

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL  
SHS-0342 - TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ERALDO KOBAYASHI DOS SANTOS

**Resistência de cistos de *Giardia* spp., Coliformes totais e  
*Escherichia coli* às desinfecções sequenciais cloro-radiação  
ultravioleta e ozônio-radiação ultravioleta**

São Carlos

2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
ENGENHARIA AMBIENTAL

**Resistência de cistos de *Giardia* spp., Coliformes totais e  
*Escherichia coli* às desinfecções sequenciais cloro-radiação  
ultravioleta e ozônio-radiação ultravioleta**

Aluno: Eraldo Kobayashi dos Santos  
Orientador: Eng. Raphael Corrêa Medeiros

Monografia apresentada ao curso de  
graduação em Engenharia Ambiental da  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo.

São Carlos  
2011

É VEDADA A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

3237r

Santos, Eraldo Kobayashi dos  
Resistência de cistos de Giardia spp, coliformes  
totais e Escherichia coli às desinfecções sequenciais  
cloro-radiação ultravioleta e ozônio-radiação  
ultravioleta / Eraldo Kobayashi dos Santos; orientador  
Raphael Corrêa Medeiros. -- São Carlos, 2011.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, 2011.

1. Giardia - resistência. 2. Coliformes -  
resistência. 3. Cloro. 4. Ozônio. 5. Radiação  
ultravioleta. 6. Desinfecção. I. Título.

## AGRADECIMENTOS

Ao Raphael Corrêa Medeiros, pela paciência nos ensinamentos, pelo apoio ao meu trabalho e toda dedicação existente nesses dois anos de projeto.

Ao Prof. Dr. Luiz Antônio Daniel, pela oportunidade da pesquisa e crescimento acadêmico, pela paciência em diversas reuniões e por aconselhar os melhores caminhos. À ambos, meu respeito e gratidão.

À minha mãe, Tereza Kobayashi, por todo amor, incentivo, ajuda e, principalmente, por sempre acreditar em mim.

Às minhas irmãs, Karen e Michele, por todo auxílio e estímulo.

À Amábile Batisteti, por todo carinho, companheirismo, compreensão e pelo apoio incondicional.

Ao pessoal do LATAR, por toda a ajuda em minhas dúvidas corriqueiras.

À Maria Teresa, técnica do LATAR, por toda paciência e ajuda nas análises.

Aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP por todo o crescimento intelectual.

Ao pessoal da república, por serem a minha família neste período de faculdade.

À turma de Engenharia Ambiental, pelos momentos de estudo, descontração e grande amizade.

À Andressa, Bianca, Daniel e Juliana pelos diversos estudos noturnos.

Ao CNPq pelas duas bolsas concedidas.

À FAPESP processo 2007/08499-3 pelo financiamento da pesquisa.

E a todos, que direta ou indiretamente, me apoiaram durante todo o projeto.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVO.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1	Organismos Patogênicos .....	4
3.2	Desinfetantes .....	6
3.2.1	Ozônio.....	7
3.2.2	Cloro.....	11
3.2.3	Radiação Ultravioleta.....	13
3.3	Desinfecção Conjugada.....	15
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	16
4.1	Ensaios de Desinfecção.....	16
4.1.1	Desinfecção com Ozônio .....	17
4.1.2	Desinfecção com Cloro.....	21
4.1.3	Desinfecção com Radiação Ultravioleta.....	23
4.1.4	Desinfecção Sequencial .....	25
4.2	Exames Microbiológicos .....	25
4.2.1	Quantificação de coliformes totais e <i>E. coli</i> .....	25
4.2.2	Quantificação de <i>Giardia</i> spp.....	25
4.3	Análise dos parâmetros físico-químicos .....	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1	Calibração da coluna de ozonização .....	32
5.2	Balanço de Massa do Ozônio.....	33
5.3	Exames Físico-químicos .....	35

5.4	Exames Microbiológicos .....	40
5.4.1	<i>E. Coli</i> e Coliformes Totais .....	40
5.4.2	<i>Giardia</i> spp. .....	43
5.5	Sinergismo .....	46
6	CONCLUSÕES .....	48
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	49

