



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**APLICAÇÃO DE OZÔNIO NO POLIMENTO FINAL DE EFLUENTES
SANITÁRIOS VISANDO REUSO**

Vinícius Preto da Silva

Lajeado, novembro de 2015

Vinícius Pretto da Silva

APLICAÇÃO DE OZÔNIO NO POLIMENTO FINAL DE EFLUENTES SANITÁRIOS VISANDO REUSO

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II do Curso de Engenharia Ambiental, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Me. Gustavo Reisdörfer

Lajeado, novembro de 2015

Vinícius Pretto da Silva

APLICAÇÃO DE OZÔNIO NO POLIMENTO FINAL DE EFLUENTES SANITÁRIOS VISANDO REUSO

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Ambiental, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Prof. Me. Gustavo Reisdörfer – Orientador
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Dra. Lucelia Hoehne
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Dra. Manuela Gomes Cardoso
Centro Universitário UNIVATES

Lajeado, novembro de 2015

RESUMO

A técnica de ozonização tem se mostrado eficiente na remoção de grupos funcionais orgânicos responsáveis por atribuírem características como cor, gosto e odor em águas residuais. Deste modo a remoção destas características de forma eficiente pode ampliar as chances de reuso dos efluentes para diferentes finalidades. Para a realização do experimento foi desenvolvido um protótipo em escala piloto a fim de apresentar uma alternativa para o tratamento final de efluente sanitário visando seu reuso, abordando a aplicação do ozônio e ação deste sobre o efluente, verificando seu efeito oxidativo, através da avaliação dos parâmetros cor, turbidez, DBO5 e coliformes termotolerantes. Os resultados obtidos no monitoramento do sistema pré e pós ozonização demonstraram eficiência de até 74,25% na remoção de cor, 41,48% na remoção de turbidez, 75,00% na redução da DBO5 e 99,99% na remoção de coliformes termotolerantes.

Palavras-chave: Ozônio, Oxidação, Tratamento de Efluentes.

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|----------|---|
| CASAN: | Companhia Catarinense de Águas e Saneamento |
| CETESB: | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| COMPESA: | Companhia Pernambucana de Saneamento |
| CONAMA: | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CONSEMA: | Conselho Estadual do Meio Ambiente |
| COPASA: | Companhia de Saneamento de Minas Gerais |
| CT: | Carbono Total |
| DBO5: | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DQO: | Demanda Química de Oxigênio |
| ETE: | Estação de Tratamento de Efluentes |
| FEPAM: | Fundação Estadual de Proteção Ambiental |
| IBGE: | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INPA: | Instituto Nacional de Preservação Ambiental |
| NBR: | Norma Brasileira |
| NT: | Nitrogênio Total |
| NTU: | Nephelometric Turbidity Unit |
| ONU: | Organização das Nações Unidas |
| pH: | Potencial Hidrogeniônico |
| POAs: | Processos Oxidativos Avançados |
| PROSAB: | Programa de Pesquisa em Saneamento Básico |
| Pt-Co: | Platina-Cobalto |
| PVC: | Polyvinyl Chloride |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Processos de obtenção de radicais hidroxila por POAs..... | 24 |
| Figura 2 – Geração de ozônio a partir do ar..... | 28 |
| Figura 3 – Sistema de ozonização por difusão de bolhas | 31 |
| Figura 4 – Reator de contato..... | 31 |
| Figura 5 – Reator com turbina..... | 32 |
| Figura 6 – Tanque de contato por injetor de gás ozônio | 32 |
| Figura 7 – Misturador estático e módulos em aço inox | 33 |
| Figura 8 – Estação de Tratamento de Esgoto Modular | 41 |
| Figura 9 – Modelo básico de um sistema de ozonização | 42 |
| Figura 10 – Protótipo descrito em etapas A: coluna cilíndrica de PVC; B: disco em polycarbonato perfurados; C: pedra porosa difusora do gás..... | 43 |
| Figura 11 – Gerador de ozônio e concentrador de oxigênio | 43 |
| Figura 12 – Determinação de pH com uso de pHmetro | 45 |
| Figura 13 – Análise de turbidez..... | 46 |
| Figura 14 – Análise de cor | 47 |
| Figura 15 – Análise de DBO ₅ através de oxitop – A: preparo da análise; B: garrafas de oxitop armazenadas em incubadora (20°C) | 48 |
| Figura 16 – Aspecto do efluente bruto e após receber ozônio nos tempos de 15, 30 e 60 minutos..... | 50 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro pH | 52 |
| Gráfico 2 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro Cor | 53 |
| Gráfico 3 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro Turbidez | 54 |
| Gráfico 4 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro DBO5 | 55 |
| Gráfico 5 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro Coliformes Termotolerantes | 57 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Classificação das águas doces segundo Resolução CONAMA nº 357/05 | 35 |
|---|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Potencial redox de alguns oxidantes | 22 |
| Tabela 2 – Características físico-químicas do ozônio | 27 |
| Tabela 3 – Parâmetros para classificação dos corpos hídricos..... | 36 |
| Tabela 4 – Parâmetros a serem monitorados nas águas superficiais | 36 |
| Tabela 5 – Concentração de coliformes termotolerantes para o descarte de efluentes de acordo com a Resolução CONSEMA/RS 128/2006..... | 37 |
| Tabela 6 – Classificação das águas segundo NBR 13.969 de 97..... | 38 |
| Tabela 7 – Resultados das Análises físico-químicas | 51 |
| Tabela 8 – Resultados das Análises Microbiológicas..... | 51 |
| Tabela 9 – Padrões de qualidade microbiológica de águas | 56 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 OBJETIVOS..... | 14 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 14 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 3 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 15 |
| 3.1 Disponibilidade Hídrica no Brasil | 15 |
| 3.1.1 Reuso da Água | 16 |
| 3.2 Saneamento Básico no Brasil | 17 |
| 3.2.1 Esgoto Sanitário..... | 18 |
| 3.2.2 Tratamento de Esgoto..... | 19 |
| 3.3 Processos Oxidativos Avançados | 21 |
| 3.3.1 Ozonização | 25 |
| 3.3.1.1 Considerações Gerais sobre o Ozônio..... | 25 |
| 3.3.2 Propriedades e Características do Ozônio | 26 |
| 3.3.2.1 Geração de Ozônio..... | 27 |
| 3.3.2.2 Aplicação de ozônio no tratamento de efluentes | 29 |
| 3.3.2.3 Sistemas de Ozonização..... | 30 |
| 3.4 Legislações sobre reuso | 33 |
| 4 METODOLOGIA | 40 |
| 4.1 Origem do efluente avaliado | 40 |
| 4.2 Elaboração do Protótipo..... | 41 |
| 4.3 Montagem de experimento laboratorial..... | 44 |
| 4.4 Análises realizadas | 44 |
| 4.4.1 pH | 44 |
| 4.4.2 Turbidez | 45 |
| 4.4.3 Cor Aparente..... | 46 |
| 4.4.4 DBO ₅ | 47 |
| 4.4.5 Coliformes Termotolerantes..... | 48 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 50 |
| 5.1 pH | 51 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2 Cor e Turbidez | 52 |
| 5.3 DBO₅..... | 54 |
| 5.4 Coliformes Termotolerantes..... | 55 |
| 6 CONCLUSÕES | 58 |
| REFERÊNCIAS..... | 60 |

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente pelo consumo de água é influenciada por fatores como o aumento populacional e os usos permanentes de água para diversas finalidades. Como consequência, sua disponibilidade é reduzida consideravelmente. A oferta de recursos hídricos está cada vez mais comprometida na medida em que águas superficiais e subterrâneas vêm sendo constantemente contaminadas com efluentes oriundos de despejos industriais, agrícolas e urbanos. A situação se agrava nos núcleos populacionais da maioria dos países em desenvolvimento, como o Brasil, o acesso aos serviços de abastecimento de água e saneamento é ainda precário (VICQ; LEITE, 2014).

Dados da última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada em 2008, sobre o acesso da população brasileira aos serviços de saneamento mostram que apenas 28,5% dos municípios brasileiros tratavam seus efluentes (IBGE, 2010). Ressalta-se a importância do tratamento, uma vez que, aproximadamente 80% da água utilizada retorna ao meio ambiente na forma de efluente. O esgoto sanitário ou efluente sanitário possui cerca de 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos podendo haver a presença de microrganismos patogênicos responsáveis por propagar doenças de veiculação hídrica (DIAS et al., 2012).

O lançamento de efluentes em corpos hídricos sem o devido tratamento intensifica o processo de degradação da qualidade da água nestes mananciais, prejudicando o uso destes como fonte de abastecimento de água (GALLI; ABE, 2009).

Os esgotos sanitários podem promover dois tipos de contaminação das águas: contaminação biológica, principalmente por bactérias do tipo coliformes presentes nas fezes humanas, e contaminação por substâncias orgânicas recalcitrantes, ou de difícil degradação como hidrocarbonetos clorados (ARCHELA et al., 2003).

Uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) tem a finalidade de reduzir a carga contaminante ou poluente dos esgotos, a um nível aceitável ao corpo receptor, ou seja, para que o efluente final tratado possa ser absorvido sem provocar danos ao meio ambiente e à saúde coletiva, atendendo padrões exigidos pela legislação ambiental (CASAN, 2012).

Segundo Von Sperling (2002), o tratamento de efluentes sanitários distribui-se em três etapas que contemplam a remoção de sólidos grosseiros (etapa física), redução de matéria orgânica, através do metabolismo de oxidação e de síntese de células (etapa biológica) e correções de pH e eliminação de agentes patogênicos (etapa química). O tratamento biológico é normalmente adotado em virtude da grande quantidade de matéria orgânica biodegradável presente na composição dos esgotos sanitários.

Chernicharo et al. (2001) cita que as alternativas usuais adotadas para o controle de organismos patogênicos em águas e efluentes são, entre outras, o cloro, o ozônio e a radiação ultravioleta. O cloro tem sido o mais utilizado devido ao seu baixo custo operacional, porém problemas relacionados aos subprodutos das reações do cloro com a matéria orgânica (organoclorados) fez com que seu uso fosse restringido.

A reutilização de águas residuais apresenta-se como uma alternativa para proteger o meio ambiente e ampliar as opções de fontes hídricas. O reuso seguro das águas residuais depende da eficiência dos processos de desinfecção adotados. Neste cenário, o ozônio tem se mostrado como um dos mais eficazes desinfetantes e despoluidores (XU et al., 2002).

De acordo com Di Bernardo (1993), o interesse no uso do ozônio para tratamento de efluentes deve-se ao seu alto potencial de oxidação, aliado a outras características interessantes para esta aplicação, como a dissociação de compostos

orgânicos não-biodegradáveis. Porém, por ser altamente reativo e instável, o que significa que não pode ser transportado ou armazenado, exige que seja produzido no local de aplicação.

O ozônio é um gás instável de alto poder oxidante. A instabilidade desse gás é uma característica desejável porque quando o efluente for lançado no meio ambiente não haverá residual de oxidante que possa ser danoso à biota aquática. O alto poder oxidante é interessante porque diminui as concentrações de carga orgânica e o tempo necessário para a desinfecção. Com o tempo de contato e as concentrações reduzidas haverá economia na construção e operação das instalações (LIMA; AISSE, 2003).

Devido às circunstâncias mencionadas, propõe-se a avaliação da aplicação de ozônio (ozonização) em efluente sanitário coletado em uma ETE, verificando as alterações ocorridas nas características do mesmo, através de análises físico-químicas e microbiológicas. Portanto o objetivo principal do trabalho é avaliar a eficiência do uso de ozônio na desinfecção do efluente, através do comparativo das características alteradas pelo processo.

Para fins de testes, no sistema proposto, o efluente sanitário oriundo de uma ETE foi colocado em um reservatório (coluna de ozonização) e recebeu adição de ozônio durante quinze, trinta e sessenta minutos. O ozônio foi produzido de forma instantânea através de um equipamento que opera a uma taxa de 3 g/h. A adição do ozônio no efluente foi feita mediante processo de injeção por meio de um material poroso.

As análises contemplando os parâmetros de pH, cor aparente, turbidez e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO5) foram realizadas no Laboratório de Biorreatores da Univates, a análise de coliformes termotolerantes foi realizada no Laboratório de Microbiologia da Univates. As análises laboratoriais comparativas do efluente pré e pós ozonização demonstraram eficiência de 74,25% na remoção de cor, 41,48% na remoção de turbidez, 75,00% na redução da DBO5 e 99,99% na remoção de coliformes termotolerantes.

O Capítulo 2 deste documento apresenta a revisão de literatura feita acerca do tema desta pesquisa. O Capítulo 3 apresenta o projeto de um ozonizador para

utilização em escala real. A metodologia de experimentação para validação do projeto é apresentada no Capítulo 4, enquanto que o Capítulo 5 demonstra resultados e discussões sobre os valores obtidos por meio das experimentações, servindo de base para conclusões.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A aplicação de ozônio no polimento final de efluentes sanitários visando reuso.

Avaliar a eficiência da ozonização no polimento final de efluente sanitário.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Desenvolver um protótipo para aplicar ozônio em escala piloto;
- ✓ Realizar testes em escala piloto utilizando o ozônio como etapa de polimento do efluente com diferentes tempos de detenção hidráulica (15, 30 e 60 minutos);
- ✓ Verificar a eficiência da ozonização através das análises de pH, Cor aparente, Turbidez, DBO5 e Coliformes Termotolerantes.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Disponibilidade Hídrica no Brasil

Um diagnóstico da situação dos recursos hídricos no Brasil, citado por Ramos e Johnsson (2012), mostra uma elevada disponibilidade per capita, 40 mil m³/ano, isso equivale a onze vezes mais do que a França. Este é um valor médio, cujo cálculo não mostra a verdadeira distribuição de água no país e acaba por checar uma imagem errônea quanto à real disponibilidade de água por pessoa nas diferentes regiões. Considerando a distribuição de água no território nacional e a distribuição demográfica, pode ser averiguado uma desigualdade regional quanto à disponibilidade hídrica, tanto subterrânea quanto superficial.

