produção de ozônio produzido após a ozonização capturada no frasco lavador de gás.

## APÊNDICE B

Preparação do branco, usado no equacionamento da produção de ozônio, de acordo com Salla (2006).

A preparação do branco se faz necessário, pois através da inclusão do volume de tiosulfato de sódio gasto na preparação do branco ( $V_b$ ) dentro da equação de determinação da produção de ozônio consegue-se desconsiderar eventuais produtos químicos que ocasionalmente estejam dentro da solução de iodeto de potássio ozonizada.

O roteiro usual na preparação do branco é:

- Coleta-se 200 ml de iodeto de potássio 2% (não ozonizada);
- Fixa-se a solução de KI com 4 ml de  $H_2SO_4$  1 N (ácido sulfúrico);
- Depois de fixado, adiciona-se 2 ml de amido (funciona como indicador dentro da titulação);
- Finalizando, titula-se com tiosulfato de sódio e anota-se o valor do volume gasto na titulação,  $V_b$ .

No roteiro da preparação do branco apresentado acima, caso a introdução do amido não proporcione uma cor azulada na solução, adiciona-se iodo 0,005N até escurecer ( $V_{Iodo}$ ).

Depois de a solução atingir uma cor azulada escura, anota-se o volume de tiosulfato de sódio ( $V_{Na_2S_2O_3}$ ) necessário para eliminar totalmente a coloração azulada adquirida com a adição do iodo. Nesta situação, o volume  $V_b$  será:

$$V_b = V_{Iodo} - V_{Na_2S_2O_3}$$

### ❖ Diferença do equacionamento para cálculo da produção de ozônio com a adição de iodo 0,005 N:

O equacionamento usado para calcular a produção de ozônio sem adição de iodo 0,005 N é:

$$P_{(gO_3/h)} = \frac{N_t \times V_{KI} \times (V_F - V_b) \times 24000 \times 60}{V_{amostra} \times t \times 1000}$$

O equacionamento usado para calcular a produção de ozônio com adição de iodo 0,005 N é:

$$P_{(gO_3/h)} = \frac{N_t \times V_{KI} \times (V_F + V_b) \times 24000 \times 60}{V_{amostra} \times t \times 1000}$$

## APÊNDICE C

O procedimento experimental na determinação da produção de ozônio (calibração do aparelho ozonizador) usado seguiu o mesmo adotado por Salla (2006) e é descritos a seguir:

- Adiciona-se na coluna de ozonização um volume de 4,40 L de solução de iodeto de potássio 2% (KI);
- Após 30 segundos do início do funcionamento do compressor de ar, liga-se o ozonizador dentro da vazão de ozônio desejada. Daí inicia-se o borbulhamento do gás ozônio dentro da coluna de ozonização no tempo de contato de 5 minutos (pré-estabelecido);
- Atingido o tempo de contato pré-estabelecido, coleta-se 200 mL de solução de iodeto de potássio ozonizada da coluna de ozonização;
- Fixam-se os 200 ml de solução da coluna de ozonização com 4 mL de solução de ácido sulfúrico 1N;
- Depois de fixado, titula-se a amostra da coluna de ozonização com tiosulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 0,025 N, até que mude a coloração para amarelo-palha;
- Atingida a coloração amarelo-palha, adiciona-se 2 mL de solução de amido na amostra da coluna de ozonização, tornando a amostra azulada;
- Continuando a titulação, adiciona-se tiosulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 0,025 N até que a cor azulada suma totalmente, ficando transparente;
- Marca-se o volume total de tiosulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 0,025 N gasto.

Depois de anotado o volume total de tiosulfato de sódio, calcula-se a produção de ozônio ( $\text{g O}_3/\text{h}$ ) na coluna de ozonização através da seguinte equação:

$$P_{\text{Coluna}} = \frac{N_t \times \Delta_{V_t} \times V_{KI} \times 24000 \times 60}{V_{\text{amostra}} \times t \times 1000}$$

Onde:

$P_{\text{Coluna}}$  = produção de ozônio dentro da coluna de ozonização, ( $\text{g O}_3 \text{ h}^{-1}$ );

$N_t$  = normalidade do tiosulfato de sódio, (0,025);

$$\Delta_{V_t} = vf - vb$$

$vf$  = volume de tiosulfato consumido na titulação da amostra (mL);

$vb$  = volume de tiosulfato consumido na titulação do branco (mL);

$V_{KI}$  = volume da solução de iodeto de potássio 2% (KI) ozonizada, (4,40 Litros);

$V_{amostra}$  = volume da amostra coletada para a titulação, (200 mL);

$t$  = tempo de aplicação do ozônio na coluna de ozonização, (5 minutos);

24000, 60, 1000 = fatores de conversão para obtenção da produção em  $g\ h^{-1}$ .

Determinada a produção de ozônio dentro da coluna de ozonização, é possível calcular a dose de ozônio aplicada na coluna de ozonização, em  $mg\ L^{-1}$ , através da seguinte equação:

$$D_{coluna} = \frac{P \times t \times 1000}{V_{KI} \times 60}$$

Onde:

$D_{coluna}$  = dose parcial de ozônio na coluna, ( $mg\ L^{-1}$ );

$P_{coluna}$  = produção parcial de ozônio na coluna, ( $g\ h^{-1}$ );

$t$  = tempo de aplicação do ozônio na coluna de ozonização, (5 minutos);

$V_{KI}$  = volume da solução de iodeto de potássio 2% (KI) ozonizada, (4,40 Litros).

É importante lembrar que o cálculo da produção de ozônio do aparelho ozonizador não se limita apenas na determinação da produção de ozônio dentro da coluna de ozonização.

Adicionado à produção de ozônio dentro da coluna existe uma parcela que não se transfere no meio líquido, sendo eliminado no frasco lavador de gás. O método usado na determinação do excesso de ozônio no frasco lavador de gás é o iodométrico, igual ao utilizado na determinação da produção de ozônio dentro da coluna de ozonização. A partir daí, repete-se todo o equacionamento de determinação da produção de ozônio, objetivando quantificar o excesso de ozônio, resultando em:

$$Off - gas = \frac{N_t \times V_{KI} \times 24000 \times 60}{V_{amostra} \times t \times 1000}$$

Onde:

$Off\ gas$  = excesso de ozônio gasoso, ( $g\ O_3\ h^{-1}$ );

$N_t$  = normalidade do tiosulfato de sódio, (0,025);

$$\Delta_{V_t} = vf - vb$$

$vf$  = volume de tiosulfato consumido na titulação da amostra, (mL);

$v_b$  = volume de tiosulfato consumido na titulação do branco (mL);

$V_{KI}$  = volume da solução de iodeto de potássio 2% (KI) usado no frasco lavador de gás, (0,40L);

$V_{amostra}$  = volume da amostra coletada para a titulação, (200 mL);

$t$  = tempo de aplicação do ozônio na coluna de ozonização, (5 minutos);

24000, 60, 1000 = fatores de conversão para obtenção da produção em  $g\ h^{-1}$ .

Adicionalmente à determinação do excesso de ozônio, calcula-se a dose ou concentração do excesso de ozônio liberado pela coluna de ozonização, em  $mg\ L^{-1}$ .

$$D_{off-gas} = \frac{Off - gas \times t \times 1000}{V_{KI} \times 60}$$

Onde:

$D_{Off-gas}$  = dose off-gas de ozônio, ( $mg\ L^{-1}$ );

$Off-gas$  = excesso de ozônio no frasco lavador de gás, ( $g\ h^{-1}$ );

$t$  = tempo de aplicação do ozônio na coluna de ozonização, (5 minutos);

$V_{KI}$  = volume da solução de iodeto de potássio 2% (KI) usado no frasco lavador de gás, (0,40 Litros).

Tendo em mãos a produção de ozônio dentro da coluna de ozonização e no frasco lavador de gás, o valor da produção total do aparelho ozonizador é:

$$P_{Total} = P_{Coluna} + Off-gas$$

Onde:

$P_{Total}$  = produção total de ozônio, ( $g\ O_3\ h^{-1}$ );

$P_{Coluna}$  = produção de ozônio dentro da coluna de ozonização, ( $g\ O_3\ h^{-1}$ );

$Off-gas$  = excesso de ozônio no frasco lavador de gás, ( $g\ O_3\ h^{-1}$ ).

O cálculo da dose total de ozônio aplicada na coluna de ozonização fica:

$$D_{Total} = D_{Coluna} + D_{Off-gas}$$

Onde:

$D_{Total}$  = dose total de ozônio aplicada, ( $mg\ L^{-1}$ );

$D_{Coluna}$  = dose de ozônio aplicada dentro da coluna de ozonização, ( $mg\ L^{-1}$ );

$D_{Off-gas}$  = dose do excesso off-gas, ( $mg\ L^{-1}$ ).

Após apresentados todos os procedimentos para determinação da produção de ozônio total e a dose de ozônio total aplicada, através da Tabela C.2 é possível visualizar o resultado final da produção de ozônio do aparelho utilizado neste trabalho. Sendo que na Tabela C.1 estão os dados referentes às concentrações dos reagentes e volumes utilizados.

Tabela C. 1: Concentrações de reagente e volumes de amostras utilizados.

<b>Tiosulfato de Sódio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	
0,0243 N	0,025 N
Utilizado com o ozonizador regulado a produção mínima (%) e 25% de O <sub>3</sub>	Utilizado com o ozonizador regulado a produção de 50%, 75% e máxima (%) de O <sub>3</sub>
<b>Iodo (I<sub>2</sub>)</b>	
0,005 N	
<b>Volume de KI (L)</b>	
Coluna de ozonização	Frasco Lavador ( <i>Off-gas</i> )
4,40	0,40
<b>Volume amostra coletada para análise (mL)</b>	
Coluna de ozonização	Frasco Lavador ( <i>Off-gas</i> )
200	200

No APÊNDICE B foi apresentado o procedimento de preparação do branco, usado no equacionamento da produção de ozônio.