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 3.1- Concentração por Tempo de Exposição e possíveis efeitos nos seres humanos .....	9
Figura 4.1- Fluxograma dos ensaios de desinfecção realizados .....	16
Figura 4.2- Reator de desinfecção ultravioleta.....	23
Figura 5.1- Curva de Calibração do Gerador de Ozônio.....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Métodos Analíticos empregados para análises físico-químicas .....	30
Tabela 5.1 – Produção de Ozônio pelo equipamento gerador de ozônio .....	31
Tabela 5.2 – Balanço de massa dos ensaios com ozônio.....	33
Tabela 5.3 – Taxa de consumo e CT dos ensaios com ozônio .....	33
Tabela 5.4 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio I .....	34
Tabela 5.5 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio II.....	34
Tabela 5.6 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio III.....	35
Tabela 5.7 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio IV .....	35
Tabela 5.8 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio V.....	35
Tabela 5.9 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio VI .....	36
Tabela 5.10 – Características Físico-Químicas da desinfecção com ozônio – Ensaio VII ..	37
Tabela 5.11 – Características Físico-Químicas da desinfecção com ozônio – Ensaio VIII.	37
Tabela 5.12 – Características Físico-Químicas da desinfecção com ozônio – Ensaio IX....	38
Tabela 5.13 – Características Físico-Químicas da desinfecção com ozônio – Ensaio X.....	38
Tabela 5.14 – Resultados da desinfecção de bactérias com a utilização de cloro .....	39
Tabela 5.15 – Resultados da desinfecção de bactérias com a utilização de radiação ultravioleta .....	40
Tabela 5.16 – Resultados da desinfecção de bactérias por desinfecção sequencial cloro-ultravioleta .....	40
Tabela 5.17 – Resultados da desinfecção de bactérias com a utilização de ozônio .....	41
Tabela 5.18 – Resultado da desinfecção de bactérias com utilização de radiação ultravioleta .....	41
Tabela 5.19 – Resultado da desinfecção de bactérias por desinfecção sequencial ozônio – radiação ultravioleta.....	41
Tabela 5.20 – Resultados da inativação de <i>Giardia</i> spp. utilizando cloro .....	42

Tabela 5.21 – Resultados da inativação de <i>Giardia</i> spp. utilizando radiação ultravioleta ..	<b>43</b>
Tabela 5.22 – Resultados da inativação de <i>Giardia</i> spp por desinfecção sequencial cloro - ultravioleta.....	<b>43</b>
Tabela 5.23 – Resultados da inativação de <i>Giardia</i> spp. utilizando ozônio.....	<b>44</b>
Tabela 5.24 – Resultados da inativação de <i>Giardia</i> spp. utilizando radiação ultravioleta ..	<b>44</b>
Tabela 5.25 – Resultados da inativação de <i>Giardia</i> spp. por desinfecção sequencial ozônio - ultravioleta.....	<b>45</b>
Tabela 5.26 – Sinergismo na desinfecção seqüencial Cloro – Radiação UV .....	<b>45</b>
Tabela 5.27 – Sinergismo na desinfecção seqüencial Ozônio – Radiação UV .....	<b>45</b>

## RESUMO

SANTOS, E.K. **Resistência de cistos de *Giardia* spp., Coliformes totais e *Escherichia coli* às desinfecções sequenciais cloro-radiação ultravioleta e ozônio-radiação ultravioleta.** 2011. Monografia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Uma das grandes preocupações atuais na qualidade das águas é o lançamento de esgoto *in natura* ou insuficientemente tratado com elevada carga de organismos patogênicos. Uma forma de restringir a sua disseminação é através do monitoramento controlado das águas naturais em conjunto com a utilização de diferentes tecnologias de desinfecção em águas residuárias. Uma maior eficácia do que a aplicação individual de desinfetantes pode ser encontrada na utilização dos mesmos em sequência. A proposta desta pesquisa foi avaliar o efeito da desinfecção seqüencial com cloro – radiação ultravioleta e ozônio – radiação ultravioleta sobre cistos de *Giardia* spp., coliformes totais e *Escherichia coli*, e verificar a ocorrência de processos sinergéticos. Para este estudo, os ensaios foram em batelada, utilizando concentrações de cloro de 10 e 20 mg.L<sup>-1</sup> com tempos de contato de 10 e 20 minutos; dose de radiação ultravioleta de 2,5 Wh.m<sup>-3</sup> e concentrações de ozônio de 5 e 10 mg.L<sup>-1</sup>. Efeitos sinérgicos foram observados para *Giardia* spp., mas não nos organismos *E. coli* e coliformes totais nas doses utilizadas.

**Palavras-chave: Sinergismo, desinfecção sequencial, *Giardia* spp., cloro, ozônio, radiação ultravioleta.**

## ABSTRACT

**SANTOS, E.K. Resistance of *Giardia* spp cysts, total coliforms and *Escherichia Coli* to the sequential disinfections chlorine – ultraviolet radiation and ozone – ultraviolet radiation.** 2011. Monograph, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

One of the current greatest concerns in water quality is the disposal of wastewater raw or insufficiently treated with high concentration of pathogenic organisms. One method of restricting its dissemination is through controlled monitoring of natural waters in addition to different disinfection technologies in wastewaters. A higher efficacy than individual application of disinfectants may be found in the utilization of those in sequence. The proposition of this research was to evaluate the sequential disinfectants effects with chlorine – ultraviolet radiation and ozone – ultraviolet radiation over *Giardia* spp cysts, total coliforms and *Escherichia coli*, and to verify the occurrence of synergic processes. To this study, the essays were made in batch, using concentrations of 10 and 20 mg.L<sup>-1</sup> of chlorine with contact times of 10 and 20 minutes; dose of 2,5 Wh.m<sup>-3</sup> of ultraviolet radiation and ozone concentrations of 5 and 10 mg.L<sup>-1</sup>. Synergic effects were observed to the *Giardia* spp., but not to the *E. coli* and total coliformes organisms in the used doses.