Da mesma forma que a água não é distribuída uniformemente no espaço, ela também não é distribuída igualmente entre as classes sociais. De acordo com informações disponibilizadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2015), as diferenças registradas entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento evidenciam que a crise mundial dos recursos hídricos está diretamente ligada às desigualdades sociais.

No Brasil, por exemplo, 38% das famílias que recebem até dois salários mínimos não têm acesso aos serviços públicos de abastecimento de água. Em contrapartida, as famílias que possuem renda superior a dez salários mínimos o percentual é inferior a 1% (SETTI et al., 2001).

A água durante muitos anos foi considerada um recurso inesgotável, embora se saiba que, a cada dia, o nível dos lençóis freáticos diminui. A oferta versus

demanda por recursos hídricos não é somente um problema das regiões áridas, pois os conflitos em relação ao uso da água ocorrem inclusive em regiões que possuem abundância desse recurso (FLORENCIO; BASTOS; AISSE, 2006).

Embora haja disponibilidade de água no Brasil, a tendência é de que em poucos anos os cenários confortáveis comecem a mudar, pois o aumento populacional aliado aos padrões de consumo pode levar à escassez deste recurso em algumas regiões, segundo informações da Organização das Nações Unidas (ONU, 2013).

A Associação Brasileira do Ministério Público do Meio Ambiente (2013) cita ainda que a escassez de água não é o único dilema: as águas superficiais são constantemente poluídas com o lançamento de esgoto, efluentes industriais e resíduos da agricultura, fatores estes que acarretam na redução da qualidade das águas, implicando na adoção de tratamentos cada vez mais eficientes e, conseqüentemente, onerosos.

Neste sentido, a água é o mais importante recurso a ser preservado, levando em conta a dependência para a continuidade da vida no planeta. Conceitos, técnicas e práticas que resultem no ato de conservar água devem ser empregados com a finalidade de preservar a quantidade existente, minimizar os volumes de efluentes gerados, e quando possível, reaproveitá-los (LEMOS; FAGUNDES; SCHERER, 2009).

3.1.1 Reuso da Água

Com o aumento pelo interesse pelo tema, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), publicou a Resolução 54, em 2005, que indica os critérios gerais para a execução de reuso direto não potável de água. Na resolução, são determinadas cinco formas de reuso de água: para fins urbanos, fins agrícolas e florestais, fins ambientais, fins industriais e para fins na aquicultura.

Cunha et al. (2011) afirma que o grande desafio na gestão dos recursos hídricos é equilibrar a necessidade dos usuários com a disponibilidade de água,

sendo necessário o controle das demandas para que haja redução na pressão sobre os recursos hídricos.

Neste sentido, o reuso de água pode atuar como um recurso hídrico complementar (RODRIGUES, 2005).

No Brasil, embora a difusão de práticas de reuso seja crescente, a falta de legislações sobre o assunto é vista como uma ameaça a esta prática, em função dos riscos à saúde, no caso de não haver normas e controle (CUNHA et al., 2011).

O reuso proporciona redução na demanda sobre os mananciais de água devido à substituição da água potável por uma água de qualidade inferior. Essa prática já utilizada em alguns países é baseada no conceito de substituição de mananciais. Tal substituição é possível em função da qualidade requerida para um uso específico (CETESB, 2015).

Cunha et al. (2011) salienta que o reuso de esgotos tratados pode ser estratégico no planejamento e na gestão sustentável dos recursos hídricos como um substituto para o uso de águas destinadas a fins agrícolas, florestais, industriais, urbanos e ambientais. Grandes volumes de água potável podem ser economizados através do reuso de água de qualidade inferior (geralmente efluentes pós-tratados) para atendimento de finalidades menos nobres que podem utilizar este recurso dentro dos padrões de potabilidade atingidos através do tratamento.

3.2 Saneamento Básico no Brasil

De acordo com a Política Nacional de Saneamento Básico (BRASIL, 2007), o Saneamento Básico pode ser definido como um conjunto de medidas que visam preservar ou alterar as condições do meio e prevenir doenças, promovendo a saúde e uma melhor qualidade de vida da população.

O Saneamento Básico é um direito assegurado pela constituição federal e pela Lei nº. 11.445/2007 (BRASIL, 2007), sendo definido como o conjunto de serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água,

esgotamento sanitário, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos e águas pluviais e drenagem urbana.

Estima-se que a maioria das doenças ocasionadas pela falta de saneamento básico estejam relacionadas à água contaminada. Portanto, se as políticas voltadas para assegurar os serviços básicos de saneamento à população forem eficientes, o número de doenças relacionadas a estes tende a reduzir (NOZAKI, 2007).

Segundo Ribeiro e Rooke (2010) as questões envolvendo saúde pública e poluição do meio ambiente, fizeram com que a humanidade buscasse alternativas e soluções para a coleta e o tratamento de efluentes assim como para o abastecimento de água de forma segura e confiável para a população, reduzindo os impactos.

As infraestruturas de saneamento básico também são importantes para o meio ambiente, pois se fundamentam na proteção dos recursos hídricos, entre outros recursos naturais (NOZAKI, 2007).

3.2.1 Esgoto Sanitário

Jordão e Pessôa (1995) caracterizam o esgoto sanitário como sendo os despejos provenientes das diversas modalidades do uso e da origem das águas, tais como as de uso doméstico, comercial, industrial, as de utilidades públicas, de áreas agrícolas, de superfície, de infiltrações, pluviais, e outros efluentes sanitários. O esgoto sanitário compõe-se basicamente de resíduos gerados pelo homem (fezes e urina), papel, restos de comida, sabão e águas de lavagem.

Os esgotos sanitários contêm aproximadamente 99,90% de água e 0,10% de sólidos. Destes 70,00% são sólidos orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras) e 30,00% sólidos inorgânicos (areia, sais e metais). A água em si nada mais é que um meio de transporte das inúmeras substâncias orgânicas, inorgânicas e microrganismos eliminados pelo homem diariamente. Os sólidos são responsáveis pela deterioração da qualidade do corpo d'água (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

Parâmetros importantes na caracterização do esgoto são: matéria orgânica (DBO e DQO), cor, turbidez, pH e temperatura. A investigação da presença de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, torna-se importante para o controle do processo de eutrofização (VON SPERLING, 2006).

3.2.2 Tratamento de Esgoto

Uma das principais ações humanas que podem influenciar na qualidade de água é o lançamento de cargas orgânicas (esgoto) nos sistemas hídricos (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

Os recursos hídricos possuem significativa capacidade de diluição e assimilação de esgotos e resíduos lançados em seu meio, mediante processos físicos, químicos e biológicos, que proporcionam a sua autodepuração. No entanto, essa capacidade é limitada, exigindo o tratamento dos efluentes a fim de minimizar impactos ambientais e poluição (SETTI et al., 2001).

As Estações de Tratamento de Esgoto são unidades que recebem o esgoto, que após escoar pelas residências e passar pela rede coletora através de um sistema de tubos subterrâneos, é submetido ao tratamento, para que possa ser devolvido ao meio ambiente com menor impacto (COMPESA, 2012).

Segundo Von Sperling (2006), o tratamento de efluentes é classificado através dos seguintes níveis:

Tratamento Preliminar: É responsável pela remoção de sólidos grosseiros e de areia através de mecanismos físicos.

Tratamento Primário: É utilizado para remover sólidos flutuantes (graxas e óleos) e sólidos em suspensão através de mecanismos de ordem física.

Tratamento Secundário: Neste tratamento, os procedimentos são realizados por meio de mecanismos biológicos, com a finalidade principal de remover matéria orgânica e eventualmente, nutrientes como nitrogênio e fósforo.

Tratamento Terciário: Tem o intuito de promover a remoção de poluentes específicos ou a remoção aperfeiçoada de poluentes que não foram removidos no tratamento secundário.

No tratamento preliminar ocorre a remoção de sólidos e partículas grosseiras do esgoto, através de meios físicos como o gradeamento, o peneiramento e a sedimentação (VON SPERLING, 2006), por meio de dispositivos que na chegada do esgoto bruto servem como barreiras e possibilitam a remoção de sólidos grosseiros e da areia (MENEZES; SILVINO; NETO, 2006).

O tratamento primário reduz a matéria orgânica presente no efluente, removendo os sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos flutuantes. Nesta etapa, os sólidos em suspensão se sedimentam e se depositam por gravidade no fundo dos decantadores, formando o lodo primário bruto. Esse lodo é retirado do fundo do decantador por meio de raspadores mecanizados, bombas ou tubulações (COPASA, 2007).

O tratamento secundário pode ser realizado por meio de filtros anaeróbios que contém bactérias que crescem aderidas a uma camada suporte formando a biomassa que promove a redução da carga orgânica dos esgotos. Também pode-se utilizar reatores anaeróbios (Reatores UASB) aonde a biomassa cresce dispersa e também promove a remoção de matéria orgânica. Neste processo, o fluxo do líquido é ascendente e são formados gases como metano e gás carbônico, como subprodutos (VON SPERLING, 2006).

Tanques de aeração também são utilizados no tratamento secundário com a função de remover a matéria orgânica e os sólidos em suspensão. O processo é realizado através de meios biológicos utilizando reações bioquímicas através de microrganismos aeróbios. Para que ocorra decomposição biológica do material orgânico é necessária a presença de oxigênio e condições adequadas como: temperatura, tempo de contato e pH (COPASA, 2007).

Lagoas de sedimentação ou decantadores secundários são empregadas com a finalidade de reter sólidos e promover sua estabilização anaeróbia. O efluente final deve possuir baixos teores de DBO e de sólidos em suspensão (MENEZES; SILVINO; NETO, 2006).

Para promover remoções adicionais de poluentes em águas residuárias técnicas do tratamento terciário podem ser utilizadas antes de sua descarga no corpo receptor ou reaproveitamento. Esta etapa é também chamada de “polimento”, e é onde se utiliza processos oxidativos avançados (POAs) visando maior eficiência na remoção de poluentes. Os processos de tratamento terciário são muito diversificados, destacando-se os que utilizam filtração, cloração ou ozonização para a remoção de bactérias, absorção por carvão ativado, e outros processos de absorção química para a remoção de cor, redução de espuma e de sólidos inorgânicos tais como: eletrodíálise, osmose reversa e troca iônica (METCALF; EDDY, 2003).

3.3 Processos Oxidativos Avançados

Os Processos Oxidativos Avançados são técnicas de tratamento terciário consolidadas e eficientes para o tratamento de águas e efluentes, visando a eliminação de poluentes orgânicos de difícil degradação por meio de tecnologias convencionais, devido a sua alta estabilidade química ou baixa biodegradabilidade (OLLER; MALATO; SÁNCHEZ-PÉREZ, 2011).

Araújo et al. (2014) ressalta que a eficiência dos POAs está associada à geração de radicais livres, como o radical hidroxila (*OH) e, a sua utilização como agente oxidante é a principal característica dos processos oxidativos avançados, que recebem destaque como métodos alternativos promissores no tratamento de águas residuais e efluentes industriais.

O emprego de POAs nas etapas finais de tratamento, normalmente se faz necessário em função das limitações apresentadas pelo tratamento biológico convencional e devido à presença de produtos de difícil degradação e compostos tóxicos que causam a inibição do processo, evidenciando a necessidade de novas alternativas ao seu tratamento (BAUN et al., 2003).

Os efluentes, em geral, são formados por uma grande quantidade de compostos tóxicos, a destruição destes poluentes se faz necessária antes do lançamento ou reutilização do efluente (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

A degradação de compostos orgânicos por POAs tem sido utilizada, devido principalmente ao seu elevado grau de eficiência na destruição de numerosos compostos químicos com características tóxicas. Estes sistemas mostram-se uma opção viável no tratamento de águas superficiais e subterrâneas, e também se encaixam perfeitamente no tratamento de águas residuárias (MIERZWA; HEPANHOL, 2005).

Os radicais hidroxilas ($\cdot\text{OH}$), gerados nos POAs, são espécies altamente oxidantes, suficientes para provocar a mineralização da matéria orgânica à dióxido de carbono, água e íons inorgânicos. Esses radicais tem um potencial redox de 2,8 vezes, sendo este menor do que o potencial oxidante do flúor apenas, conforme mostra a Tabela 1 (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

Estudos têm sido desenvolvidos com diversas combinações químicas, fotoquímicas e eletroquímicas para criar radicais hidroxila para posterior aplicação em tratamento de efluentes industriais (ARAÚJO et al., 2014).

Tabela 1 – Potencial redox de alguns oxidantes

| Espécie | Potencial redox (V) |
|------------------------|----------------------------|
| Flúor | 3,03 |
| Radical Hidroxila | 2,8 |
| Oxigênio atômico | 2,42 |
| Ozônio | 2,07 |
| Peróxido de hidrogênio | 1,78 |
| Permanganato | 1,68 |
| Dioxido de cloro | 1,57 |
| Cloro | 1,36 |
| Iodo | 0,54 |

Fonte: Teixeira e Jardim (2004).