Por meio das Figura C.1 e Figura C.2 é possível observar os gráficos da produção de ozônio em função do fluxo de oxigênio (L min<sup>-1</sup> O<sub>2</sub>) e da dose de ozônio em função do fluxo de oxigênio (L min<sup>-1</sup> O<sub>2</sub>), respectivamente. Foi possível definir linhas de tendências com R<sup>2</sup> próximos de 1,0, definindo-se equações específicas para cada porcentagem de produção de ozônio.



Figura C. 1: Gráfico da produção de ozônio em função do fluxo de oxigênio aplicada para várias porcentagens de produção de ozônio (recurso do equipamento).

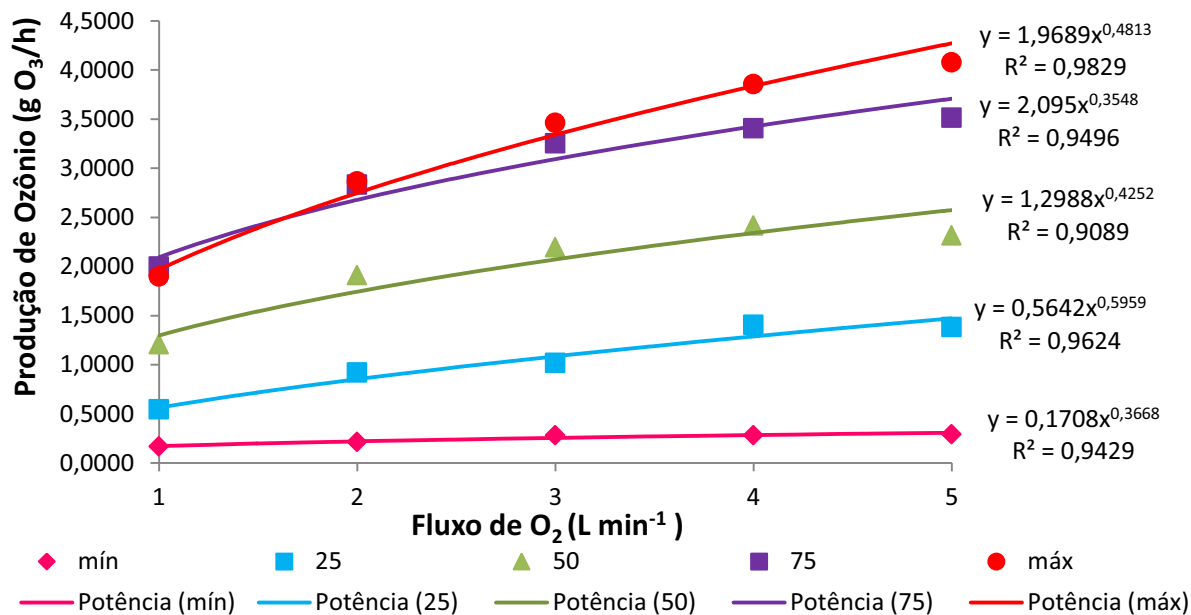


Figura C. 2: Gráfico da dose de ozônio em função do fluxo de oxigênio aplicada para várias porcentagens de produção de ozônio (recurso do equipamento).

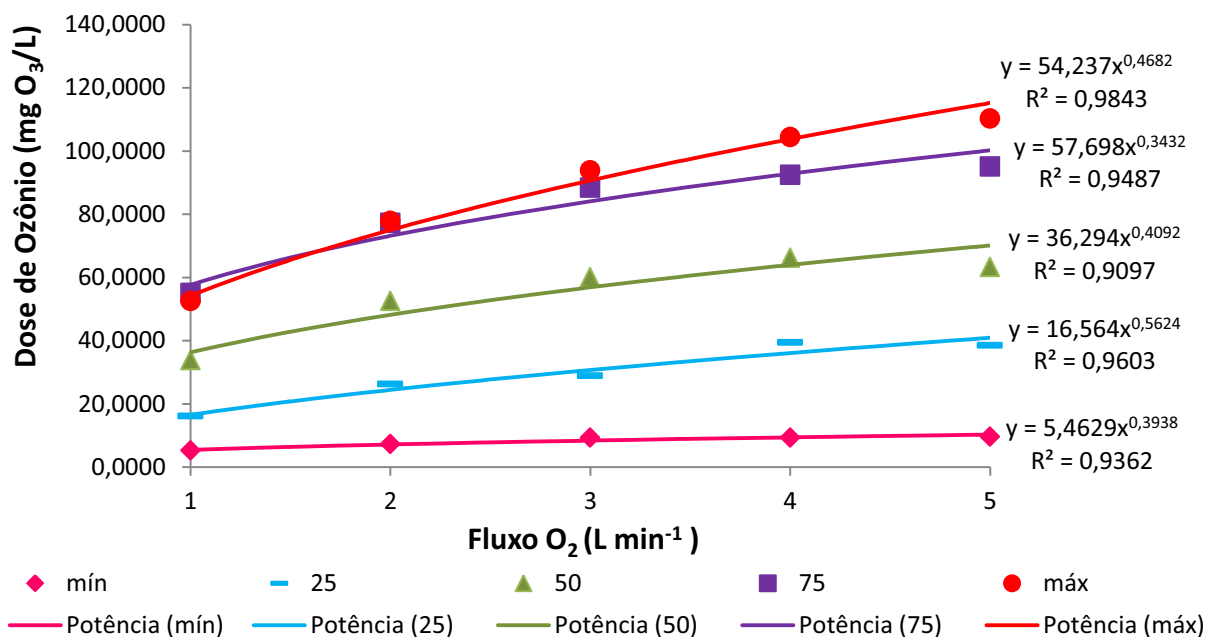


Tabela C. 2: Valores de produção e dose de ozônio obtido no processo de calibração do ozonizador, bem como os dados para determinação do mesmo.

Fluxo O <sub>2</sub>	(% de produção O <sub>3</sub> )	Branco (mL)		Coluna (mL Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		Off-Gas (mL)			Produção (g O <sub>3</sub> h <sup>-1</sup> )			Dose (mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )		
		V <sub>1,iodo</sub>	V <sub>1,Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>	V <sub>branco</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2,iodo</sub>	V <sub>2,Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>	V <sub>final</sub>	Coluna	Off-Gas	Total	Coluna	Off-Gas	Total
1,0		0,5	0,2	0,3	1,2	0,5	0,5	0	0,1650	0,0030	0,1680	4,3740	0,8748	5,2488
2,0		0,5	0,2	0,3	1,6	0,5	0,2	0,3	0,2090	0,0060	0,2150	5,5404	1,7496	7,2900
3,0	Mínima*	0,5	0,2	0,3	2,2	0,5	0,1	0,4	0,2749	0,0070	0,2819	7,2900	2,0412	9,3312
4,0		0,5	0,1	0,4	2,1	0,5	0,2	0,3	0,2749	0,0070	0,2819	7,2900	2,0412	9,3312
5,0		0,5	0,1	0,4	2,2	0,5	0,2	0,3	0,2859	0,0070	0,2929	7,5816	2,0412	9,6228
1,0		0,5	0,1	0,4	4,5	0,5	0,7	0,2	0,5389	0,0060	0,5449	14,2884	1,7496	16,0380
2,0		0,5	0,1	0,4	7,9	0,5	0,2	0,3	0,9128	0,0070	0,9198	24,2028	2,0412	26,2440
3,0	25*	0,5	0,1	0,4	8,8	0,5	0,2	0,3	1,0118	0,0070	1,0188	26,8272	2,0412	28,8684
4,0		0,5	0,1	0,4	12,3	0,5	0,1	0,4	1,3967	0,0080	1,4047	37,0332	2,3328	39,3660
5,0		0,5	0,1	0,4	12,1	0,5	0,2	0,3	1,3747	0,0070	1,3817	36,4500	2,0412	38,4912
1,0		0,5	0,1	0,4	10,5	0,5	0,2	0,3	1,1987	0,0070	1,2057	31,7844	2,0412	33,8256
2,0		0,5	0,1	0,4	16,9	0,5	0,2	0,3	1,9026	0,0070	1,9096	50,4468	2,0412	52,4880
3,0	50**	0,5	0,1	0,4	19,5	0,5	0,2	0,3	2,1885	0,0070	2,1955	58,0284	2,0412	60,0696
4,0		0,5	0,1	0,4	21,5	0,5	0,1	0,4	2,4084	0,0080	2,4164	63,8604	2,3328	66,1932
5,0		0,5	0,1	0,4	20,6	0,5	0,2	0,3	2,3095	0,0070	2,3165	61,2360	2,0412	63,2772
1,0		0,5	0,1	0,4	17,7	0,5	0,1	0,4	1,9905	0,0080	1,9985	52,7796	2,3328	55,1124
2,0		0,5	0,1	0,4	25,3	0,5	0,1	0,4	2,8264	0,0080	2,8344	74,9412	2,3328	77,2740
3,0	75**	0,5	0,1	0,4	29,1	0,5	0,1	0,4	3,2443	0,0080	3,2523	86,0220	2,3328	88,3548
4,0		0,5	0,1	0,4	30,5	0,5	0,1	0,4	3,3982	0,0080	3,4062	90,1044	2,3328	92,4372
5,0		0,5	0,1	0,4	31,5	0,5	0,2	0,3	3,5082	0,0070	3,5152	93,0204	2,0412	95,0616
1,0		0,5	0,1	0,4	16,8	0,5	0,1	0,4	1,8916	0,0080	1,8996	50,1552	2,3328	52,4880
2,0		0,5	0,1	0,4	25,6	0,5	0,2	0,3	2,8593	0,0070	2,8663	75,8160	2,0412	77,8572
3,0	Máxima**	0,5	0,1	0,4	31,0	0,5	0,1	0,4	3,4532	0,0080	3,4612	91,5624	2,3328	93,8952
4,0		0,5	0,1	0,4	34,6	0,5	0,1	0,4	3,8491	0,0080	3,8571	102,0600	2,3328	104,3928
5,0		0,5	0,1	0,4	36,6	0,5	0,1	0,4	4,0691	0,0080	4,0771	107,8920	2,3328	110,2248