**Keywords:** Synergism, sequential disinfection, *Giardia* spp., chlorine, ozone, ultraviolet radiation.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento e desenvolvimento das cidades não tem apenas melhorado a qualidade de vida da sociedade, como tem trazido consigo diversos problemas ambientais. A geração de resíduos, sólidos, líquidos e gasosos, é cada vez maior, e com composição cada vez mais complexa, dificultando o tratamento desses resíduos, e colocando em risco a saúde dos seres vivos.

Um dos recursos mais afetado pelo despejo de resíduos contaminantes é a água. A água que é contaminada, de uma maneira geral, é a mesma usada para o abastecimento e suprimento da necessidade dos seres vivos. Deste modo, a grande deficiência no setor de saneamento básico em várias regiões brasileiras vem sendo um fator na exposição direta de um grande número de pessoas ao esgoto sanitário. Este quadro deficiente na barreira sanitária tem forte influência nos indicadores de saúde, muito abaixo dos padrões mínimos da dignidade humana em várias regiões brasileiras (GONÇALVEZ *et al.*, 2003).

O contato com organismos patogênicos e, consequente, infecção por doenças veiculadas pela água pode ser causada: pela ingestão direta de água não tratada, ou com tratamento de má qualidade; ingestão de alimentos contaminados; ou contato da pele com água e solo contaminados. Sendo assim, para o abastecimento, a recreação e a irrigação, são necessários o controle e o monitoramento da água, do solo, entre outros, para evitar que estas rotas de transmissão sejam concretizadas.

Há evidências de transmissão de giardíase e criptosporidiose via abastecimento de água (incluindo a tratada) para consumo humano, visto a relativa facilidade de transpasse dos cistos e oocistos em unidades de filtração e resistência à cloração (BASTOS *et al.*, 2003).

Em todos os casos citados, as excretas e, em especial, os esgotos sanitários são as principais fontes de contaminação dos corpos d'água e do solo, transmitindo grande quantidade de bactérias, vírus, protozoários e helmintos patogênicos aos seres humanos. Mais recentemente entraram em foco as chamadas doenças “emergentes”, na forma de zoonoses, estabelecendo vínculos de transmissão importantes entre o homem e dejetos de animais. (GONÇALVEZ *et al.*, 2003).

Existe hoje uma grande preocupação em relação ao grau de tratamento e ao destino final dos esgotos, suas consequências sobre o meio ambiente, à qualidade das águas, e seu reúso. Este é um assunto que chama a atenção não apenas dos engenheiros,

especialistas e técnicos, mas igualmente das organizações ambientalistas e comunitárias, e da sociedade. Tendo em conta este aspecto, os estudos, critérios e projetos, relativos ao tratamento e à disposição final dos esgotos, deverão ser precedidos de cuidados especiais que garantam o afastamento adequado dos esgotos, e igualmente a manutenção e melhoria dos usos e da qualidade dos corpos receptores (JORDÃO; PESSOA, 2007).

Segundo estudos feitos pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), os gastos anuais diretos do Sistema Único de Saúde (SUS) com tratamento de doenças disseminadas pela falta de saneamento básico chegavam a 300 milhões de reais. De acordo com o mesmo estudo, a cada quatro milhões de reais investidos no sistema de saneamento, 10 milhões de reais eram economizados em internações em hospitais. Isso mostra a necessidade de pesquisas e avanço nas tecnologias de tratamento de água e de esgoto para a melhoria da mesma (BNDES, 1996).

Pesquisas para a restrição da disseminação de alguns organismos patogênicos como a *Giardia* spp. e o *Cryptosporidium* spp. devem incluir a etapa de desinfecção. Dentre os principais desinfetantes usados nas estações de tratamento de esgoto destacam-se o cloro, a radiação ultravioleta e o ozônio.