Os radicais hidroxila, responsáveis pelas reações de oxidação, podem ser produzidos a partir de agentes como o ozônio, a radiação UV, ou através de combinações como $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ (ozônio e peróxido de hidrogênio), O_3/UV (ozônio e radiação ultravioleta), $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ (peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta),

$O_3/H_2O_2/UV$ (ozônio, peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta) e da combinação de peróxido de hidrogênio com íons ferrosos no chamado reagente de Fenton (AMORIM; LEÃO; MOREIRA, 2009). A Figura 1 ilustra os meios atualmente conhecidos para obtenção dos radicais hidroxila.

Mesmo se tratando de tecnologias altamente eficientes, o uso de POAs deve ser controlado, pois sob determinadas condições estes processos podem produzir substâncias recalcitrantes ou mais tóxicas que o composto inicial, como o cloro que, quando aplicado em efluentes com altos teores de carbono orgânico total, pode produzir níveis inaceitáveis de trihalometanos e outros subprodutos cancerígenos (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

A elevada reatividade do radical hidroxila é o principal benefício atribuído à sua utilização, uma vez que ele está pronto para ser consumido por meio da degradação de um amplo espectro de poluentes. Porém, essa vantagem é também um inconveniente, pois os radicais hidroxila não são seletivos e acabam reagindo com espécies não poluentes. Dessa forma, logo que formados, esses radicais podem ser perdidos por meio da reação com espécies matriciais presentes em águas naturais, assim como espécies inorgânicas presentes nos efluentes (LINDSEY et al., 2003).

Figura 1 – Processos de obtenção de radicais hidroxila por POAs



Fonte: Dezotti (2003).

Dentre os processos oxidativos avançados mais utilizados, a ozonização se destaca, tendo o seu uso frequente para a decomposição de matéria orgânica, degradação parcial de moléculas recalcitrantes, remoção de cor e odor e aumento da biodegradabilidade de efluentes, sendo um dos métodos mais estudados e aplicados para o tratamento de lixiviado, por exemplo (KURNIAWAN et al., 2006).

O ozônio é também normalmente empregado quando os níveis de poluentes nos efluentes industriais a serem descartados estão acima dos valores estabelecidos pelos órgãos ambientais. A aplicação do ozônio promove além da remoção de DQO e da DBO, o aumento do teor do oxigênio dissolvido, a remoção de cor, odor, sabor e turbidez (SILVA, 2006).

3.3.1 Ozonização

A ozonização é uma tecnologia limpa, moderna e economicamente competitiva com a cloração, na desinfecção de águas e efluentes, que se caracteriza pela aplicação do gás ozônio como agente oxidante (SILVEIRA, 2004).

3.3.1.1 Considerações Gerais sobre o Ozônio

Os primeiros relatos da utilização do ozônio são de 1785, quando o químico holandês Van Marum, concluiu que uma descarga elétrica no oxigênio resultava em um odor característico e bastante irritante. Porém, o descobrimento do ozônio foi anunciado oficialmente à Associação Britânica para o Avanço da Ciência (*British Association for the Advancement of Science*) somente em 1840, por Christian Friedrich Schönbein, ao sentir um odor semelhante ao descrito por Van Marum, nas proximidades de um equipamento elétrico no laboratório onde trabalhava. A nomeação ozônio sugerida por Schönbein é derivada da palavra grega *ozein*, no qual o significado é cheiro (SANTOS, 2008).

O ozônio é um gás incolor de odor característico e alto poder oxidante ($E_0 = 2,07 \text{ V}$). É a forma triatômica do oxigênio e, em fase aquosa, se decompõe rapidamente a oxigênio e espécies radicalares, denominadas como radicais livres e caracterizadas por serem espécies químicas independentes, que possuem um ou mais elétrons desemparelhados (KUNZ, et al., 2002).

Sua utilização na desinfecção de água de abastecimento para remover cor, sabor e odor, é empregada há mais de 100 anos, sendo usado pela primeira vez em Nice, na França, em 1906 e logo após, em estações de tratamento de água em todo o mundo (RICE, 2005).

Segundo o Instituto Nacional de Preservação Ambiental (INPA, 2004) a utilização de geradores de ozônio teve uma decaída na época da primeira guerra mundial, quando ocorreu o descobrimento do cloro, que economicamente era mais vantajoso.

No entanto, por ter uma grande capacidade de desinfecção e não gerar subprodutos nocivos à saúde, o ozônio voltou a ser utilizado como substituto do cloro (SILVEIRA, 2004). O ozônio também tem se apresentado como uma alternativa economicamente viável em ETEs, podendo eliminar a presença de coliformes totais e termotolerantes (OENNING; PAWLOWSKY, 2007). Outra atuação importante do ozônio é como agente na remoção de cor e turbidez da água (ARMAROLI, 2007).

De acordo com Schiavon et al. (2012) o ozônio tem sido muito estudado para aplicações em tratamento de água, efluentes sanitários e industriais, na medicina, entre outras áreas, o que torna fundamental a melhoria de sistemas geradores de ozônio.

Segundo Chernicharo (2001) a desinfecção de água e esgoto utilizando ozônio acarreta em níveis de organismos patogênicos que se diferem. Em águas, a inativação dos organismos patogênicos é obrigatoriamente total enquanto que, em esgotos é permitida a inativação parcial dos patogênicos, com concentração residual de microrganismos ativos variando de acordo com o uso pretendido para esgoto tratado.

Quanto a aspectos relativos a projeto, algumas variáveis influenciam a eficiência do processo de desinfecção, sendo elas: o pH, a alcalinidade, a temperatura, a matéria orgânica, os sólidos em suspensão, a concentração em ozônio dissolvido (ou ozônio residual) e os sistemas de contato - tanque de contato (CHERNICHARO, 2001).

3.3.2 Propriedades e Características do Ozônio

O ozônio é uma das substâncias mais oxidantes, perdendo em seu poder de oxidação somente para o flúor. Tem uma grande capacidade de eliminar vírus, bactérias e ácaros. Quando em altas concentrações, pode ser nocivo para a saúde humana, prejudicando o trato respiratório. Sua concentração máxima considerada segura para o homem é da ordem de 0,1 ppm (HASSEMER, 2000).

A Tabela 2 apresenta as características físico-químicas do ozônio de acordo com a descrição feita por Di Bernardo (1993).

Tabela 2 – Características físico-químicas do ozônio

| Característica | Valor |
|--------------------------------|-----------|
| Massa molar | 48 g/mol |
| Massa específica do gás (CNTP) | 2,14 g/L |
| Ponto de fusão (a 1 atm) | -192,5 °C |
| Ponto de ebulição (a 1 atm) | -111,9 °C |

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Okte (2009), o ozônio tem potencial de oxidação 52% superior ao cloro, além de agir mais rapidamente do que este na inativação celular de bactérias, leveduras, fungos e também na eliminação de vírus.

Segundo Bassani (2003), o alto poder oxidante do ozônio contribui para a redução nas concentrações e tempo necessários para a desinfecção de efluentes. Como consequência tem-se a economia na construção e operação das instalações. Outros benefícios a considerar é que os subprodutos orgânicos resultantes da ozonização de efluentes sanitários tratados a nível secundário, geralmente apresentam pouca ou nenhuma toxicidade a nível agudo, o que é desejável.

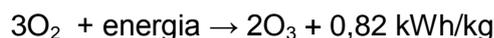
3.3.2.1 Geração de Ozônio

Segundo Hassemer (2000), a geração de ozônio pode ser feita de diversas maneiras, sendo que grande parte delas requer que as ligações estáveis da molécula de oxigênio sejam divididas em dois átomos de oxigênio. Os átomos divididos imediatamente reagem com uma molécula de oxigênio para formar o ozônio (O₃).

Três são as formas principais de produzir o ozônio: por eletrólise, ultravioleta e descarga corona. Nos geradores comerciais, o ozônio é produzido principalmente por descarga corona e radiação ultravioleta. A radiação ultravioleta, todavia, não atende as necessidades de produção requeridas pela indústria. Assim a descarga

elétrica do tipo corona é o método mais utilizado para se obter ozônio em quantidades significativas (ALMEIDA et al., 2004).

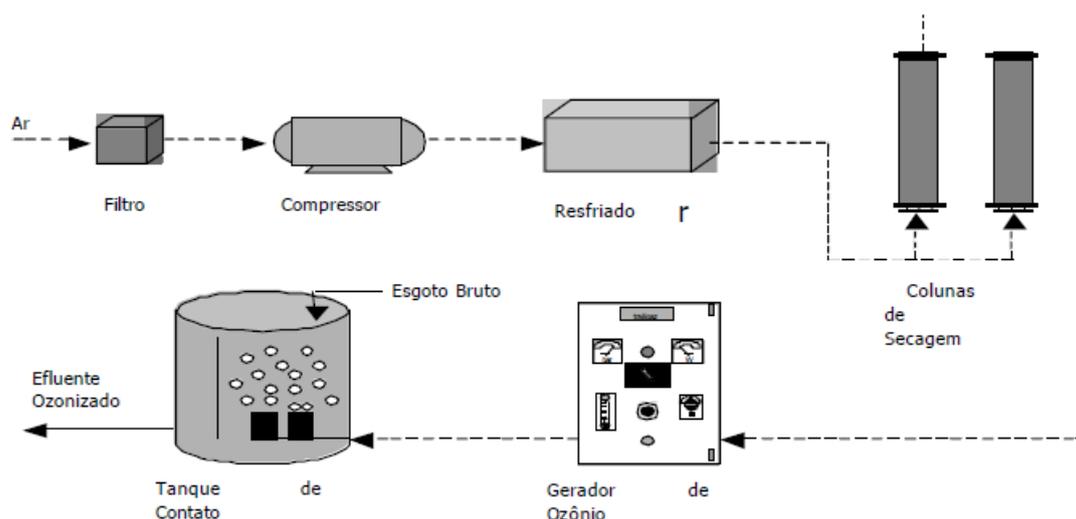
Os equipamentos atuais funcionam segundo o mesmo princípio do primeiro gerador de ozônio construído, onde o ar seco ou o oxigênio é introduzido em uma célula à qual é aplicada descarga elétrica, ocorrendo a seguinte reação:



Basicamente existem dois sistemas de geração de ozônio: um que opera a partir com a utilização do ar e outro a partir do oxigênio puro. A melhor eficiência dos geradores de ozônio ocorre quando estes são alimentados por oxigênio puro (SCHIAVON et al., 2012).

No sistema que utiliza ar atmosférico, se faz necessário o pré-tratamento do ar, conforme ilustrado na Figura 2. As etapas desse pré-tratamento compreendem a compressão de ar, sistema de refrigeração do ar comprimido quente e sistema de secagem por meio da aplicação de materiais dessecadores (DI BERNARDO, 1993).

Figura 2 – Geração de ozônio a partir do ar



Fonte: Di Bernardo (1993).

Schiavon et al. (2012) explica que o funcionamento do processo corona, comercialmente mais utilizado, consiste em aplicar uma descarga elétrica em um fluxo de ar ou oxigênio, para a formação das moléculas de ozônio. Neste processo os elétrons livres são impulsionados a altas velocidades, rompendo por meio do

impacto as duplas ligações das moléculas de oxigênio (O_2) presentes no ar. Após o processo de quebra, as moléculas se agrupam em três de oxigênio (O), assim formando o ozônio (O_3).

Como o ozônio é um gás que possui uma meia vida relativamente curta (cerca de 15 minutos, em condições normais de temperatura e pressão), o seu transporte e armazenamento é dificultado, sendo portanto, comumente produzido nas proximidades do local onde será utilizado (DI BERNARDO, 1993).

3.3.2.2 Aplicação de ozônio no tratamento de efluentes

Segundo a CETESB (2015) a utilização do ozônio no tratamento de efluente industrial já foi testada para diminuir a concentração de DQO e eliminar alguns compostos químicos como fenóis e cianetos. A remoção de cor é considerada eficiente por oxidar a matéria orgânica dissolvida e algumas formas coloidais presentes nos corantes, trazendo a coloração natural do efluente. Estudos recentes desenvolvidos, aplicando ozônio no pré-tratamento de águas residuárias contendo especificamente corantes azo – *Orange II* demonstraram efeito satisfatório do ozônio sobre a degradação desses compostos.

Pequenas doses de ozônio permitem uma boa eficiência na remoção da cor para corantes ácidos, diretos, catiônicos, mordentes, reativos e enxofre. Corantes dispersos e tintas são mais difíceis de remover, mesmo com uma aplicação de grandes concentrações de ozônio (HASSEMER, 2000).

Quanto sua ação como desinfetante, a capacidade de desinfecção do ozônio em relação ao cloro é de cerca de dez vezes superior, e isto para todos os tipos de microrganismos. Ele se faz eficaz mesmo na eliminação de esporos e cistos que são as formas mais resistentes (SOARES, 1997), sendo necessário considerar que uma desinfecção efetiva depende da suscetibilidade do organismo que se pretende extinguir, do período de contato e da concentração de ozônio.

A aplicação do ozônio em águas ou efluentes é realizada através da dispersão do gás nestes. Dentre as formas de difusão utilizadas as mais comuns

são reatores ou tanques de contato para difusão de ar ozonizado através de placas porosas (FORNARI, 2011).