\*Tiosulfato de Sódio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0,0243 N\*\*Tiosulfato de Sódio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0,025 N

## APÊNDICE D

### *Etapas para ensaio de desinfecção com o ozônio*

- Fechar a descarga de fundo da coluna de ozonização e preencher, o volume de 11,94 L ( $h = 1,28$  m) do efluente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio para a coluna de ozonização;
- Preencher o frasco lavador de gás, com 400 mL de solução de iodeto de potássio a 2% e conectar a mangueira de silicone da saída da coluna de ozonização;
- Coletar uma fração do efluente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio na própria coluna de ozonização;
- Verificar se todos os registros estão fechados para que apenas o *off-gas* seja encaminhado para o frasco lavador.
- Ligar o gerador de ozônio borbulhando apenas oxigênio;
- Abrir o registro que libera ar para a coluna de ozonização;
- Ajustar a vazão de ozônio necessária para a dosagem pré-determinada;
- Verificar se o gás está borbulhando no frasco lavador de gás;
- Ajustar as vazões, ligar o botão que começa a produzir o ozônio e cronometrar o tempo pré-determinado para o ensaio de desinfecção;
- Encerrado o tempo de contato, desligar o botão que produz o ozônio e aguardar no mínimo 30 s para que se possa desligar o compressor de ar;
- Após desligar os aparelhos, fechar o registro que libera ar para a coluna de ozonização e abrir o registro no topo da coluna para que o ar que está acima do nível de esgoto seja liberado. Desconectar o frasco lavador da mangueira de silicone. Concluídas estas etapas, uma amostra de volume igual a 2,0 L deverá ser coletada para posterior caracterização física, química e microbiológica;
- Esvaziar a coluna de ozonização por meio do registro de descarga de fundo;
- Realizar as análises de quantificação de *off-gas* e ozônio residual dissolvido;
- Encher duas vezes a coluna de ozonização com água corrente para limpeza da mesma e recommençar o procedimento para o próximo ensaio.

## APÊNDICE E

### *Ensaio de ozonização*

A seguir são apresentados os resultados individuais do efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e do efluente após cada ensaio de ozonização realizado, bem como a sua respectiva média e desvio padrão.

Tabela E. 1: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio utilizado nos ensaios de ozonização.

Efluente Reator				MÉDIA	DESVIO
<b>Data</b>	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
<b>Temperatura ambiente (°C)</b>	24,00	31,00	29,00	28,00	3,61
<b>Temperatura amostra (°C)</b>	24,00	26,00	26,00	25,33	1,15
<b>Temperatura laboratório (°C)</b>	-	-	-	-	-
<b>Chuvvas 24h</b>	SIM	NÃO	NÃO	-	-
<b>O<sub>3</sub> residual dissolvido (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	-	-	-	-
<b>O<sub>3</sub> residual gasoso (mg L<sup>-1</sup>) <i>Off-gas</i></b>	-	-	-	-	-
<b>Oxigênio Dissolvido</b>	1,48	0,95	2,96	1,80	1,04
<b>pH</b>	7,33	7,00	6,91	7,08	0,22
<b>Turbidez (NTU)</b>	8,59	6,54	1,73	5,62	3,52
<b>Cor verdadeira (Pt-Co)</b>	173,00	131,00	52,00	118,67	61,44
<b>Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (mg N L<sup>-1</sup>)</b>	2,10	1,20	15,00	6,10	7,72
<b>Nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) (mg N L<sup>-1</sup>)</b>	0,01	0,00	5,20	1,74	3,00
<b>DQO (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>)</b>	71,50	71,00	33,50	58,67	21,80
<b>Formaldeído (µg L<sup>-1</sup>)</b>	330,00	172,00	74,00	192,00	129,17
<b>Alcalinidade (mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>)</b>	302,33	192,98	121,73	205,68	90,96
<b>Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L<sup>-1</sup>)</b>	31,88	28,13	14,06	24,69	9,39
<b>Sólidos em Suspensão Totais (mg L<sup>-1</sup>)</b>	2,20	5,20	2,80	3,40	1,59
<b>Sólidos em Suspensão Fixos (mg L<sup>-1</sup>)</b>	0,60	1,10	1,50	1,07	0,45
<b>Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L<sup>-1</sup>)</b>	1,60	4,10	1,30	2,33	1,54
<b>Sólidos Totais (mg L<sup>-1</sup>)</b>	552,00	538,00	698,00	596,00	88,61
<b>Sólidos Fixos (mg L<sup>-1</sup>)</b>	182,00	232,00	240,00	218,00	31,43
<b>Sólidos Voláteis (mg L<sup>-1</sup>)</b>	370,00	306,00	458,00	378,00	76,32
<b><i>E. coli</i> (NMP/100 mL)</b>	4,90x10 <sup>4</sup>	2,30x10 <sup>4</sup>	4,90x10 <sup>2</sup>	8,20x10 <sup>3</sup>	24275,91
<b>Coliformes Totais (NMP/100 mL)</b>	1,30x10 <sup>5</sup>	4,60x10 <sup>4</sup>	7,90x10 <sup>4</sup>	7,79x10 <sup>4</sup>	42320,21

Tabela E. 2: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de ozonização utilizando uma dose aplicada de ozônio de 5,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e uma tempo de contato de 7 min.

E1				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	24,00	31,00	29,00	28,00	3,61
Temperatura amostra (°C)	24,00	26,00	26,00	25,33	1,15
Temperatura laboratório (°C)	26,90	27,30	25,90	26,70	0,72
Chuvas 24h	SIM	NÃO	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,19	0,11	0,41	0,24	0,16
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,24	0,06	0,02	0,10	0,12
Oxigênio Dissolvido	16,30	15,86	15,89	16,02	0,25
pH	7,07	6,97	7,14	7,06	0,09
Turbidez (NTU)	21,90	12,30	1,79	12,00	10,06
Cor verdadeira (Pt-Co)	50,00	38,00	32,00	40,00	9,17
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,50	1,10	11,10	4,57	5,66
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	3,10	1,04	1,79
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	76,00	66,00	28,00	56,67	25,32
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	355,00	318,00	84,00	252,33	146,95
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	274,42	185,96	117,39	192,59	78,73
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	31,41	25,31	9,84	22,19	11,12
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	12,40	3,30	3,20	6,30	5,28
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	3,60	1,00	0,20	1,60	1,78
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	8,80	2,30	3,00	4,70	3,57
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	440,00	790,00	1358,00	862,67	463,29
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	190,00	264,00	796,00	416,67	330,59
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	250,00	526,00	562,00	446,00	170,69
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>4</sup>	3,30x10 <sup>2</sup>	7,90x10 <sup>2</sup>	1,50x10 <sup>3</sup>	7185,92
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	7,90x10 <sup>4</sup>	1,30x10 <sup>4</sup>	1,40x10 <sup>4</sup>	2,43x10 <sup>4</sup>	37819,75

Tabela E. 3: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de ozonização utilizando uma dose aplicada de ozônio de 5,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e uma tempo de contato de 15 min.

E2				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	24,00	31,00	29,00	28,00	3,61
Temperatura amostra (°C)	26,00	25,50	25,50	25,67	0,29
Temperatura laboratório (°C)	26,80	27,00	25,50	26,43	0,81
Chuvas 24h	SIM	NÃO	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,11	0,12	0,84	0,36	0,42
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,05	0,01	0,00	0,02	0,03
Oxigênio Dissolvido	15,80	15,95	15,86	15,87	0,08
pH	7,71	7,56	7,61	7,63	0,08
Turbidez (NTU)	7,52	6,16	1,74	5,14	3,02
Cor verdadeira (Pt-Co)	130,00	85,00	51,00	88,67	39,63
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,30	0,60	16,30	6,07	8,87
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,00	0,01	5,08	1,69	2,93
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	44,50	68,00	38,00	50,17	15,78
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	136,00	136,00	58,00	110,00	45,03
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	302,33	196,49	117,39	205,40	92,79
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	31,88	29,53	13,13	24,84	10,22
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	3,80	3,60	3,00	3,47	0,42
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	2,00	0,90	1,70	1,53	0,57
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1,80	2,70	1,30	1,93	0,71
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	408,00	1548,00	530,00	828,67	625,94
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	170,00	256,00	134,00	186,67	62,68
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	238,00	1292,00	396,00	642,00	568,43
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>5</sup>	7,00x10 <sup>4</sup>	1,00x10 <sup>3</sup>	2,09x10 <sup>4</sup>	64552,30
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>5</sup>	1,10x10 <sup>5</sup>	6,30x10 <sup>3</sup>	4,48x10 <sup>4</sup>	66402,03

Tabela E. 4: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de ozonização utilizando uma dose aplicada de ozônio de 8,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e uma tempo de contato de 7 min.

E3				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	24,00	31,00	29,00	28,00	3,61
Temperatura amostra (°C)	26,00	25,00	25,80	25,60	0,53
Temperatura laboratório (°C)	25,00	27,10	25,80	25,97	1,06
Chuvvas 24h	SIM	NÃO	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,06	0,09	0,47	0,21	0,23
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,93	1,04	0,34	0,77	0,38
Oxigênio Dissolvido	14,49	16,07	15,95	15,50	0,88
pH	7,48	7,03	7,33	7,28	0,23
Turbidez (NTU)	6,18	11,10	1,74	6,34	4,68
Cor verdadeira (Pt-Co)	35,00	22,00	24,00	27,00	7,00
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,40	1,10	9,90	4,13	5,00
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	2,35	0,79	1,35
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	58,50	64,00	30,00	50,83	18,25
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	550,00	544,00	70,00	388,00	275,41
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	300,00	196,49	117,39	204,63	91,58
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	31,88	26,72	13,13	23,91	9,69
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	4,40	2,50	3,40	3,43	0,95
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,20	0,50	0,80	0,83	0,35
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	3,20	2,00	2,60	2,60	0,60
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	368,00	230,00	538,00	378,67	154,28
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	160,00	228,00	138,00	175,33	46,92
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	208,00	2,00	400,00	203,33	199,04
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,70x10 <sup>2</sup>	3,30x10 <sup>2</sup>	1,00x10 <sup>3</sup>	3,83x10 <sup>2</sup>	440,34
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>3</sup>	9,40x10 <sup>2</sup>	7,00x10 <sup>3</sup>	2,05x10 <sup>3</sup>	3399,59

Tabela E. 5: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de ozonização utilizando uma dose aplicada de ozônio de 8,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e uma tempo de contato de 15 min.

E4				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	24,00	31,00	29,00	28,00	3,61
Temperatura amostra (°C)	25,50	25,00	25,00	25,17	0,29
Temperatura laboratório (°C)	26,00	26,20	26,20	26,13	0,12
Chuvras 24h	SIM	NÃO	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,09	0,06	0,07	0,07	0,02
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,22	0,52	0,16	0,30	0,19
Oxigênio Dissolvido	16,04	16,16	16,01	16,07	0,08
pH	7,26	7,08	7,28	7,21	0,11
Turbidez (NTU)	13,00	5,87	1,37	6,75	5,86
Cor verdadeira (Pt-Co)	6,00	15,00	42,00	21,00	18,73
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,40	1,10	4,00	2,17	1,59
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	0,33	0,11	0,19
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	61,50	61,00	29,50	50,67	18,33
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	894,00	776,00	160,00	610,00	394,15
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	279,07	192,98	121,73	197,93	78,79
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	31,88	28,13	13,59	24,53	9,66
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	9,10	1,80	2,30	4,40	4,08
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	3,40	1,10	1,00	1,83	1,36
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	5,70	0,70	1,30	2,57	2,73
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	690,00	348,00	672,00	570,00	192,47
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	244,00	276,00	190,00	236,67	43,47
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	446,00	72,00	482,00	333,33	227,04
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>3</sup>	1,10x10 <sup>2</sup>	2,00x10 <sup>2</sup>	3,06x10 <sup>2</sup>	662,60
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	2,40x10 <sup>3</sup>	1,40x10 <sup>2</sup>	7,90x10 <sup>3</sup>	1,38x10 <sup>3</sup>	3991,14



Tabela E. 6: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de ozonização utilizando uma dose aplicada de ozônio de 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e uma tempo de contato de 7 min.

E5				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	24,00	31,00	29,00	28,00	3,61
Temperatura amostra (°C)	25,00	26,00	25,00	25,33	0,58
Temperatura laboratório (°C)	25,60	25,90	26,10	25,87	0,25
Chuvas 24h	SIM	NÃO	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,10	0,08	0,18	0,12	0,05
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,02	0,11	0,10	0,08	0,05
Oxigênio Dissolvido	13,66	15,86	16,13	15,22	1,35
pH	7,10	7,03	7,10	7,08	0,04
Turbidez (NTU)	15,90	9,94	1,83	9,22	7,06
Cor verdadeira (Pt-Co)	31,00	21,00	15,00	22,33	8,08
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,00	1,00	7,00	3,00	3,46
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,00	0,00	1,23	0,41	0,71
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	71,50	65,00	30,50	55,67	22,04
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	714,00	700,00	100,00	504,67	350,52
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	274,42	189,47	117,39	193,76	78,61
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	31,88	45,50	15,94	31,11	14,80
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	6,20	4,70	3,10	4,67	1,55
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	3,20	0,60	0,80	1,53	1,45
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	3,00	4,10	2,30	3,13	0,91
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	506,00	264,00	582,00	450,67	166,06
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	214,00	228,00	182,00	208,00	23,58
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	292,00	36,00	400,00	242,67	186,95
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	4,50x10 <sup>1</sup>	4,90x10 <sup>2</sup>	2,00x10 <sup>3</sup>	3,53x10 <sup>2</sup>	1024,71
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>2</sup>	7,90x10 <sup>2</sup>	1,10x10 <sup>4</sup>	1,04x10 <sup>3</sup>	6094,21

Tabela E. 7: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de ozonização utilizando uma dose aplicada de ozônio de 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e uma tempo de contato de 15 min.

E6				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	24,00	31,00	29,00	28,00	3,61
Temperatura amostra (°C)	25,00	26,00	25,50	25,50	0,50
Temperatura laboratório (°C)	25,90	25,80	26,90	26,20	0,61
Chuvras 24h	SIM	NÃO	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,09	0,06	0,11	0,09	0,03
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,46	0,58	0,21	0,42	0,19
Oxigênio Dissolvido	16,17	15,92	16,01	16,03	0,13
pH	7,23	7,09	7,18	7,17	0,07
Turbidez (NTU)	12,40	7,19	1,98	7,19	5,21
Cor verdadeira (Pt-Co)	21,00	10,00	8,00	13,00	7,00
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,10	1,00	5,90	2,67	2,80
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,00	0,01	0,45	0,15	0,26
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	65,50	69,00	30,00	54,83	21,58
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	836,00	796,00	142,00	591,33	389,65
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	269,77	185,96	117,39	191,04	76,32
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	31,41	26,25	13,13	23,59	9,43
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	4,70	2,30	2,80	3,27	1,27
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	2,60	0,50	0,80	1,30	1,14
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	2,10	1,80	2,00	1,97	0,15
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	364,00	568,00	1218,00	716,67	445,99
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	154,00	256,00	178,00	196,00	53,33
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	210,00	312,00	1040,00	520,67	452,64
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,80x10 <sup>1</sup>	4,90x10 <sup>2</sup>	7,90x10 <sup>2</sup>	1,91x10 <sup>2</sup>	389,18
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1,10x10 <sup>2</sup>	1,30x10 <sup>3</sup>	7,90x10 <sup>3</sup>	1,04x10 <sup>3</sup>	4196,43

Tabela E. 8: Valores médios e desvio padrão dos parâmetros analisados após os ensaios de ozonização realizados.

DADOS	Efluente Reator		E1		E2		E3		E4		E5		E6	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Temperatura ambiente (°C)	28,00	3,61	28,00	3,61	28,00	3,61	28,00	3,61	28,00	3,61	28,00	3,61	28,00	3,61
Temperatura amostra (°C)	25,33	1,15	25,67	0,29	25,60	0,53	25,60	0,53	25,17	0,29	25,33	0,58	25,50	0,50
Temperatura laboratório (°C)	-	-	26,70	0,72	25,97	1,06	25,97	1,06	26,13	0,12	25,87	0,25	26,20	0,61
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	0,24	0,16	0,36	0,42	0,21	0,23	0,07	0,02	0,12	0,05	0,09	0,03
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	-	-	0,10	0,12	0,02	0,03	0,77	0,38	0,30	0,19	0,08	0,05	0,42	0,19
OD	1,80	1,04	16,02	0,25	15,87	0,08	15,50	0,88	16,07	0,08	15,22	1,35	16,03	0,13
pH	7,08	0,22	7,06	0,09	7,63	0,08	7,28	0,23	7,21	0,11	7,08	0,04	7,17	0,07
Turbidez (NTU)	5,62	3,52	12,00	10,06	5,14	3,02	6,34	4,68	6,75	5,86	9,22	7,06	7,19	5,21
Cor verdadeira (Pt-Co)	118,67	61,44	40,00	9,17	88,67	39,63	27,00	7,00	21,00	18,73	22,33	8,08	13,00	7,00
Nitrato (NO <sub>3</sub> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	6,10	7,72	4,57	5,66	6,07	8,87	4,13	5,00	2,17	1,59	3,00	3,46	2,67	2,80
Nitrato (NO <sub>2</sub> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,74	3,00	1,04	1,79	1,69	2,93	0,79	1,35	0,11	0,19	0,41	0,71	0,15	0,26
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	58,67	21,80	56,67	25,32	50,17	15,78	50,83	18,25	50,67	18,33	55,67	22,04	54,83	21,58
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	148,33	65,77	252,33	146,95	110,00	45,03	388,00	275,41	610,00	394,15	504,67	350,52	591,33	389,65
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	205,68	90,96	192,59	78,73	205,40	92,79	204,63	91,58	197,93	78,79	193,76	78,61	191,04	76,32
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	24,69	9,39	22,19	11,12	24,84	10,22	23,91	9,69	24,53	9,66	31,11	14,80	23,59	9,43
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	3,40	1,59	6,30	5,28	3,47	0,42	3,43	0,95	4,40	4,08	4,67	1,55	3,27	1,27
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,07	0,45	1,60	1,78	1,53	0,57	0,83	0,35	1,83	1,36	1,53	1,45	1,30	1,14
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	2,33	1,54	4,70	3,57	1,93	0,71	2,60	0,60	2,57	2,73	3,13	0,91	1,97	0,15
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	596,00	88,61	862,67	463,29	828,67	625,94	378,67	154,28	570,00	192,47	450,67	166,06	716,67	445,99
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	218,00	31,43	416,67	330,59	186,67	62,68	175,33	46,92	236,67	43,47	208,00	23,58	196,00	53,33
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	378,00	76,32	446,00	170,69	642,00	568,43	203,33	199,04	333,33	227,04	242,67	186,95	520,67	452,64
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	8,20x10 <sup>3</sup>	2,43x10 <sup>4</sup>	1,50x10 <sup>3</sup>	7,19x10 <sup>3</sup>	2,09x10 <sup>4</sup>	6,46x10 <sup>4</sup>	3,83x10 <sup>2</sup>	4,40x10 <sup>2</sup>	3,06x10 <sup>2</sup>	6,63x10 <sup>2</sup>	3,53x10 <sup>2</sup>	1,02x10 <sup>3</sup>	1,91x10 <sup>2</sup>	3,89x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	7,79x10 <sup>4</sup>	4,23x10 <sup>4</sup>	2,43x10 <sup>4</sup>	3,78x10 <sup>4</sup>	4,48x10 <sup>4</sup>	6,64x10 <sup>4</sup>	2,05x10 <sup>3</sup>	3,40x10 <sup>3</sup>	1,38x10 <sup>3</sup>	3,99x10 <sup>3</sup>	1,04x10 <sup>3</sup>	6,09x10 <sup>3</sup>	1,04x10 <sup>3</sup>	4,20x10 <sup>3</sup>

**Teste Adicional**

A seguir são apresentados os resultados individuais do efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e do efluente após o ensaio de ozonização adicional realizado, bem como a sua respectiva média e desvio padrão.