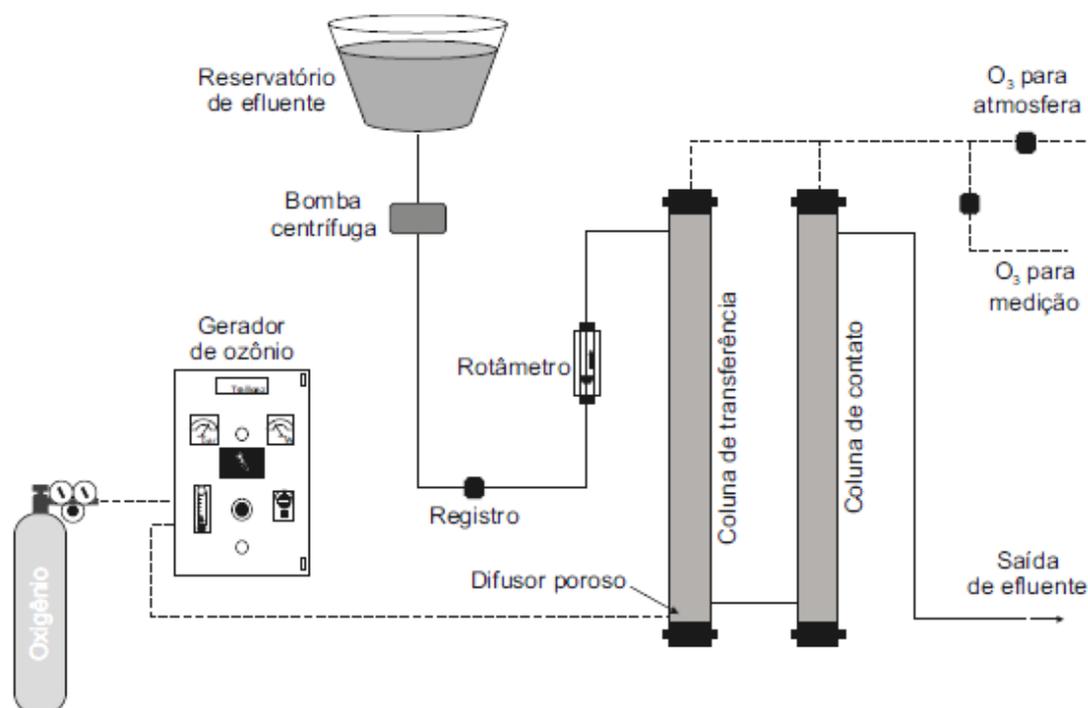
Segundo Fornari (2011) em função da baixa solubilidade em água, os processos de tratamento utilizando ozônio requerem sistemas de aplicação na fase líquida com alta eficiência de transferência. O aumento da transferência pode se dar pelo aumento da área de contato entre gás e líquido, facilitado pela redução das microbolhas dos difusores.

3.3.2.3 Sistemas de Ozonização

Gonçalves et al. (2003) publicou um estudo fomentado pelo Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), apresentando modelos de câmaras de ozonização convencionalmente utilizados para a dispersão de ozônio em efluentes. Os principais modelos pesquisados pelo autor estão descritos e ilustrados na sequência.

Colunas cilíndricas que utilizam difusores acoplados ao fundo da câmara dispersando o gás em forma de bolhas têm sido amplamente utilizadas (Figura 3). A transferência do ozônio depende da turbulência entre as fases gasosa e líquida, do número e tamanho das bolhas e da área de transferência interfacial entre as duas fases dos fluidos. A eficiência do processo depende do tempo de contato entre as bolhas e o líquido. Quanto mais lenta a ascensão das bolhas no meio líquido, maior o tempo de contato e melhor a eficiência.

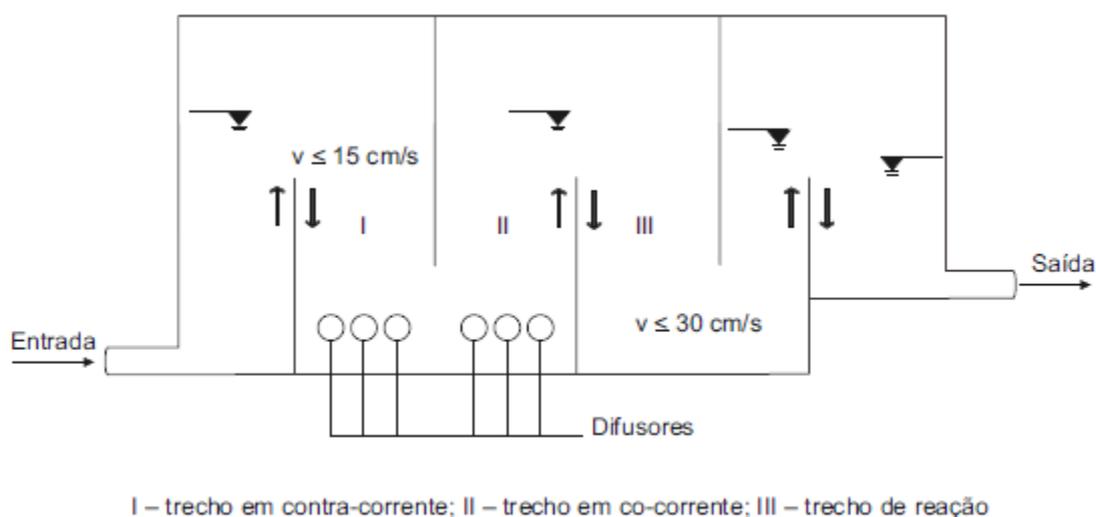
Figura 3 – Sistema de ozonização por difusão de bolhas



Fonte: Gonçalves et al. (2003).

Também podem ser utilizados reatores de contato compartimentados em três tipos de segmentos: segmentos em que a vazão do gás e a vazão do efluente têm direções opostas (trechos em contra-corrente), segmentos em que as vazões possuem a mesma direção (trechos em co-corrente) e segmentos em que o gás não é injetado (trechos reativos), conforme ilustrado na Figura 4.

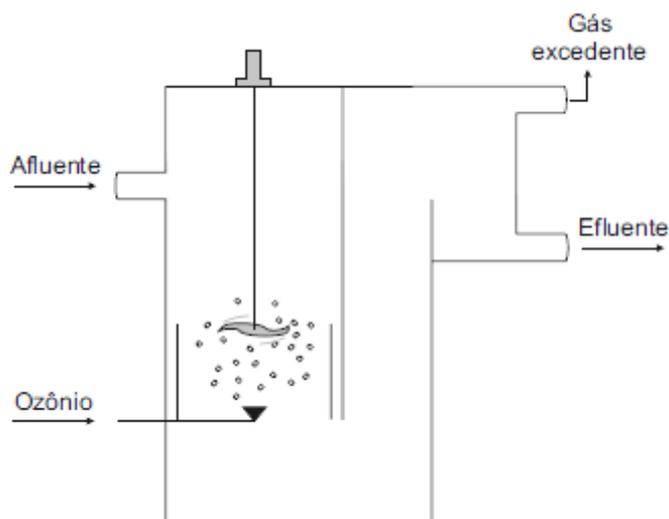
Figura 4 – Reator de contato



Fonte: Gonçalves et al. (2003).

Reatores com turbinas (FIGURA 5) são outra opção onde o líquido é introduzido na zona de dispersão da turbina em sentido descendente, ao encontro do fluxo de gás ozônio insuflado abaixo dela. Através do cisalhamento das bolhas de gás ozonizado pode ocorrer uma boa difusão da mistura do gás com o líquido.

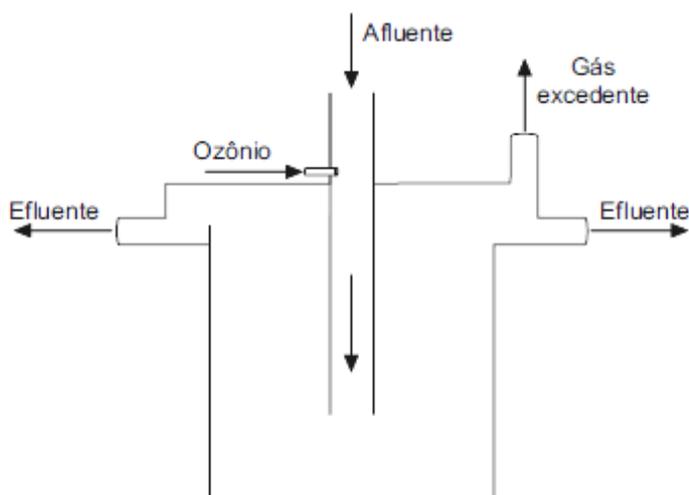
Figura 5 – Reator com turbina



Fonte: Gonçalves et al. (2003).

O reator com injetor de gás ozônio (Figura 6) constitui-se de um tanque com um tubo central que conduz o efluente a tratar; a vazão no tubo aspira o gás e alimenta o tanque pelo fundo. A velocidade deve ser tal que quebre as bolhas e carregue a emulsão criada no sentido descendente.

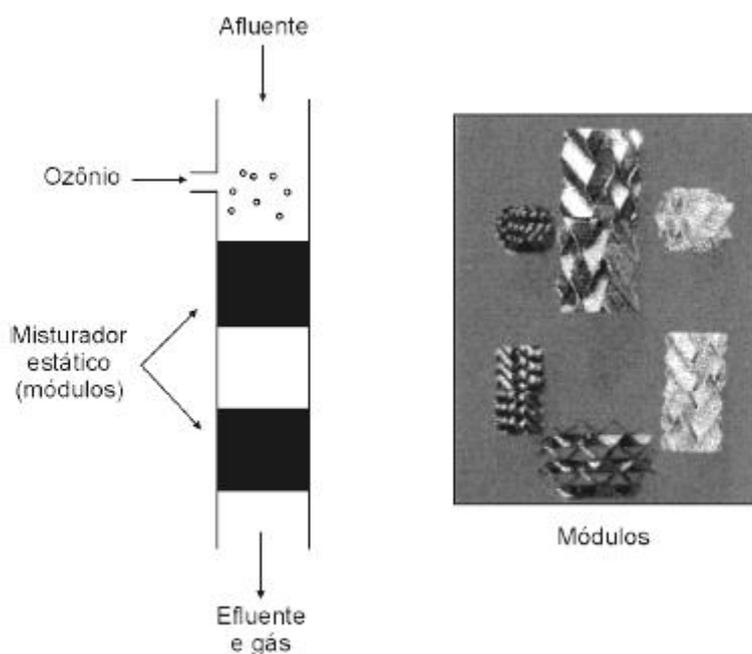
Figura 6 – Tanque de contato por injetor de gás ozônio



Fonte: Gonçalves et al. (2003).

Os misturadores estáticos são normalmente confeccionados em aço inoxidável, em módulos, dispostos verticalmente em série no interior de uma tubulação. Cada módulo é composto por uma série de chapas onduladas, soldadas perpendicularmente, uma em relação a outra. O líquido flui pelos módulos em sentido descendente, enquanto o gás ozônio, injetado em linha, a montante dos módulos, é arrastado pela água enquanto tenta fluir em sentido contrário.

Figura 7 – Misturador estático e módulos em aço inox



Fonte: Gonçalves et al. (2003).

3.4 Legislações sobre reuso

O tema reuso da água originária dos processos de tratamento dos esgotos, esta sendo debatido com veemência na sociedade atual. Segundo Hespanhol (2008), o reuso da água proveniente de estações de tratamento de esgoto deve atender alguns parâmetros de qualidade, para que esta possa ser utilizada com segurança. Mesmo passando por um processo de tratamento, ainda assim podemos denominar duas classificações para esta água:

Fins Potáveis Alternativas Inviáveis. Neste efluente pode-se constatar a presença de vírus, metais pesados, produtos químicos provenientes de indústrias, resíduos residenciais, medicamentos, entre outros que não são removidos ou eliminados pelos sistemas de tratamentos convencionais.

Fins Não Potáveis Alternativas Viáveis. Após este efluente passar pelo tratamento biológico ele também recebe o tratamento físico-químico, o que lhe confere características possíveis de reuso.

O Brasil vem elaborando, desde o início do século passado, políticas e legislações que buscam aos poucos uma forma de consolidar e valorizar seus recursos hídricos. A partir da década de 1980, com a constituição da Lei Federal nº 6.938/1981 a qual possui a Política Nacional do Meio Ambiente e, do Art. 225 da Constituição Federal de 1988 que determina o meio ambiente como um bem de uso comum, e este deve ser preservado para as futuras gerações, a água passou a ter status de um bem finito indispensável à qualidade de vida (OLIVEIRA, 2004; BRASIL, 1988).

A Resolução nº 357 de 17 de março de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) classifica os corpos hídricos e dá diretrizes ambientais para os possíveis enquadramentos, também, estabelece as condições e padrões para o lançamento de efluentes nestes cursos da água (CONAMA, 2005). A Tabela 3 apresenta alguns parâmetros utilizados para classificar os corpos hídricos.

O Quadro 1 apresenta a classificação das águas doces segundo a Resolução do CONAMA nº 357/05.

Quadro 1 – Classificação das águas doces segundo Resolução CONAMA nº 357/05

| Classes | Usos |
|-----------------|--|
| Classe especial | <ul style="list-style-type: none"> a) abastecimento para consumo humano, com desinfecção; b) preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas. c) preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral. |
| Classe 1 | <ul style="list-style-type: none"> a) abastecimento doméstico após tratamento simplificado; b) proteção das comunidades aquáticas; c) recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho); d) irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película. e) proteção das comunidades aquáticas em terras Indígenas. |
| Classe 2 | <ul style="list-style-type: none"> a) abastecimento doméstico, após tratamento convencional; b) proteção das comunidades aquáticas; c) recreação de contato primário (esqui aquático, natação e mergulho); d) irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e) aquicultura e atividade de pesca. |
| Classe 3 | <ul style="list-style-type: none"> a) abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; c) pesca amadora; d) recreação de contato secundário; e) dessedentação de animais. |
| Classe 4 | <ul style="list-style-type: none"> a) navegação; b) harmonia paisagística. |

Fonte: CONAMA (2005) adaptado por ABRAHÃO (2006).