Tabela E. 9: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio utilizado no teste adicional.

Efluente Reator				MÉDIA	DESVIO
Data	08/04/2014	15/04/2014	29/04/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	21,00	18,00	16,00	18,33	2,52
Temperatura amostra (°C)	24,50	19,90	19,80	21,40	2,69
Temperatura laboratório (°C)	-	-	-	-	-
Chuvas 24h	NÃO	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	-	-	-	-	-
Oxigênio Dissolvido	2,81	3,04	3,60	3,15	0,41
pH	7,72	7,06	7,34	7,37	0,33
Turbidez (NTU)	1,63	1,93	1,09	1,55	0,43
Cor verdadeira (Pt-Co)	91,00	84,00	97,00	90,67	6,51
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	4,80	56,00	27,00	29,27	25,68
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	2,14	16,80	8,72	9,22	7,34
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	39,50	42,00	38,00	39,83	2,02
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	84,00	78,50	65,00	75,83	9,78
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	284,56	140,22	233,01	219,26	73,15
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	52,97	23,31	43,66	39,98	15,17
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	2,50	2,80	1,40	2,23	0,74
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,00	0,20	0,10	0,10	0,10
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	2,50	2,60	1,30	2,13	0,72
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	630,00	476,00	366,00	490,67	132,61
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	222,00	212,00	242,00	225,33	15,28
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	408,00	264,00	124,00	265,33	142,00
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>2</sup>	2,20x10 <sup>3</sup>	2,60x10 <sup>2</sup>	4,21x10 <sup>2</sup>	1,16x10 <sup>3</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	4,90x10 <sup>3</sup>	2,30x10 <sup>4</sup>	7,00x10 <sup>3</sup>	9,24x10 <sup>3</sup>	9,90x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 10: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após o ensaio de ozonização do teste adicional utilizando uma dose aplicada de ozônio de 5,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e um tempo de contato de 15 min.

Teste adicional				MÉDIA	DESVIO
Data	08/04/2014	15/04/2014	29/04/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	21,00	18,00	16,00	18,33	2,52
Temperatura amostra (°C)	24,30	19,80	19,90	21,33	2,57
Temperatura laboratório (°C)	21,50	21,00	18,20	20,23	1,78
Chuvas 24h	NÃO	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,03	3,40	1,24	1,56	1,71
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,29	0,01	0,02	0,11	0,16
Oxigênio Dissolvido	14,40	15,05	16,72	15,39	1,20
pH	7,75	7,25	7,56	7,52	0,25
Turbidez (NTU)	1,38	1,88	1,21	1,49	0,35
Cor verdadeira (Pt-Co)	5,00	71,00	50,00	42,00	33,72
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	2,80	48,00	25,40	25,40	22,60
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,02	14,90	6,62	7,18	7,46
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	32,00	33,50	30,00	31,83	1,76
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	291,00	100,00	98,50	163,17	110,71
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	268,06	140,22	228,88	212,39	65,50
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	54,83	26,25	43,12	41,40	14,37
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	1,70	2,50	1,30	1,83	0,61
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,00	0,30	0,00	0,10	0,17
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1,70	2,20	1,30	1,73	0,45
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	314,00	444,00	332,00	363,33	70,44
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	68,00	208,00	236,00	170,67	90,01
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	246,00	236,00	96,00	192,67	83,86
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	6,80x10 <sup>1</sup>	2,30x10 <sup>3</sup>	2,20x10 <sup>2</sup>	3,25x10 <sup>2</sup>	1247,085135
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1,10x10 <sup>3</sup>	7,90x10 <sup>3</sup>	2,30x10 <sup>3</sup>	2,71x10 <sup>3</sup>	3629,50869

### Ensaio de peroxização

A seguir são apresentados os resultados individuais do efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio e do efluente após cada ensaio de peroxização realizado, bem como a sua respectiva média e desvio padrão.

Tabela E. 11: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio utilizado nos ensaios de peroxização com um tempo de contato de 7 min.

Efluente Reator				MÉDIA	DESVIO
Data	04/02/2014	11/02/2014	18/02/2014		
Temperatura ambiente (°C)	28,60	26,50	21,00	25,37	3,92
Temperatura amostra (°C)	28,00	25,00	23,50	25,50	2,29
Temperatura laboratório (°C)	-	-	-	-	-
Chuvas 24h	NÃO	NÃO	SIM	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	-	-	-	-	-
OD	1,31	2,20	2,09	1,87	0,49
pH	7,08	7,05	7,18	7,10	0,07
Turbidez (NTU)	5,52	1,80	1,27	2,86	2,32
Cor verdadeira (Pt-Co)	94,00	78,00	49,00	73,67	22,81
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,30	3,90	1,50	1,90	1,83
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,06	0,91	4,65	1,87	2,44
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	34,00	29,00	27,00	30,00	3,61
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	43,00	60,00	51,00	51,33	8,50
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	139,12	139,12	126,08	134,78	7,53
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	15,00	13,13	15,94	14,69	1,43
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	4,10	5,20	4,10	4,47	0,64
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	3,00	1,10	1,30	1,80	1,04
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1,10	4,10	2,80	2,67	1,50
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	584,00	538,00	576,00	566,00	24,58
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	208,00	232,00	172,00	204,00	30,20
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	376,00	306,00	404,00	362,00	50,48
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>5</sup>	1,10x10 <sup>3</sup>	1,10x10 <sup>3</sup>	5,40x10 <sup>3</sup>	7,44x10 <sup>4</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	2,30x10 <sup>5</sup>	3,30x10 <sup>4</sup>	3,30x10 <sup>4</sup>	6,30x10 <sup>4</sup>	1,14x10 <sup>5</sup>

Tabela E. 12: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose aplicada de 5,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 1,00 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 7 min.

EPI	EPI			MÉDIA	DESVIO
	Data	04/02/2014	11/02/2014		
				-	-
Temperatura ambiente (°C)	28,60	26,50	21,00	25,37	3,92
Temperatura amostra (°C)	26,50	26,50	23,50	25,50	1,73
Temperatura laboratório (°C)	28,00	27,10	24,00	26,37	2,10
Chuvas 24h	NÃO	NÃO	SIM	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,06	0,04	2,36	0,82	1,33
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	1,20	1,00	0,10	0,77	0,59
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,41	0,14	0,02	0,19	0,20
OD	15,78	15,75	16,94	16,16	0,68
pH	7,15	7,07	7,28	7,17	0,11
Turbidez (NTU)	1,09	1,42	1,81	1,44	0,36
Cor verdadeira (Pt-Co)	8,00	17,00	36,00	20,33	14,29
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,71	1,70	17,20	6,54	9,25
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	3,66	1,22	2,11
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	24,00	30,00	31,50	28,50	3,97
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	198,50	247,00	79,00	174,83	86,46
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	139,12	154,34	126,08	139,85	14,14
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	14,06	17,81	15,94	15,94	1,88
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	3,00	2,60	3,00	2,87	0,23
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,90	1,70	0,10	0,90	0,80
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	2,10	0,90	2,90	1,97	1,01
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	360,00	204,00	446,00	336,67	122,68
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	250,00	58,00	128,00	145,33	97,17
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	110,00	146,00	318,00	191,33	111,16
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	3,40x10 <sup>2</sup>	3,30x10 <sup>2</sup>	3,30x10 <sup>2</sup>	3,33x10 <sup>2</sup>	5,77x10 <sup>0</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	3,30x10 <sup>2</sup>	7,90x10 <sup>3</sup>	7,90x10 <sup>3</sup>	2,74x10 <sup>3</sup>	4,37x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 13: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 5,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 3,00 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 7 min.

EP2				MÉDIA	DESVIO
Data	04/02/2014	11/02/2014	18/02/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	28,60	26,50	21,00	25,37	3,92
Temperatura amostra (°C)	27,00	26,00	24,00	25,67	1,53
Temperatura laboratório (°C)	27,80	27,20	24,00	26,33	2,04
Chuvas 24h	NÃO	NÃO	SIM	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,05	0,05	0,50	0,20	0,26
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	2,20	2,00	2,50	2,23	0,25
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,40	0,20	0,05	0,22	0,18
OD	15,58	15,80	16,58	15,99	0,53
pH	7,20	7,06	7,12	7,13	0,07
Turbidez (NTU)	1,87	1,00	1,14	1,34	0,47
Cor verdadeira (Pt-Co)	14,00	14,00	19,00	15,67	2,89
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,80	3,10	11,00	4,97	5,35
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,00	0,01	2,34	0,79	1,35
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	23,00	23,00	25,50	23,83	1,44
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	187,00	222,00	105,00	171,33	60,05
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	143,47	126,08	121,73	130,43	11,50
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	13,13	12,19	16,41	13,91	2,22
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	3,80	1,40	2,10	2,43	1,23
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,30	0,20	0,20	0,57	0,64
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	2,50	1,20	1,90	1,87	0,65
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	702,00	698,00	482,00	627,33	125,88
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	274,00	134,00	144,00	184,00	78,10
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	428,00	564,00	338,00	443,33	113,78
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,50x10 <sup>2</sup>	1,70x10 <sup>2</sup>	1,30x10 <sup>2</sup>	1,49x10 <sup>2</sup>	2,00x10 <sup>1</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	2,40x10 <sup>3</sup>	2,70x10 <sup>2</sup>	3,30x10 <sup>3</sup>	1,29x10 <sup>3</sup>	1,56x10 <sup>3</sup>



Tabela E. 14: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 8,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 1,60 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 7 min.

EP3				MÉDIA	DESVIO
Data	04/02/2014	11/02/2014	18/02/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	28,60	26,50	21,00	25,37	3,92
Temperatura amostra (°C)	26,00	26,00	24,00	25,33	1,15
Temperatura laboratório (°C)	27,80	28,40	24,20	26,80	2,27
Chuvas 24h	NÃO	NÃO	SIM	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,04	0,03	0,76	0,28	0,42
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,00	0,00	1,40	0,47	0,81
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	1,78	1,43	0,56	1,25	0,63
OD	15,89	15,03	16,85	15,92	0,91
pH	7,31	7,20	7,30	7,27	0,06
Turbidez (NTU)	1,09	0,89	1,18	1,05	0,15
Cor verdadeira (Pt-Co)	7,00	25,00	25,00	19,00	10,39
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,70	2,50	13,40	5,53	6,87
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,01	0,01	1,80	0,60	1,04
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	25,00	22,00	23,50	23,50	1,50
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	188,00	291,00	68,00	182,33	111,61
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	134,78	126,08	121,73	127,53	6,64
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	11,72	12,66	15,47	13,28	1,95
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	2,90	3,30	2,60	2,93	0,35
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,00	1,80	0,40	1,07	0,70
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1,90	1,50	2,20	1,87	0,35
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	476,00	272,00	448,00	398,67	110,59
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	236,00	158,00	170,00	188,00	42,00
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	240,00	114,00	278,00	210,67	85,84
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,30x10 <sup>2</sup>	4,80x10 <sup>2</sup>	1,10x10 <sup>2</sup>	1,90x10 <sup>2</sup>	2,08x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	3,30x10 <sup>2</sup>	1,10x10 <sup>3</sup>	1,30x10 <sup>4</sup>	1,68x10 <sup>3</sup>	7,10x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 15: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 8,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 4,80 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 7 min.

EP4				MÉDIA	DESVIO
Data	04/02/2014	11/02/2014	18/02/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	28,60	26,50	21,00	25,37	3,92
Temperatura amostra (°C)	26,00	26,00	24,00	25,33	1,15
Temperatura laboratório (°C)	27,90	28,10	24,40	26,80	2,08
Chuvas 24h	NÃO	NÃO	SIM	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,05	0,05	0,57	0,22	0,30
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	3,00	2,70	3,60	3,10	0,46
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	1,74	1,45	0,47	1,22	0,67
OD	15,80	15,80	16,78	16,13	0,57
pH	7,22	7,14	7,36	7,24	0,11
Turbidez (NTU)	1,58	1,01	1,16	1,25	0,30
Cor verdadeira (Pt-Co)	16,00	30,00	24,00	23,33	7,02
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,90	1,70	10,80	4,47	5,50
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,00	0,01	1,96	0,66	1,13
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	25,50	25,50	16,50	22,50	5,20
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	176,50	331,00	115,00	207,50	111,29
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	139,12	134,78	121,73	131,88	9,05
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	14,06	13,13	15,00	14,06	0,94
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	3,60	1,20	2,70	2,50	1,21
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,70	1,10	0,40	0,73	0,35
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	2,90	0,10	2,30	1,77	1,47
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	318,00	390,00	376,00	361,33	38,18
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	196,00	202,00	154,00	184,00	26,15
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	122,00	188,00	222,00	177,33	50,85
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	8,10x10 <sup>2</sup>	1,40x10 <sup>2</sup>	4,90x10 <sup>2</sup>	3,82x10 <sup>2</sup>	3,35x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	4,90x10 <sup>4</sup>	1,70x10 <sup>2</sup>	7,90x10 <sup>3</sup>	4,04x10 <sup>3</sup>	2,62x10 <sup>4</sup>

Tabela E. 16: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 2,00 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 7 min.

EP5				MÉDIA	DESVIO
Data	04/02/2014	11/02/2014	18/02/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	28,60	26,50	21,00	25,37	3,92
Temperatura amostra (°C)	27,00	26,00	23,50	25,50	1,80
Temperatura laboratório (°C)	28,10	25,50	24,80	26,13	1,74
Chuvas 24h	NÃO	NÃO	SIM	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,04	0,04	0,21	0,10	0,10
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	1,60	1,30	1,70	1,53	0,21
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,60	0,38	0,16	0,38	0,22
OD	15,69	15,78	16,98	16,15	0,72
pH	6,99	7,01	7,04	7,01	0,03
Turbidez (NTU)	1,06	0,90	1,07	1,01	0,09
Cor verdadeira (Pt-Co)	0,00	12,00	13,00	8,33	7,23
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,20	1,70	8,00	3,63	3,79
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	0,72	0,24	0,41
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	23,00	28,50	22,50	24,67	3,33
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	237,50	387,00	121,00	248,50	133,34
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	139,12	139,12	121,73	133,33	10,04
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	12,66	15,47	15,94	14,69	1,77
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	2,80	2,00	2,50	2,43	0,40
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,00	1,60	0,40	1,00	0,60
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1,80	0,40	2,10	1,43	0,91
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	456,00	704,00	362,00	507,33	176,68
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	206,00	252,00	118,00	192,00	68,09
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	250,00	452,00	244,00	315,33	118,39
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,20x10 <sup>2</sup>	2,70x10 <sup>2</sup>	7,00x10 <sup>2</sup>	2,83x10 <sup>2</sup>	3,01x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1,40x10 <sup>2</sup>	2,70x10 <sup>2</sup>	3,30x10 <sup>3</sup>	5,00x10 <sup>2</sup>	1,79x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 17: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 6,00 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 7 min.

EP6				MÉDIA	DESVIO
Data	04/02/2014	11/02/2014	18/02/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	28,60	26,50	21,00	25,37	3,92
Temperatura amostra (°C)	26,50	26,50	23,00	25,33	2,02
Temperatura laboratório (°C)	28,10	27,90	24,30	26,77	2,14
Chuvas 24h	NÃO	NÃO	SIM	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,05	0,06	0,19	0,10	0,08
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	3,60	3,70	4,70	4,00	0,61
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,52	0,31	0,12	0,32	0,20
OD	15,72	15,15	17,14	16,00	1,02
pH	6,98	6,98	7,00	6,99	0,01
Turbidez (NTU)	1,18	1,18	1,21	1,19	0,02
Cor verdadeira (Pt-Co)	4,00	9,00	2,00	5,00	3,61
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,20	1,90	9,20	4,10	4,43
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,00	0,01	0,84	0,28	0,48
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	25,50	32,50	25,50	27,83	4,04
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	223,50	383,00	138,00	248,17	124,35
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	134,78	147,82	121,73	134,78	13,04
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	12,66	15,47	16,88	15,00	2,15
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	3,20	1,90	2,70	2,60	0,66
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,40	1,40	0,60	1,13	0,46
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1,80	0,50	2,10	1,47	0,85
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	704,00	498,00	468,00	556,67	128,47
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	226,00	192,00	152,00	190,00	37,04
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	478,00	306,00	316,00	366,67	96,55
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	4,00x10 <sup>1</sup>	2,00x10 <sup>1</sup>	7,90x10 <sup>2</sup>	8,58x10 <sup>1</sup>	4,39x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	6,10x10 <sup>1</sup>	6,80x10 <sup>1</sup>	2,30x10 <sup>3</sup>	2,12x10 <sup>2</sup>	1,29x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 18: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente proveniente do reator compartimentado anaeróbio/aeróbio utilizado nos ensaios de peroxidação com um tempo de contato de 15 min.

Efluente Reator				MÉDIA	DESVIO
Data	11/03/2014	18/03/2014	25/03/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	29,00	29,00	25,00	27,67	2,83
Temperatura amostra (°C)	26,50	28,50	24,00	26,33	2,25
Temperatura laboratório (°C)	-	-	-	-	-
Chuvas 24h	SIM	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	-	-	-	-	-
OD	2,63	2,77	3,07	2,82	0,22
pH	7,11	7,32	7,26	7,23	0,11
Turbidez (NTU)	1,19	1,78	2,84	1,94	0,84
Cor verdadeira (Pt-Co)	85,00	86,00	118,00	96,33	18,77
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	11,10	3,60	0,60	5,10	5,41
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	4,34	1,16	0,12	1,87	2,20
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	32,00	52,50	33,00	39,17	11,56
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	52,00	73,50	114,50	80,00	31,75
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	199,99	230,42	272,18	234,20	36,25
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	31,88	38,44	48,75	39,69	8,51
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	2,00	2,60	1,30	1,97	0,65
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,20	2,40	1,30	1,63	0,67
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	0,80	0,20	0,00	0,33	0,42
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	492,00	346,00	284,00	374,00	106,79
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	270,00	232,00	236,00	246,00	20,88
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	222,00	114,00	48,00	128,00	87,84
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,40x10 <sup>3</sup>	1,40x10 <sup>4</sup>	1,70x10 <sup>3</sup>	3,22x10 <sup>3</sup>	7,19x10 <sup>3</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	7,90x10 <sup>3</sup>	1,70x10 <sup>5</sup>	4,90x10 <sup>4</sup>	4,04x10 <sup>4</sup>	8,43x10 <sup>4</sup>

Tabela E. 19: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 5,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 1,00 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 15 min.