Tabela 3 – Parâmetros para classificação dos corpos hídricos

| Parâmetros | Unidade | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 |
|-------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| Coliformes Fecais | NPM/100mL | 200 | 1.000 | 4.000 | - |
| pH | - | 6 – 9 | 6 - 9 | 6 - 9 | 6 – 9 |
| DBO520 | mg/L O ₂ | <= 3,0 | <= 5,0 | <= 10,0 | - |
| Turbidez | NTU | <= 40 | <= 100 | <= 100 | - |

Fonte: CONAMA (2005) adaptado por ABRAHÃO (2006).

A Resolução nº 128 de 24 de novembro de 2006 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA), fixa os Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul.

A Tabela 4 apresenta alguns parâmetros a serem monitorados nas águas superficiais para vazão < 200 m³/d

Tabela 4 – Parâmetros a serem monitorados nas águas superficiais

| Parâmetros | Resolução nº 128 CONSEMA (2006) |
|---------------------------|--|
| Ph | 6 – 9 |
| Cor (mg.L-1 Pt) | Não deve conferir mudança de coloração ao corpo hídrico receptor |
| DBO ₅ (mg.L-1) | ≤180 |

Fonte: Adaptado pelo autor de CONSEMA (2006).

Para vazões inferiores a 200 metros cúbicos por dia, não há limite em relação ao parâmetros de coliformes termotolerantes. Em relação às demais vazões a

Resolução estabelece as concentrações conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Concentração de coliformes termotolerantes para o descarte de efluentes de acordo com a Resolução CONSEMA/RS 128/2006

| Faixa de vazão (m ³ /dia) | Coliformes Termotolerantes Concentração (NMP/100 mL) |
|--------------------------------------|---|
| Q < 200 | - |
| 200 ≤ Q < 500 | 10 ⁶ |
| 500 ≤ Q < 1.000 | 10 ⁶ |
| 1.000 ≤ Q < 2.000 | 10 ⁵ |
| 2.000 ≤ Q < 10.000 | 10 ⁴ |
| 10.000 ≤ Q | 10 ³ |

Fonte: Adaptado pelo autor de Resolução CONSEMA nº 128/06.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), no dia 28 de janeiro de 2008, confirmou após análise sistemática, a NBR 13.969: 1997 – Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Esta NBR foi criada pelo Comitê Brasileiro de Construção Civil, e pela Comissão de Estudo de Instalação Predial de Tanques Sépticos, estes afirmam que: No caso do esgoto de origem doméstica ou com características semelhantes, este de ser tratado e após este processo pode ser reutilizado para fins que não exijam sua potabilidade, mas que seja sanitariamente seguro, como irrigação de jardins, lavagem de pisos e de veículos automotores, em descarga de vasos sanitários, na manutenção paisagística de lagos e canais com água, na irrigação de campos agrícolas e pastagens, etc.

Esta norma permitiu de um modo simples a reutilização da água de enxague de máquinas de lavar, em vasos sanitários, mas também exigiu um planejamento para implantação de sistemas de reuso, com isso, podendo permitir o uso seguro e racional, além de minimizar custos de implantação e de operação. Para isso, deve ser levado em conta a sua finalidade e o volume de efluente a ser reutilizado, para definir o tratamento necessário. Com isso, a norma definiu os parâmetros de coliformes fecais, turbidez, pH, sólidos dissolvidos e cloro residual que devem ser seguidos em caso de reuso das águas provenientes de ambiente essencialmente

domésticas, águas cinzas ou águas negras, de acordo com a classe das águas e a finalidade do reuso, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação das águas segundo NBR 13.969 de 97

| Classes | Parâmetros |
|---|--|
| | · turbidez - < 5 NTU; |
| Classe 1 – Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador incluindo chafarizes. | · coliforme fecal - inferior a 200 NMP/100 m L; · sólidos dissolvidos totais < 200 mg/L · pH entre 6.0 e 8.0; · cloro residual entre 0,5 mg/L e 1,5 mg/L |
| Classe 2 – Lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes: | · turbidez - < 5 NTU; · coliforme fecal – inferior a 500 NMP/100 m L; · cloro residual superior a 0,5 mg/L. |
| Classe 3 – Reúso nas descargas das bacias sanitárias | · turbidez - < 10 NTU; · coliforme fecal – inferior a 500 NMP/100 mL; |
| Classe 4 – Reúso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual. | · coliforme fecal – inferior a 5.000 NMP/100 mL; · oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg/L |

Fonte: Adaptado pelo autor de NBR 13.969:1997.

A NBR 13.969:1997 complementa e atualiza a NBR 7229:1993 e informa: as opções para tratamento e destinação dos efluentes dos tanques sépticos foram revistas, ampliadas e detalhadas, assim como foram incluídas alternativas para possibilitar a adequação da qualidade do efluente para as mais diversas e exigentes situações possíveis, se for necessária.

4 METODOLOGIA

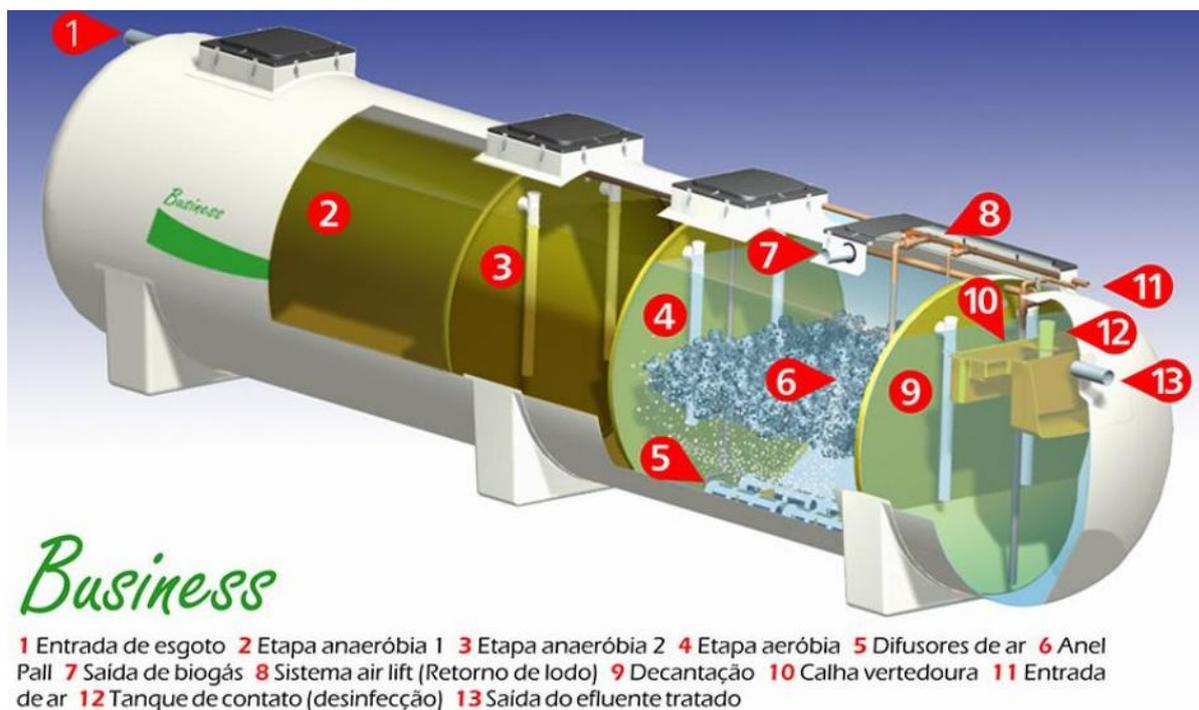
Os experimentos práticos realizados para avaliar a eficiência do tratamento de efluente sanitário de uma instituição de ensino superior, na fase de polimento final, com o emprego de ozônio nos tempos de 15, 30 e 60 minutos de contato. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi criado um protótipo para receber 3 litros de efluente, onde foram rodados 3 experimentos na forma de bateladas individuais nos tempos pré determinados. Foram feitas análises físico-químicas e microbiológicas, para a caracterização do efluente pré e pós aplicação do ozônio. Neste estudo foram feitas análise de cor, turbidez e DBO5, estas realizadas nos Laboratório de Biorreatores da Univates e análise de coliformes termotolerantes, estas realizadas no Laboratório de Microbiologia da Univates.

4.1 Origem do efluente avaliado

O efluente utilizado para os testes propostos é proveniente de uma Estação de Tratamento de Efluentes Sanitários de uma instituição de ensino superior, localizada no município de Lajeado, Rio Grande do Sul.

A ETE opera por meio de um sistema compacto de tratamento (Modelo Mizumo Business MB-8) que concentra os processos físico-químicos e biológicos em um único módulo horizontal com compartimentos internos, onde ocorrem todas as fases necessárias ao tratamento do efluente, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 – Estação de Tratamento de Esgoto Modular



Fonte: Ecocasa Tecnologias Ambientais (2014).

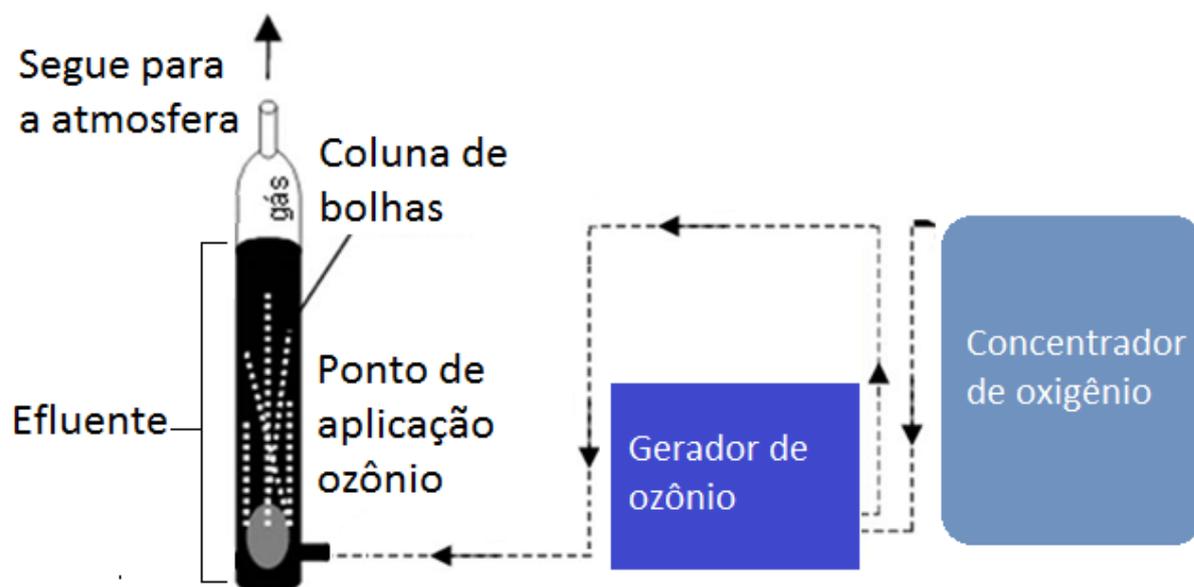
O efluente é oriundo dos banheiros de quatro prédios de uma instituição de ensino de Lajeado, sendo canalizado até a ETE onde recebe tratamento preliminar por meio de gradeamento, para a remoção de sólidos grosseiros, antes de ser encaminhado ao sistema compacto de tratamento.

A coleta da amostra analisada foi feita diretamente no tanque de decantação do sistema modular (identificado na Figura 8 pelo número 9), antes do efluente passar pela desinfecção que, nesta estação, é feita com a utilização de cloro.

4.2 Elaboração do Protótipo

Para validar o projeto proposto elaborou-se um protótipo para a desinfecção do efluente via processo de ozonização. O sistema elaborado foi inspirado no modelo básico de ozonização proposto por Hassemer e Sens (2002), que analisaram a eficiência do uso de ozônio consorciado com processos de coagulação/floculação para o tratamento de efluente oriundo de uma indústria têxtil. A Figura 9 ilustra o modelo com adaptações.

Figura 98 – Modelo básico de um sistema de ozonização



Fonte: Adaptado de Hassemer e Sens, (2002).

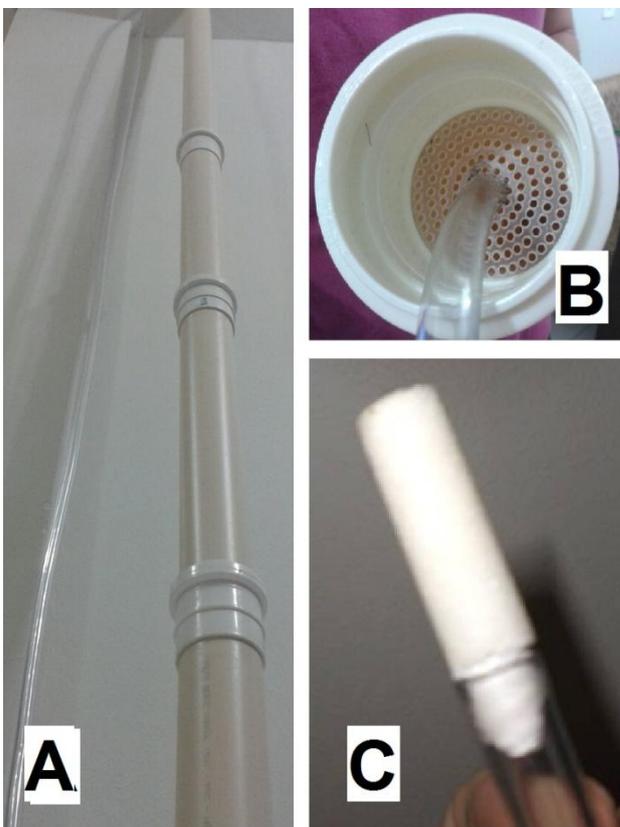
O sistema elaborado é composto basicamente por uma coluna cilíndrica de *polyvinyl chloride* (PVC) de 3,0 m de comprimento e 50,0 mm de diâmetro (FIGURA 10-A). Internamente foram inseridos três discos perfurados e feitos em material plástico, conforme ilustrado na Figura 10-B. Os discos foram elaborados com furos de 2,0 mm, estes discos foram utilizados como barreiras para reduzir a velocidade de passagem do ozônio, bem como difusores das microbolhas do gás, visando ampliar o tempo de contato do mesmo com o efluente, aumentando assim a sua eficiência.