EP7				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	29,00	29,00	25,00	27,67	2,83
Temperatura amostra (°C)	26,50	28,50	24,00	26,33	2,25
Temperatura laboratório (°C)	27,30	27,10	22,70	25,70	2,60
Chuvas 24h	SIM	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,63	0,04	0,03	0,23	0,34
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,01	0,28	0,34	0,21	0,18
OD	15,07	15,58	14,08	14,91	0,76
pH	7,52	7,39	7,40	7,44	0,07
Turbidez (NTU)	1,30	0,16	1,04	0,83	0,60
Cor verdadeira (Pt-Co)	34,00	30,00	23,00	29,00	5,57
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	10,60	1,10	0,60	4,10	5,63
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	2,64	0,00	0,01	0,88	1,52
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	33,00	43,00	23,50	33,17	9,75
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	90,50	349,50	454,00	298,00	187,14
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	195,64	221,73	266,00	227,79	35,57
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	28,13	37,03	48,75	37,97	10,34
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	0,70	0,80	1,00	0,83	0,15
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,30	0,00	0,20	0,17	0,15
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	0,40	0,80	0,80	0,67	0,23
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	502,00	448,00	298,00	416,00	105,70
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	242,00	-134,00	254,00	120,67	220,63
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	260,00	582,00	44,00	295,33	270,73
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,80x10 <sup>1</sup>	4,90x10 <sup>3</sup>	1,30x10 <sup>2</sup>	2,25x10 <sup>2</sup>	2,79x10 <sup>3</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	4,90x10 <sup>2</sup>	4,90x10 <sup>3</sup>	7,80x10 <sup>1</sup>	5,72x10 <sup>2</sup>	2,67x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 20: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 5,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 3,00 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 15 min.

EP8				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	29,00	29,00	25,00	27,67	2,83
Temperatura amostra (°C)	26,70	28,00	24,00	26,23	2,04
Temperatura laboratório (°C)	26,60	27,80	23,00	25,80	2,50
Chuvas 24h	SIM	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,29	0,04	0,05	0,13	0,14
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	2,60	2,00	1,40	2,00	0,60
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,10	0,28	0,48	0,28	0,19
OD	14,07	15,66	16,82	15,52	1,38
pH	7,53	7,38	7,41	7,44	0,08
Turbidez (NTU)	1,23	0,09	1,69	1,00	0,82
Cor verdadeira (Pt-Co)	21,00	10,00	18,00	16,33	5,69
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	5,20	2,30	0,60	2,70	2,33
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,82	0,01	0,01	0,28	0,47
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	28,50	41,50	22,00	30,67	9,93
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	122,50	332,50	453,00	302,67	167,26
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	199,99	221,73	263,94	228,55	32,51
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	27,19	35,63	48,75	37,19	10,87
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	1,30	0,00	0,50	0,60	0,66
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,50	0,00	0,40	0,30	0,26
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	0,80	0,00	0,10	0,30	0,44
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	516,00	386,00	652,00	518,00	133,01
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	206,00	224,00	614,00	348,00	230,54
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	310,00	162,00	38,00	170,00	136,18
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,20x10 <sup>2</sup>	4,00x10 <sup>2</sup>	1,10x10 <sup>2</sup>	1,74x10 <sup>2</sup>	1,65x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	4,90x10 <sup>3</sup>	1,40x10 <sup>3</sup>	1,70x10 <sup>2</sup>	1,05x10 <sup>3</sup>	2,45x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 21: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 8,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 1,60 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 15 min.

EP9				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	29,00	29,00	25,00	27,67	2,83
Temperatura amostra (°C)	27,90	27,80	24,00	26,57	2,22
Temperatura laboratório (°C)	27,30	27,60	23,10	26,00	2,52
Chuvas 24h	SIM	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,09	0,04	0,03	0,05	0,03
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	1,50	0,00	0,00	0,50	0,87
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,18	0,31	0,61	0,37	0,22
OD	15,98	15,78	16,98	16,25	0,64
pH	7,49	7,40	7,43	7,44	0,05
Turbidez (NTU)	1,85	0,07	1,03	0,98	0,89
Cor verdadeira (Pt-Co)	3,00	11,00	19,00	11,00	8,00
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	2,60	2,30	0,80	1,90	0,96
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,05	0,01	0,01	0,02	0,03
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	28,00	36,00	24,50	29,50	5,89
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	161,50	311,50	473,00	315,33	155,79
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	213,03	213,03	257,75	227,94	25,82
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	30,00	34,22	46,41	36,88	8,52
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	1,60	1,00	1,10	1,23	0,32
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,10	0,00	0,50	0,20	0,26
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1,50	1,00	0,60	1,03	0,45
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	476,00	544,00	286,00	435,33	133,72
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	216,00	166,00	232,00	204,67	34,43
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	260,00	378,00	54,00	230,67	163,98
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	9,10x10 <sup>1</sup>	4,70x10 <sup>2</sup>	4,60x10 <sup>2</sup>	2,70x10 <sup>2</sup>	2,16x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	4,60x10 <sup>2</sup>	2,30x10 <sup>5</sup>	4,60x10 <sup>2</sup>	3,65x10 <sup>3</sup>	1,33x10 <sup>5</sup>



Tabela E. 22: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 8,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 4,80 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 15 min.

EP10				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	29,00	29,00	25,00	27,67	2,83
Temperatura amostra (°C)	26,50	28,00	23,50	26,00	2,29
Temperatura laboratório (°C)	26,60	27,50	23,40	25,83	2,15
Chuvas 24h	SIM	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,11	0,05	0,05	0,07	0,03
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	4,20	3,10	2,20	3,17	1,00
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,17	0,42	0,61	0,40	0,22
OD	15,80	15,69	17,01	16,17	0,73
pH	7,50	7,37	7,40	7,42	0,07
Turbidez (NTU)	1,75	0,09	1,80	1,21	0,97
Cor verdadeira (Pt-Co)	22,00	8,00	24,00	18,00	8,72
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	3,20	1,70	1,00	1,97	1,12
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,08	0,01	0,01	0,03	0,04
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	26,00	40,00	33,00	33,00	7,00
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	190,50	363,00	477,50	343,67	144,47
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	208,68	221,73	263,94	231,45	28,88
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	32,34	35,16	50,16	39,22	9,58
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	1,20	1,00	1,60	1,27	0,31
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,70	0,00	1,20	0,63	0,60
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	0,50	1,00	0,40	0,63	0,32
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	552,00	376,00	256,00	394,67	148,88
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	196,00	188,00	230,00	204,67	22,30
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	356,00	188,00	26,00	190,00	165,01
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	1,50x10 <sup>2</sup>	4,10x10 <sup>2</sup>	4,50x10 <sup>1</sup>	1,40x10 <sup>2</sup>	1,88x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	7,90x10 <sup>3</sup>	7,00x10 <sup>3</sup>	4,50x10 <sup>1</sup>	1,36x10 <sup>3</sup>	4,30x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 23: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 2,00 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 15 min.

EP11				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	29,00	29,00	25,00	27,67	2,83
Temperatura amostra (°C)	26,50	27,80	23,50	25,93	2,21
Temperatura laboratório (°C)	26,40	27,40	23,90	25,90	1,80
Chuvas 24h	SIM	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,07	0,04	0,03	0,05	0,02
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	1,90	0,00	0,00	0,63	1,10
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,22	0,57	0,65	0,48	0,23
OD	16,19	15,75	17,10	16,35	0,69
pH	7,48	7,41	7,44	7,44	0,04
Turbidez (NTU)	1,15	0,08	1,32	0,85	0,67
Cor verdadeira (Pt-Co)	1,00	14,00	11,00	8,67	6,81
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	2,60	1,80	1,20	1,87	0,70
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,08	0,01	0,01	0,03	0,04
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	26,00	29,00	29,00	28,00	1,73
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	167,50	329,00	504,50	333,67	168,55
Alcalinidade (mg CaCo <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	204,34	210,86	263,94	226,38	32,69
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	32,81	34,22	49,69	38,91	9,36
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	0,70	0,50	2,40	1,20	1,04
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,00	0,00	2,00	0,67	1,15
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	0,70	0,50	0,40	0,53	0,15
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	652,00	628,00	258,00	512,67	220,87
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	242,00	88,00	232,00	187,33	86,17
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	410,00	540,00	26,00	325,33	267,26
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	6,80x10 <sup>1</sup>	4,70x10 <sup>2</sup>	4,90x10 <sup>2</sup>	2,50x10 <sup>2</sup>	2,38x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1,10x10 <sup>2</sup>	1,30x10 <sup>4</sup>	1,30x10 <sup>2</sup>	5,71x10 <sup>2</sup>	7,44x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 24: Resultados individuais, médias e desvios padrão para o efluente após os ensaios de peroxidação utilizando uma dose de 10,00 mg O<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de ozônio, 6,00 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio e uma tempo de contato de 15 min.

EPI2				MÉDIA	DESVIO
Data	14/01/2014	21/01/2014	28/01/2014	-	-
Temperatura ambiente (°C)	29,00	29,00	25,00	27,67	2,83
Temperatura amostra (°C)	26,00	27,20	23,20	25,47	2,05
Temperatura laboratório (°C)	25,50	27,40	23,10	25,33	2,15
Chuvas 24h	SIM	SIM	NÃO	-	-
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	0,08	0,05	0,05	0,06	0,02
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	5,40	4,21	3,40	4,34	1,01
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	0,19	0,57	0,62	0,46	0,23
OD	15,51	15,83	17,07	16,14	0,82
pH	7,44	7,42	7,44	7,43	0,01
Turbidez (NTU)	1,16	0,08	1,47	0,90	0,73
Cor verdadeira (Pt-Co)	8,00	3,00	27,00	12,67	12,66
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	3,80	1,40	1,10	2,10	1,48
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	0,20	0,01	0,00	0,07	0,11
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	28,00	40,50	27,50	32,00	7,37
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	191,00	371,50	483,00	348,50	147,35
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	204,34	215,21	268,06	229,20	34,09
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	32,35	30,94	48,75	37,35	9,90
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	1,20	1,30	2,20	1,57	0,55
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	0,00	0,00	1,30	0,43	0,75
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1,20	1,30	0,90	1,13	0,21
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	550,00	824,00	284,00	552,67	270,01
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	198,00	222,00	242,00	220,67	22,03
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	352,00	602,00	42,00	332,00	280,54
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	6,80x10 <sup>1</sup>	9,30x10 <sup>1</sup>	1,30x10 <sup>2</sup>	9,37x10 <sup>1</sup>	3,12x10 <sup>1</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	4,90x10 <sup>2</sup>	7,90x10 <sup>2</sup>	1,30x10 <sup>2</sup>	3,69x10 <sup>2</sup>	3,30x10 <sup>2</sup>

Tabela E. 25: Valores médios e desvio padrão dos parâmetros analisados após os ensaios de peroxidação realizados com tempo de contato de 7 min.

DADOS	Efluente Reator		EPI		EP2		EP3		EP4		EP5		EP6	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Temperatura ambiente (°C)	25,37	3,92	25,37	3,92	25,37	3,92	25,37	3,92	25,37	3,92	25,37	3,92	25,37	3,92
Temperatura amostra (°C)	25,50	2,29	25,50	1,73	25,67	1,53	25,33	1,15	25,33	1,15	25,50	1,80	25,33	2,02
Temperatura laboratório (°C)	-	-	26,37	2,10	26,33	2,04	26,80	2,27	26,80	2,08	26,13	1,74	26,77	2,14
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	0,82	1,33	0,20	0,26	0,28	0,42	0,22	0,30	0,10	0,10	0,10	0,08
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	0,77	0,59	2,23	0,25	0,47	0,81	3,10	0,46	1,53	0,21	4,00	0,61
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	-	-	0,19	0,20	0,22	0,18	1,25	0,63	1,22	0,67	0,38	0,22	0,32	0,20
OD	1,87	0,49	16,16	0,68	15,99	0,53	15,92	0,91	16,13	0,57	16,15	0,72	16,00	1,02
pH	7,10	0,07	7,17	0,11	7,13	0,07	7,27	0,06	7,24	0,11	7,01	0,03	6,99	0,01
Turbidez (NTU)	2,86	2,32	1,44	0,36	1,34	0,47	1,05	0,15	1,25	0,30	1,01	0,09	1,19	0,02
Cor verdadeira (Pt-Co)	73,67	22,81	20,33	14,29	15,67	2,89	19,00	10,39	23,33	7,02	8,33	7,23	5,00	3,61
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,90	1,83	6,54	9,25	4,97	5,35	5,53	6,87	4,47	5,50	3,63	3,79	4,10	4,43
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,87	2,44	1,22	2,11	0,79	1,35	0,60	1,04	0,66	1,13	0,24	0,41	0,28	0,48
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	30,00	3,61	28,50	3,97	23,83	1,44	23,50	1,50	22,50	5,20	24,67	3,33	27,83	4,04
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	51,33	8,50	174,83	86,46	171,33	60,05	182,33	111,61	207,50	111,29	248,50	133,34	248,17	124,35
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	134,78	7,53	139,85	14,14	130,43	11,50	127,53	6,64	131,88	9,05	133,33	10,04	134,78	13,04
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	14,69	1,43	15,94	1,88	13,91	2,22	13,28	1,95	14,06	0,94	14,69	1,77	15,00	2,15
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	4,47	0,64	2,87	0,23	2,43	1,23	2,93	0,35	2,50	1,21	2,43	0,40	2,60	0,66
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,80	1,04	0,90	0,80	0,57	0,64	1,07	0,70	0,73	0,35	1,00	0,60	1,13	0,46
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	2,67	1,50	1,97	1,01	1,87	0,65	1,87	0,35	1,77	1,47	1,43	0,91	1,47	0,85
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	566,00	24,58	336,67	122,68	627,33	125,88	398,67	110,59	361,33	38,18	507,33	176,68	556,67	128,47
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	204,00	30,20	145,33	97,17	184,00	78,10	188,00	42,00	184,00	26,15	192,00	68,09	190,00	37,04
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	362,00	50,48	191,33	111,16	443,33	113,78	210,67	85,84	177,33	50,85	315,33	118,39	366,67	96,55
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	5,40x10 <sup>3</sup>	7,44x10 <sup>4</sup>	3,33x10 <sup>2</sup>	5,77x10 <sup>0</sup>	1,49x10 <sup>2</sup>	2,00x10 <sup>1</sup>	1,90x10 <sup>2</sup>	2,08x10 <sup>2</sup>	3,82x10 <sup>2</sup>	3,35x10 <sup>2</sup>	2,83x10 <sup>2</sup>	3,01x10 <sup>2</sup>	8,58x10 <sup>1</sup>	4,39x10 <sup>2</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	6,30x10 <sup>4</sup>	1,14x10 <sup>5</sup>	2,74x10 <sup>3</sup>	4,37x10 <sup>3</sup>	1,29x10 <sup>3</sup>	1,56x10 <sup>3</sup>	1,68x10 <sup>3</sup>	7,10x10 <sup>3</sup>	4,04x10 <sup>3</sup>	2,62x10 <sup>4</sup>	5,00x10 <sup>2</sup>	1,79x10 <sup>3</sup>	2,12x10 <sup>2</sup>	1,29x10 <sup>3</sup>

Tabela E. 26: Valores médios e desvio padrão dos parâmetros analisados após os ensaios de peroxidação realizados com tempo de contato de 15 min.

DADOS	Efluente Reator		EP7		EP8		EP9		EP10		EP11		EP12	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
	Temperatura ambiente (°C)	27,67	2,31	27,00	2,83	27,00	2,83	27,00	2,83	27,00	2,83	27,00	2,83	27,00
Temperatura amostra (°C)	26,33	2,25	26,33	2,25	26,23	2,04	26,57	2,22	26,00	2,29	25,93	2,21	25,47	2,05
Temperatura laboratório (°C)	-	-	25,70	2,60	25,80	2,50	26,00	2,52	25,83	2,15	25,90	1,80	25,33	2,15
O <sub>3</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	0,23	0,34	0,13	0,14	0,05	0,03	0,07	0,03	0,05	0,02	0,06	0,02
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> residual dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	0,00	0,00	2,00	0,60	0,50	0,87	3,17	1,00	0,63	1,10	4,34	1,01
O <sub>3</sub> residual gasoso (mg L <sup>-1</sup> ) <i>Off-gas</i>	-	-	0,21	0,18	0,28	0,19	0,37	0,22	0,40	0,22	0,48	0,23	0,46	0,23
OD	2,82	0,22	14,91	0,76	15,52	1,38	16,25	0,64	16,17	0,73	16,35	0,69	16,14	0,82
pH	7,23	0,11	7,44	0,07	7,44	0,08	7,44	0,05	7,42	0,07	7,44	0,04	7,43	0,01
Turbidez (NTU)	1,94	0,84	0,83	0,60	1,00	0,82	0,98	0,89	1,21	0,97	0,85	0,67	0,90	0,73
Cor verdadeira (Pt-Co)	96,33	18,77	29,00	5,57	16,33	5,69	11,00	8,00	18,00	8,72	8,67	6,81	12,67	12,66
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	5,10	5,41	4,10	5,63	2,70	2,33	1,90	0,96	1,97	1,12	1,87	0,70	2,10	1,48
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (mg N L <sup>-1</sup> )	1,87	2,20	0,88	1,52	0,28	0,47	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,07	0,11
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	39,17	11,56	33,17	9,75	30,67	9,93	29,50	5,89	33,00	7,00	28,00	1,73	32,00	7,37
Formaldeído (µg L <sup>-1</sup> )	80,00	31,75	298,00	187,14	302,67	167,26	315,33	155,79	343,67	144,47	333,67	168,55	348,50	147,35
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	234,20	36,25	227,79	35,57	228,55	32,51	227,94	25,82	231,45	28,88	226,38	32,69	229,20	34,09
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg N L <sup>-1</sup> )	39,69	8,51	37,97	10,34	37,19	10,87	36,88	8,52	39,22	9,58	38,91	9,36	37,35	9,90
Sólidos em Suspensão Totais (mg L <sup>-1</sup> )	1,97	0,65	0,83	0,15	0,60	0,66	1,23	0,32	1,27	0,31	1,20	1,04	1,57	0,55
Sólidos em Suspensão Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1,63	0,67	0,17	0,15	0,30	0,26	0,20	0,26	0,63	0,60	0,67	1,15	0,43	0,75
Sólidos em Suspensão Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	0,33	0,42	0,67	0,23	0,30	0,44	1,03	0,45	0,63	0,32	0,53	0,15	1,13	0,21
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	374,00	106,79	416,00	105,70	518,00	133,01	435,33	133,72	394,67	148,88	512,67	220,87	552,67	270,01
Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	246,00	20,88	120,67	220,63	348,00	230,54	204,67	34,43	204,67	22,30	187,33	86,17	220,67	22,03
Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	128,00	87,84	295,33	270,73	170,00	136,18	230,67	163,98	190,00	165,01	325,33	267,26	332,00	280,54
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	3,22x10 <sup>3</sup>	7,19x10 <sup>3</sup>	2,25x10 <sup>2</sup>	2,79x10 <sup>3</sup>	1,74x10 <sup>2</sup>	1,65x10 <sup>2</sup>	2,70x10 <sup>2</sup>	2,16x10 <sup>2</sup>	1,40x10 <sup>2</sup>	1,88x10 <sup>2</sup>	2,50x10 <sup>2</sup>	2,38x10 <sup>2</sup>	9,37x10 <sup>1</sup>	3,12x10 <sup>1</sup>
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	4,04x10 <sup>4</sup>	8,43x10 <sup>4</sup>	5,72x10 <sup>2</sup>	2,67x10 <sup>3</sup>	1,05x10 <sup>3</sup>	2,45x10 <sup>3</sup>	3,65x10 <sup>3</sup>	1,33x10 <sup>5</sup>	1,36x10 <sup>3</sup>	4,30x10 <sup>3</sup>	5,71x10 <sup>2</sup>	7,44x10 <sup>3</sup>	3,69x10 <sup>2</sup>	3,30x10 <sup>2</sup>