Também integrou o sistema, um gerador de ozônio, modelo AV150 FU14CFS (ALVAP, 2015) e um concentrador de oxigênio (EverFlo) fabricado pela Philips, apresentados na Figura 11.

O concentrador de oxigênio capta o ar atmosférico e o converte em oxigênio (com pureza de aproximadamente 93%), que é utilizado na geração do ozônio. A vazão do gerador de ozônio é de 3,0 g/h.

No gerador de ozônio é acoplada uma mangueira plástica que transfere o ozônio produzido pelo equipamento para o efluente e na sua extremidade foi fixada uma pedra porosa para possibilitar melhor difusão do gás (FIGURA 10-C).

Figura 10 – Protótipo descrito em etapas A: coluna cilíndrica de PVC; B: disco em policarbonato perfurados; C: pedra porosa difusora do gás



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Gerador de ozônio e concentrador de oxigênio



Fonte: elaborada pelo autor.

4.3 Montagem de experimento laboratorial

Considerando que o tempo de contato do ozônio com o efluente é determinante na eficiência do tratamento, o protótipo criado simulou a ozonização por meio de dispositivo em formato cilíndrico com entrada do ozônio sendo de fluxo ascendente. A coluna foi desenvolvida para aplicação de ozônio em três litros de efluente, com isso ela precisou ter 3,0 metros de comprimento, visando reter estes 3,0 litros, mais um possível derramamento do efluente por causa do borbulhamento do processo. A partir da parte inferior foi instalado a cada 40 cm misturadores estáticos, a fim de reter o gás e com isso ter um melhor aproveitamento oxidativo do mesmo. A transferência do ozônio para o efluente foi realizada no protótipo, injetando-se o gás por meio de uma mangueira plástica acoplada ao ozonizador, tendo esta um difusor poroso situado em sua base. O excesso de gás, ou seja, a parcela da mistura gasosa que não ficava retida na massa líquida, saía pelo topo da coluna.

Neste experimento será aplicado o gás ozônio por 15, 30 e 60 minutos, a fim de averiguar a aplicação mais eficiente para um possível reuso deste efluente sanitário.

4.4 Análises realizadas

Na primeira etapa de análises, buscou-se a caracterização inicial do efluente coletado na estação de tratamento, através de análises de pH, Cor aparente, Turbidez, DBO5 e Coliformes Termotolerantes. A segunda etapa consistiu em estas mesmas análises e foram repetidas com o efluente que recebeu ozônio por 15, 30 e 60 minutos.

4.4.1 pH

Para a determinação do pH das amostras avaliadas, utilizou-se o pHmetro, marca DIGIMED, modelo DM-2P. Este pHmetro tem capacidade de medir o potencial de hidrogênio, em uma escala que varia de 0 (acidez máxima) a 14

(basicidade máxima), identificando se a amostra é ácida, básica ou neutra, também mede a voltagem e temperatura (DIGIMED, 2009).

As amostras (efluente coletado na ETE e efluente ozonizado) foram colocadas em dois copos becker de 250 mL, sendo inserido o eletrodo do pHmetro em cada uma das amostras, conforme ilustrado na Figura 12. O valor de pH é informado no visor do equipamento após o contato com a amostra.

Figura 12 – Determinação de pH com uso de pHmetro



Fonte: elaborada pelo autor.

4.4.2 Turbidez

A turbidez é uma propriedade física dos fluidos que ocasiona redução da sua transparência devido à presença de materiais em suspensão que podem ser de origem orgânica ou inorgânica. Para esta análise, utilizou-se o turbidímetro portátil digital, modelo DM-TU, da DIGIMED, sendo adicionados 10,0 mL de cada amostra analisada em um frasco de vidro transparente próprio do equipamento, inserindo-se o mesmo no equipamento e procedendo-se com a leitura (Figura 13). O valor de turbidez é informado no visor em NTU - *Nephelometric Turbidity Unit* (DIGIMED, 2009).

Figura 93 – Análise de turbidez



Fonte: elaborada pelo autor.

4.4.3 Cor Aparente

Na análise de cor aparente (Figura 14), o procedimento adotado é semelhante ao da análise de turbidez, onde 10,0 mL de amostra foram colocados em um frasco de vidro transparente, próprio do equipamento, e na sequência a amostra foi inserida no equipamento para leitura. A unidade deste parâmetro é dada em Pt-Co referindo-se à escala platina-cobalto, que é uma escala padronizada de avaliação da cor, concebida para detectar os tons de amarelo típicos de efluentes urbanos e de águas contendo matéria orgânica (DIGIMED, 2010).

Figura 14 – Análise de cor



Fonte: elaborada pelo autor.

4.4.4 DBO₅

Para a determinação da DBO₅, foi utilizado o aparelho Oxitop, marca WTW modelo Oxitop IS 6. Este equipamento baseia-se na medição de pressão em um sistema fechado, que informa a quantidade de oxigênio consumido pelos microrganismos na degradação da matéria orgânica, em um faixa específica para a leitura da DBO₅ que vai de 0 a 4000 mg/L (WTW, 2008).

As amostras foram adicionadas em frasco volumétrico de 43,5 mL, sendo este o volume indicado para análise de efluentes que contenham de 0 a 2000 mg/L de DBO₅, sendo esta a faixa de efluentes de origem sanitária, conforme o manual do equipamento. Conforme ilustrado na Figura 15-A, transferiu-se o volume medido para garrafa de oxitop e na sequência adicionou-se uma gota de inibidor de nitrificação para inibir a ocorrência de processos químicos na amostra (FUNK; WOCHNIK, 2011). Posteriormente colocou-se, no suporte de borracha acoplado ao frasco, duas pastilhas de hidróxido de sódio (NaOH) que reagem com o dióxido de carbono (CO₂) gerado na decomposição da matéria orgânica, impedindo que a pressão do mesmo seja identificada no resultado da DBO₅ (SANTOS et al., 2003).

As garrafas foram armazenadas em uma incubadora a 20°C (Figura 15-B) e após cinco dias verificou-se o valor de DBO_5 , mostrado no visor. Este valor foi multiplicado por 10, conforme indicações do manual, para então obter-se o valor final deste parâmetro, que é dado em mg/L.

Figura 15 – Análise de DBO_5 através de oxitop – A: preparo da análise; B: garrafas de oxitop armazenadas em incubadora (20°C)



Fonte: elaborada pelo autor.

4.4.5 Coliformes Termotolerantes

Para determinação de coliformes termotolerantes foi utilizada a técnica de tubos múltiplos, que permite a quantificação por “número mais provável” (NMP) e é dividida em duas fases sucessivas, uma presuntiva e outra confirmativa.

Na fase presuntiva foi utilizada uma série de 5 tubos de Lauryl duplo seguida de séries subsequentes de Lauryl simples.

Após homogeneização foram adicionados com pipeta estéril, 10 mL da amostra na primeira série de 5 tubos (Lauryl Duplo). Na segunda série de tubos (Lauryl simples) foi adicionado 1 mL de amostra com auxílio de pipetadora e assim consecutivamente nas séries seguintes.

As amostras foram incubadas a $35 \pm 0,5$ °C, por 48 horas.

Os tubos que apresentaram formação de gás nos tubos de Durham foram submetidos ao teste confirmativo em caldo EC.

Foram passados uma alçada de cada tubo positivo de Lauryl para o tubo correspondente contendo caldo EC com tubos de Durham. As amostras foram incubadas a $45 \pm 0,2$ °C por 48 horas em banho-maria com agitação.

A presença de coliformes termotolerantes é confirmada através da formação de gás em pelo menos 1/10 do tubo de Durham, ou ainda, pela efervescência quando agitado gentilmente. A sequencia obtida foi verificada na tabela de NMP do Standard methods for the examination of water & wastewater, 2012.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 16 mostra o aspecto do efluente bruto e após os três tempos de ozonização (15, 30 e 60 minutos).

Figura 16 – Aspecto do efluente bruto e após receber ozônio nos tempos de 15, 30 e 60 minutos



Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 7 apresenta os resultados das análises em cada uma das amostras avaliadas, nas variáveis físico-químicas: pH, Cor, Turbidez e DBO_5 .

Tabela 7 – Resultados das Análises físico-químicas

| Amostra | pH | Cor (Pt-Co) | Turbidez (NTU) | DBO₅ (mg/L) |
|--------------------------|-----------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Efluente Bruto | 8,75 | 266,00 | 67,50 | 300,00 |
| 15 minutos de ozonização | 8,90 | 139,00 | 134,00 | 200,00 |
| 30 minutos de ozonização | 9,01 | 109,00 | 74,30 | 175,00 |
| 60 minutos de ozonização | 9,08 | 68,50 | 39,50 | 75,00 |

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Tabela 8 são exibidos os resultados das análises referentes aos parâmetros microbiológicos.

Tabela 8 – Resultados das Análises Microbiológicas

| Amostra | Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL) |
|--------------------------|---|
| Efluente Bruto | 700.000.000,00 |
| 15 minutos de ozonização | 350.000,00 |
| 30 minutos de ozonização | 160.000,00 |
| 60 minutos de ozonização | 180,00 |

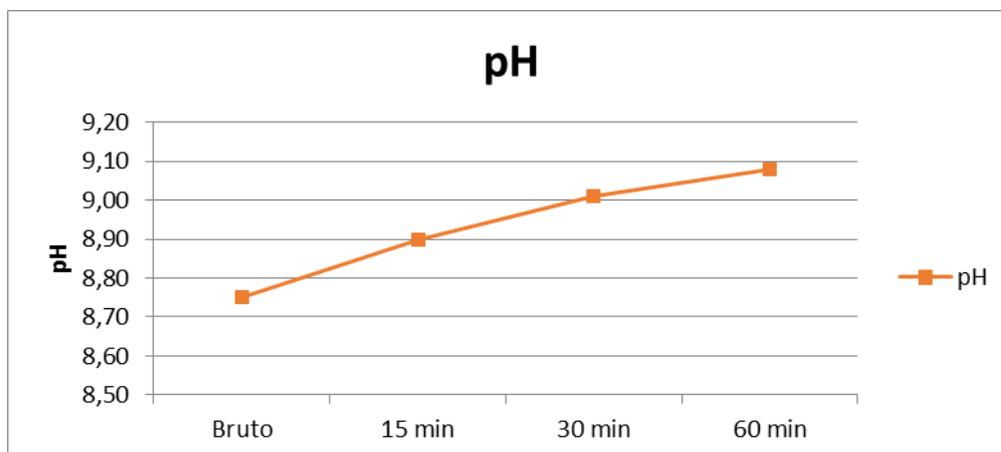
Fonte: elaborada pelo autor.

5.1 pH

O pH (Potencial Hidrogeniônico) caracteriza a intensidade da condição ácida ou básica de um meio. É determinado como o cologarítmo decimal da concentração efetiva ou da atividade dos íons hidrogênio. Esta determinação é feita eletronicamente através da determinação da atividade iônica do hidrogênio (SILVA; OLIVEIRA, 2001).

O Gráfico 1 mostra a variação do pH. Nestes valores, pode se perceber um aumento do ph, este comportamento foi observado por Salla (2006) aplicando ozonio em efluente domestico de reator anaerobico.

Gráfico 1 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro pH



Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 Cor e Turbidez

A cor e a turbidez são dois indicadores da qualidade da água que às vezes estão inter-relacionados. A cor normalmente indica a presença de metais (Fe, Mn), húmus (matéria orgânica oriunda da degradação de matéria de origem vegetal), dentre outras substâncias dissolvidas. A turbidez é uma medida do espalhamento de luz produzido pela presença de partículas coloidais ou em suspensão, relacionadas a substâncias orgânicas ou inorgânicas em suspensão (NIERO, 2011).

Os altos índices de remoção atingidos para estes dois parâmetros são explicados por autores como Greaves, Grundy e Taylor (1988), que afirmam que a oxidação por ozônio é uma opção eficaz para a remoção de cor, pois o mesmo oxida os compostos de peso molecular alto, transformando-os em compostos de menor peso molecular que são facilmente biodegradáveis. Além disso, Languais, Reckhow e Brink (1991) mencionam que o ozônio pode ter a função de romper a superfície celular ou matar vários tipos de algas, sendo assim, gera a liberação de biopolímeros que são os ácidos nucleicos, proteínas e polissacarídeos, sendo esta ação do ozônio.

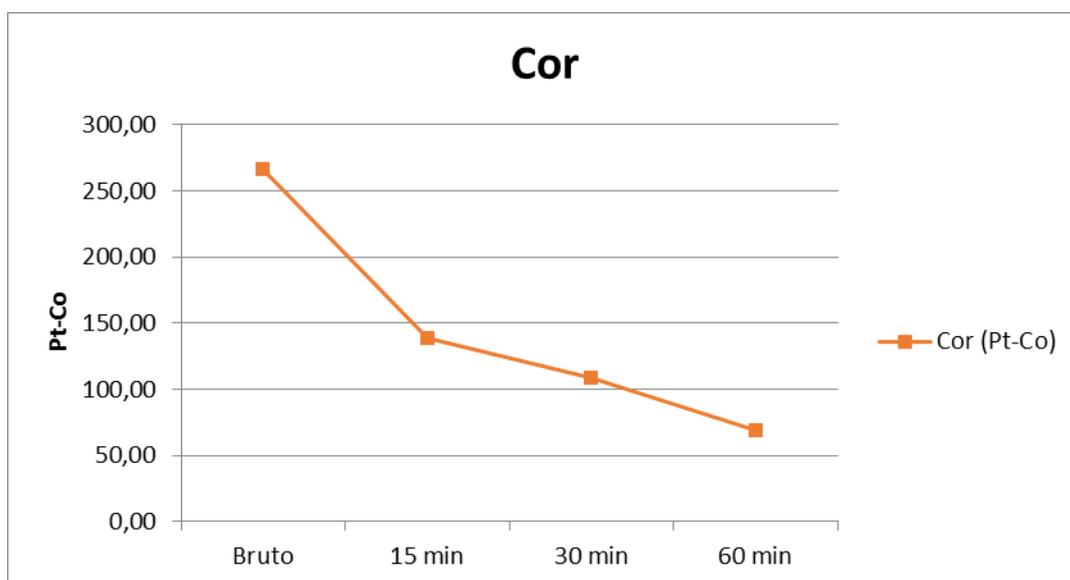
Neste experimento pode-se averiguar uma queda significativa no parâmetro cor, porem o único tempo que ozonização que atingiu o limite da CONAMA N° 357 foi o tempo de 60 minutos de detenção hidráulica, atingindo 68 Pt-Co.

Ao avaliar o parâmetro turbidez, é averiguado que no inicio do processo de ozonização (no tempo de detenção hidráulica de 15 minutos) temos um aumento da turbidez. Segundo Langlais et al (1991) este evento estar diretamente relacionado à liberação destes biopolímeros. Após este liberação destes, com um maior tempo de contato do ozônio, este material se oxida, o que está diretamente relacionada à remoção da turbidez.

A Resolução CONAMA N° 357, não especifica os padrões de lançamento para o parâmetro turbidez para efluentes, porem afirma que todo efluente a ser lançado em corpos da água de classe 2, não poderão causar a elevação da turbidez dos corpos receptores a valores superiores a 100 NTU. Com isso, verifica-se o tratamento com ozônio nos tempos de detenção de 30 e 60 minutos adequaram-se ao padrão exigido pela resolução brasileira (CONAMA, 2005).

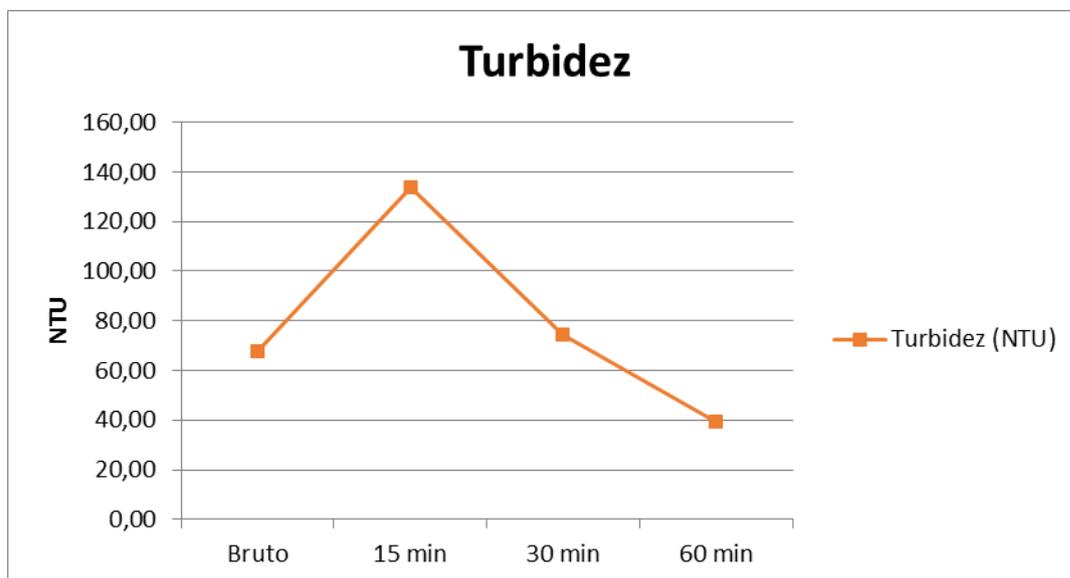
Nos Gráficos 2 e 3 podemos verificar o efeito da ozonização na cor e turbidez do efluente, de acordo com o tempo de detenção hidráulica.

Gráfico 2 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro Cor



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro Turbidez



Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 DBO₅

O Gráfico 4 mostra o comportamento da DBO₅ durante o experimento em relação aos tempo de retenção hidráulica de 15, 30 e 60 minutos.

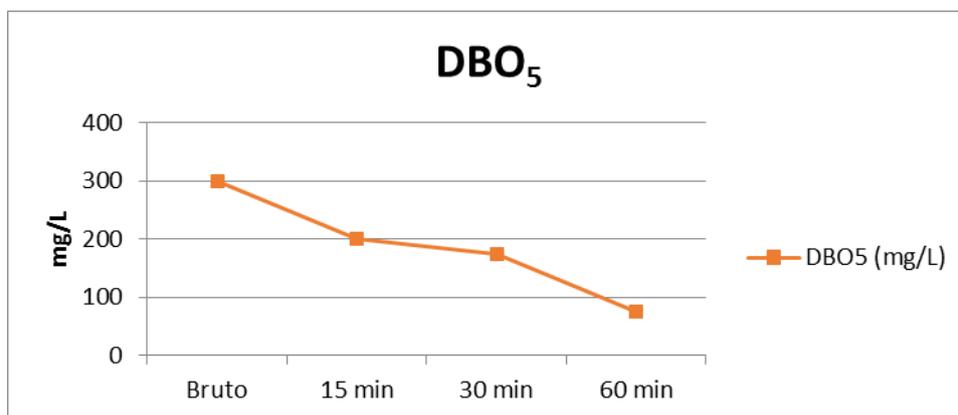
De acordo com Niero (2011), a remoção de DBO₅ está associada à oxidação de matéria orgânica dissolvida durante o processo de ozonização. A promoção de remoções como esta pode ser relevante, pois a matéria orgânica presente em esgotos sanitários é reconhecidamente um fator de poluição das águas (COSTA; DANIEL, 2002). Para este experimento, ao aplicar o ozônio pode-se averiguar uma redução de 33,33% para 15 min, 41,67% para 30 min e 75,00% para 60 min de ozonização.

Conforme CONAMA Nº 357, os experimentos com detenção hidráulica de 15 e 30 minutos se enquadram na classe 4 efluente, enquanto o experimento com detenção hidráulica de 60 minutos pôde se enquadrar na classe 2.

Quando enquadrarmos os resultados do experimento na legislação CONSEMA Nº 128, onde a fixação do padrão de emissão de efluentes para o parâmetro DBO₅

esta fixado em 180 mg O₂/L, os tempos de ozonização com detenção hidráulica de 30 e 60 minutos atingem este parâmetro.

Gráfico 4 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro DBO₅



Fonte: elaborado pelo autor.

5.4 Coliformes Termotolerantes

Nas análises microbiológicas, observou-se eficiência na remoção de Coliformes Termotolerantes de 99,95% para o tempo de 15 minutos de retenção, 99,98% para 30 minutos e 99,99% para a ozonização de 60 minutos, associadas à ação do ozônio como desinfetante. De acordo com Bilotta e Daniel (2011), resultados como estes explicam o interesse na utilização de ozônio para inativação de microrganismos patogênicos.

Lima e Kollnberger (2009) sustentam que o ozônio, quando aplicado na água, age como um poderoso oxidante de contaminante. A ação do Ozônio é extremamente rápida (<0,1s) e não seletiva (mata todos micro-organismos: bactérias, fungos, bolores, vírus, etc.).

Chernicharo et al. (2001) ressalta que, se tratando de coliformes, a presença destes em quantidades muito altas é usual em esgotos sanitários e, portanto, são necessárias eficiências de remoção também elevadas, usualmente na faixa de 99,99 a 99,999%, para o atendimento aos padrões de qualidade microbiológica, conforme ilustrado na Tabela 9.

O reuso da água resultante do tratamento do esgoto doméstico seguido da ozonização no tempo de 60 minutos de detenção hidráulica pode se classificar como padrão classe 1, já os tempos de 15 e 30 minutos de detenção hidráulica não atende o grau de qualidade para que possa ser utilizada como potável (classe especial 1, 2 e 3), mas é sanitariamente segura para fins que não exijam sua potabilidade (classe 4) conforme a resolução CONAMA (nº 357/2005). Dentre esses fins citam-se alguns como: irrigação, paisagístico e doméstico.

Tabela 9 – Padrões de qualidade microbiológica de águas

| Parâmetro | Padrão de Potabilidade ⁽¹⁾ | Padrão para corpo d'água ⁽²⁾ | | | |
|------------------------------|---------------------------------------|---|----------|----------|----------|
| | | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 |
| <i>E. Coli</i> ou Coliformes | Ausência em 100 mL | 200 | 1000 | 4000 | - |
| Termotolerantes | | | | | |

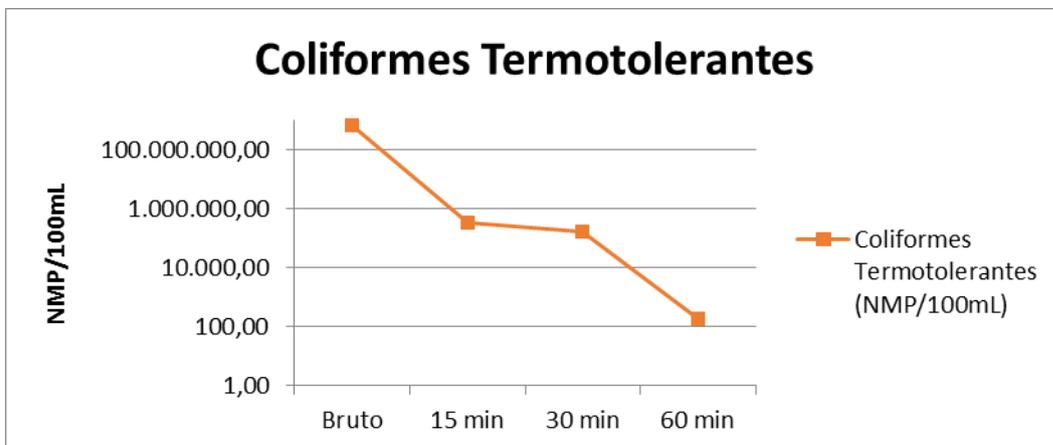
⁽¹⁾ De acordo com a Portaria nº 518, 25/03/2004, do Ministério da Saúde

⁽²⁾ De acordo com a Resolução CONAMA nº 357, 17/03/2005 (Unidade: NMP/100mL)

Fonte: elaborado pelo autor.

Mesmo havendo remoção de coliformes termotolerantes em todos os experimentos, a ozonização do efluente por 60 minutos teve uma remoção de 99,99% em relação à amostra de efluente bruto, podendo se enquadrar no padrão de qualidade de água classe 1, os tempos de contatos do ozônio com o efluente por 15 e 30 minutos se enquadraram no padrão de qualidade de água classe 4, estes efluentes são sanitariamente seguros para fins que não exijam sua potabilidade conforme a resolução CONAMA (nº 357/2005). Dentre esses fins citam-se alguns como: irrigação, paisagístico e doméstico.

Gráfico 5 – Comparativo entre o efluente bruto e o efluente ozonizado para o parâmetro Coliformes Termotolerantes



Fonte: elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÕES

A reutilização das águas residuárias pode ser uma importante ferramenta no gerenciamento dos recursos hídricos e de políticas ambientais, porém no Brasil, esta prática ainda é pouco adotada e não há legislação específica que regule a prática. Em relação aos efluentes de esgoto tratado, poucas são as iniciativas em reuso. Águas provenientes do reuso representam uma fonte hídrica alternativa para satisfazer parte da demanda crescente nas grandes cidades e para solucionar parte do problema de escassez, mas ainda não se tem parâmetros específicos e normas que regulamentem o reuso de águas residuárias, por isso foi necessária a comparação com legislações que não tratam especificamente de efluentes tratados com a finalidade de reuso.

Os resultados verificados nos testes propostos por este trabalho indicam a viabilidade da utilização de ozônio como uma alternativa para o polimento final de efluentes, uma vez que o experimento com 60 minutos de ozonização obteve remoções altas para os parâmetros físico-químicos (74,25% na remoção de cor, 41,48% na remoção de turbidez, 75,00% na redução da DBO₅) e microbiológicos (99,99% na remoção de coliformes termotolerantes) do efluente analisado.

Comparando os resultados obtidos com os padrões estabelecidos pela Resolução nº 357 (CONAMA, 2005), que classifica os corpos hídricos, obteve-se uma grande variação, não sendo o possível o enquadramento em uma única classe. Da mesma forma não é possível seu enquadramento deste efluente na CONSEMA Nº 128, pois com ozonização de 60 minutos de tempo de detenção hidráulica, apesar de termos uma redução significativa para os parâmetros de cor, turbidez,

DBO₅ e coliformes termotolerantes, a elevação de 3,77% do pH (passou de 8,75 para 9,08) não permite seu simples lançamento em corpos hídricos, o que se sugere é uma correção deste parâmetro após a ozonização.

Futuros estudos devem focar no custo de aplicação desta tecnologia, bem como outras formas de aplicação, uma vez que o modelo de batelada se mostra difícil quando temos um efluente com geração contínua. Outro ponto que deve ser visto é o comportamento da toxicidade durante a aplicação do ozônio em efluentes.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. et al. Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. **Química Nova**, v. 27, n. 5, p. 818–824, 2004.

ALVAP. **Manual de Instruções**. Gerador de ozônio. Lajeado. 2015. FOLDER.

AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. M.; MOREIRA, R. F. P. M. Comparação entre diferentes Processos Oxidativos Avançados para degradação de corante azo. **Revista de Eng. Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 4, p. 543-550, out-dez. 2009.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater**. 22. nd Edition. Método 9221 B., p. 9-66. Washington: APHA, 2012.

ARAÚJO, K. S. de et al. **Processos Oxidativos Avançados: fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais e efluentes industriais**. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Belo Horizonte – MG, 2014. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2014/II-033.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2015.

ARCHELA, E. et al. Considerações sobre a geração de efluentes líquidos em centros urbanos. **Geografia**. v. 12, n. 1, 2003.

ARMAROLI, J. G.; **Nova abordagem de ozonizadores para tratamento de água e esgoto por descarga corona**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO MINISTÉRIO PÚBLICO DO MEIO AMBIENTE. **ONU declara 2013 como o ano internacional da cooperação pela água**. 2015. Disponível em: <<http://abrampa.jusbrasil.com.br/noticias/100307072/estresse-hidrico-o-brasil-ja-sente-os-reflexos-da-escassez-de-agua>> Acesso em: 15 abr. 2015.

ÁVILA, R. O. de. **Avaliação do desempenho do sistema tanque séptico-filtro anaeróbio com diferentes meios suportes**. 2005. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

BAUN, A. et al. Natural attenuation of xenobiotic organic compounds in a landfill leachate plume (Vejen, Denmark). **Journal of Contaminant Hydrology**. v. 65, p. 269-291, 2003.

BASSANI, L.; **Desinfecção de Efluente Sanitário por Ozônio: Parâmetros Operacionais e Avaliação Econômica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

BILLOTA, P.; DANIEL, L. A. Inativação de indicadores microbiológicos com ozônio no tratamento de esgoto sanitário visando o reuso de água. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica**. v. 4, n. 2, p. 48-56, 2011.

BRASIL. **Lei nº 11.445**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, de 05 de janeiro de 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 20 maio 2015.

CHERNICHARO, C. A. L.; et al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de desinfecção**. Cap. 07, p. 1-66. PROSAB. UFMG, 2001. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/prosab/pos_tratamento.htm>. Acesso em: 17 maio 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Compilação de técnicas de prevenção à poluição nas indústrias do setor têxtil**. Manuais Ambientais. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ambiente/prevencao_poluicao/download/compilacao_textil.pdf> Acesso em: 21 abr. 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **O problema da escassez de água no mundo**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/37-O-Problema-da-Escassez-de-%C3%81gua--no-Mundo>> Acesso em: 20 maio 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Reuso da água**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/gesta_reuso.asp>. Acesso em: 02 jun. 2015.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO (CASAN). Disponível em: <<http://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/ete-estacao-de-tratamento-de-esgotos-sanitarios#0>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (COPASA). **Esgotamento Sanitário**. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=34>>. Acesso em 07 maio 2015.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO (COMPESA). **Esgotamento Sanitário**. 2012. Disponível em: <<http://www.compesa.com.br/saneamento/esgotamentosanitario>>. Acesso em 07 maio 2015.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 357**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 14 maio 2015.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 430**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 14 maio 2015.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH), **Resolução nº 54**, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14>. Acesso em: 11 out. 2015.

COSTA, H. S; DANIEL, L. A. **Ozonização de águas residuárias domiciliares após tratamento anaeróbio** - Estudo preliminar. VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vitória - Espírito Santo, 2002.

CUNHA, A. H. N. et al.; O reúso de água no Brasil: a importância da reutilização de água no país. **Enciclopédia Biosfera**. Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 7, n. 13, 2011.

DEZOTTI, M. **Técnicas de controle ambiental em efluentes líquidos** - Processos Oxidativos Avançados. Escola Piloto Virtual, PEQ, COPPE, UFRJ, 2003.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

DIAS, I. C. L. et al. Tratamento de Efluentes Domésticos: alternativas técnicas e educacionais para melhor uso da água. **Educação Ambiental em Ação**. n. 41, 2012. Disponível em: <<http://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=1339>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

DIGIMED. Instrumentação Analítica. **Manual de Instruções**. Medidor de pH, voltagem e temperatura. São Paulo. 2009. CD ROM.

DIGIMED. Instrumentação Analítica. **Manual de Instruções**. Turbidímetro DM-TU. São Paulo. 2009. CD ROM.

DIGIMED. Instrumentação Analítica. **Manual de Instruções**. Colorímetro para medidas de cor. São Paulo. 2010. CD ROM.

ECOCASA TECNOLOGIAS AMBIENTAIS. **Tratamento Biológico de Esgoto**. Limeira, São Paulo. Disponível em: <<http://www.ecocasa.com.br/tecnologia-ambiental-em-tratamento-biologico-de-esgoto.asp>>. Acesso em: 05 maio 2015.

FLORENCIO, L.; BASTOS X. K. R.; AISSE M. M. **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. 1. ed. Rio de Janeiro: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 2006.

FORNARI, A. M. D. **Geração de microbolhas de ozônio através de materiais porosos para aplicação em tratamento de efluentes**. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

FUNK, P.; WOCHNIK, P. **DBO – Um Parâmetro Global Observado de Perto**. Relatório de Aplicação UW-002, umwelt. 10 p. Blumenau, 2011.

GALLI, C. S.; ABE, D. S. **Disponibilidade, poluição e eutrofização das águas**. IIEGA, Associação Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental. São Paulo: 2009. Disponível em: <<http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-816.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

GONÇALVES, R. F. et al. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 438p.

GREAVES, G. F.; GRUNDY, P. G.; TAYLOR, G. S. **Ozonation and slow sand filtration for the treatment of coloured upland waters - pilot plant investigations**. In: **Slow Sand Filtration**. Recent Development in Water Treatment Technology, Graham, N.J.D. ed. Ellis Horwood Limited. Great Britain, 153-162p. 1988.

HASSEMER, M. E. N. **Tratamento de efluente têxtil: processo físico-químico com ozônio e floculação em meio granular**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

HASSEMER, M. E. N.; SENS, M. L. Tratamento do efluente de uma indústria têxtil: processo físico-químico com ozônio e coagulação/floculação. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 7, n.1, p. 30-36, 2002.

HESPAHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. **Revista de Estudos Avançados**. São Paulo, v. 22, n. 63, 2008, p. 131 – 158.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO AMBIENTAL (INPA). Projeto Água. Disponível em: <http://www.inpa.org.br/projeto_agua.htm>. Acesso em: 10 mai. 2015.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

KUNZ, A. et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

KURNIAWAN, T. A.; LO, W.; CHAN, G. Y. S. Radicals-catalyzed oxidation reactions for degradation of recalcitrant compounds from landfill leachate. **Chemical Engineering Journal**, v. 125, p. 35-57, 2006.

LANGUAIS, B.; RECKHOW, D. A.; BRINK, D. R. Ozone in water treatment In: Application and engineering. **Lewis Publishers**, Chelsea, v. 1, p. 1137-1163, 1991.

Lei n.º 9.433 de 08/01/97 que trata da Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasil. LEMOS, P. R.; FAGUNDES, R. M.; SCHERER, M. J. **Reaproveitamento de água para fins não potáveis em habitações de interesse social**. X Salão de Iniciação Científica. PUC-RS. Porto Alegre, 2009. Disponível em: <http://www.pucrs.br/edipucrs/XSalaolC/Ciencias_Sociais_Aplicadas/Arquitetura_e_Urbanismo/70444-PAULO_ROGERIO_LEMOS.pdf>. Acesso em: 25 maio 2015.

LIMA, Erlon; KOLLNBERGER, Gerhard. **Tecnologias modernas para desinfecção de água e esgotos**. São Paulo : Proquim. Disponível em: <http://www.proquimuv.com.br/fr_artigos.htm>. Acesso em 07 nov. 2013.

LIMA, M. O.; AISSE, M. M. **Projeto, construção e monitoramento de reatores de ozonização para desinfecção de efluentes sanitários**. Curitiba: Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2003.

LINDSEY, M. E. et al. Enhanced Fenton degradation of hydrophobic organics by simultaneous iron and pollutant complexation with cyclodextrins. **Science of the Total Environment**, v. 307, p. 215-229, 2003.

MENEZES O. D. de.; SILVINO, G.; NETO C. A. **Orientações Básicas para Operação de Estações de Tratamento de Esgoto**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: 2006. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/ETE%202.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2015.

METCALF; EDDY. Wastewater Engineering. **Treatment, Disposal and Reuse**. Singapura: McGraw-Hill, 2003.

MIERZWA, J. C.; HEPANHOL, I. **Água na Indústria: uso racional e reuso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (MS), **Portaria Nº 518**, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011> Acesso em: 01 nov. 2015.

NIERO, R. **Viabilidade do uso de ozônio no tratamento de efluentes têxteis**. Estudo de caso: Riccieri Confecções, Morro da Fumaça – SC. Monografia (Graduação) – UNESC, 2011.

NOZAKI, V. T. de. **Análise do Setor de Saneamento Básico no Brasil**. Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/96/96131/tde-25072007-152652/pt-br.php>>. Acesso em: 30 abr. 2015.

OENNING JR., A., PAWLOWSKY, U. Evaluation of advanced technologies for water reuse in mechanical industry. **Sanitary Engineering and Environmental**. v. 12, n. 3, p. 305–316, 2007.

OKTE ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA. **Tecnologias com Ozônio**. 2009. Disponível em: <http://www.okte.com.br/Tecnologias/Ozonio_Hist.htm>. Acesso em: 20 maio 2015.

OLIVEIRA, M. D. **Desenvolvimento de sistema informatizado para avaliação de impacto ambiental**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo. 2004.

OLLER, I; MALATO, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. A. Combination of Advanced Oxidation Processes and Biological Treatments for Wastewater Decontamination: a review. **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 4141-4166, 2011.

RAMOS, M; JOHNSON, R. M. F. **Água, gestão e transição para uma economia verde no Brasil - Propostas para o setor público**. 2012.

RICE, R. G. **Principles and practices of chemical oxidation in wastewater treatment**. Nashville, Tennessee, 1996.

RIBEIRO, W. J.; ROOKE, S. M. J. **Saneamento Básico e sua relação com o meio ambiente e a saúde pública**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais: 2010. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/analiseambiental/files/2009/11/TCCSaneamentoeSa%C3%BAde.pdf>>. Acesso em 31 maio 2015.

RODRIGUES, R. S. **As Dimensões Legais e Institucionais de Reúso de Água no Brasil: Proposta de Regulamentação do Reúso no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

SALLA, M. R. **Sistema de ozonização em esgoto de reator anaeróbio: estudo de hidrodinâmica e das respostas oscilantes de DQO**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SANTOS, J. E. **Difusão e cinética de decomposição do ozônio no processo de fumigação de grãos de milho**. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2008.

SANTOS, E. O.; SALES, P. R.; DUARTE, M. M. B. **Estudo Comparativo Entre as Técnicas de Diluição e Manométrica na Quantificação da Demanda Bioquímica de Oxigênio**. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. Santa Catarina, 2003.

SCHIAVON, G. J. et al. **Projeto e análise de um sistema gerador de ozônio para remoção de cor de efluente têxtil**. XXXIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Salvador, 2012.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2. ed. ANEEL. ANA. Brasília – Distrito Federal, 2001.

SILVA, A. C. **Degradação de corantes em meio salino por ozonização**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SILVEIRA, I. C. T. **Cloro e ozônio aplicados a desinfecção de efluente hospitalar tratado em contadores biológicos rotatórios, com avaliação de efeitos tóxicos em *Daphnia Similis***. Tese (Doutorado) – Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. de O. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande: Paraíba, 2001.

SOARES, S. R. **Qualidade de Água II** – Apostila. p 187. 1997.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. de M. **Gestão da Água no Brasil**. Brasília – UNESCO, 2001.

TEIXEIRA, C. P. A. B.; JARDIM, W. F. **Processos oxidativos avançados; Conceitos teóricos**. Caderno Temático, vol. 3. UNICAMP. 2004.

UNIVATES. Site Institucional. **Laboratório Unianálises**. Disponível em: <<https://www.univates.br/unianalises/o-unianalises>>. Acesso em: 11 maio 2015.

WTW. Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH. Manometrische BSB-Meßgeräte. **Manual de Instruções**. Germany. 2008. p. 23.

VICQ, R. de; LEITE, M. G. P. Avaliação da implantação de fossas sépticas na melhoria na qualidade de águas superficiais em comunidades rurais. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 19, n. 4, p. 411-16, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v19n4/1413-4152-esa-19-04-0411.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. 2. ed. ampl. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2002.

XU, P. et al. Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. **Water Research**, v.36, p. 1043-1045, 2002.