O desempenho de determinado processo de desinfecção depende da resistência de cada organismo patogênico ao agente desinfetante, por possuirem diferentes comportamentos e sensibilidades quanto à dose e o tempo de contato. Considera-se que a eficiência da desinfecção resulte da oxidação ou da ruptura da parede celular, com consequente desintegração das células, e da difusão de um agente no interior da célula, o qual interfere na sua atividade. A desinfecção é um processo seletivo, isto é, não destrói todas as formas vivas e tampouco elimina todos os organismos patogênicos (DI BERNARDO, 2005). A destruição completa das formas vivas é denominada esterilização, não sendo necessário para o cumprimento da legislação. A utilização de métodos sequenciais de desinfecção é uma alternativa altamente promissora, sendo uma possível solução para maior eficácia e desempenho no papel de restringir a poluição de mananciais com organismos patogênicos, principalmente os de difícil inativação como protozoários e helmintos.

## 2 OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivos principais:

- Avaliação do efeito da desinfecção sequencial com ozônio – radiação ultravioleta sobre cistos de *Giardia* spp., *E. coli* e coliformes totais.
- Avaliação do efeito da desinfecção sequencial com cloro – radiação ultravioleta sobre cistos de *Giardia* spp., *E. coli* e coliformes totais.
- Avaliar efeitos sinérgicos sobre os microrganismos *Giardia* spp., *E. coli* e coliformes totais.

Como objetivos específicos:

- Avaliação do efeito da desinfecção com cloro sobre cistos de *Giardia* spp., *E. coli* e coliformes totais.
- Avaliação do efeito da desinfecção com ozônio sobre cistos de *Giardia* spp., *E. coli* e coliformes totais.
- Avaliação do efeito da desinfecção com radiação - ultravioleta sobre cistos de *Giardia* spp., *E. coli* e coliformes totais.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ORGANISMOS PATOGÊNICOS

A identificação e contagem de microrganismos nos corpos d'água são de particular interesse em relação aos aspectos de proteção da saúde pública. Entre os principais organismos encontrados nos corpos d'água e no esgoto estão bactérias, fungos, algas, protozoários, vírus, plantas e animais. Destes, apresentam importância particular aqueles capazes de causar doença ao homem, os chamados organismos patogênicos, ou simplesmente patógenos, que costumam ser expelidos juntamente com os excrementos do homem ou dos animais de sangue quente que estejam infectados ou sejam portadores de uma doença (JORDÃO; PESSOA, 2009).

A diversidade e a quantidade dos organismos patogênicos no esgoto dependem de vários fatores, dentre os quais a quantidade de indivíduos infectados na população e a densidade de organismos patogênicos nos excrementos desses indivíduos. (GONÇALVEZ *et al.*, 2003). Consequentemente, a diversidade de espécies presentes no efluente implica características bioquímicas diferentes entre si resultando em divergência de comportamento quando elementos externos são introduzidos (WEF, 1996 apud MONACO, 2006, p.5).

A transmissão dos patógenos pode ser facilitada pelos seguintes fatores (GONÇALVEZ *et al.*, 2003):

1. alta carga excretada;
2. baixa dose infectante;
3. baixa imunidade do hospedeiro;
4. sobrevivência prolongada no meio ambiente;
5. inexistência de período de latência no meio ambiente;
6. existência de reservatório animal;
7. inexistência de hospedeiros intermediários;
8. resistência aos processos de tratamento de água e esgotos; e
9. múltiplos modos de transmissão.

Em 2001 foram registradas 1.415 espécies de organismos conhecidos como sendo patogênicos a seres humanos. Muitos desses organismos são associados com doenças que são conhecidas há muitos anos e uma pequena, mas significante porcentagem está associada a doenças emergentes (WHO, 2004 a).

Usualmente são empregadas bactérias *Escherichia coli* e *coliformes totais* como indicadores de bactérias, enquanto os colifagos são indicadores da presença de vírus (DANIEL, 2001).

As bactérias são organismos do reino monera, procariotas (sem núcleo definido), unicelulares, quimioeterotróficos ou quimioautotróficas, dependendo da espécie, e se reproduzem por divisão binária simples. Geralmente, são os organismos patogênicos mais sensíveis à ação de desinfetantes físicos e químicos (GONÇALVEZ *et al.*, 2003).

A espécie *Escherichia coli* é encontrada naturalmente nos tratos intestinais e urinários dos seres humanos, possuem forma de bastonetes e parede celular Gram-Negativa e são anaeróbias facultativas que fermentam lactose, produzindo ácido e gás. (ALMEIDA, 1979). Elas são indicadoras de contaminação recente de origem exclusivamente fecal e funcionam como bom indicador de bactérias entéricas de origem humana, vírus e microrganismos menos resistentes. No meio ambiente, elas podem sobreviver de 2 a 5 meses em reservatórios de água e, em uma bancada de aço inoxidável seca, sobrevive facilmente até 2 meses (SOARES, 2007).

A maioria das cepas de *E. coli* é inofensiva e é normalmente habitante da flora bacteriana do trato gastrointestinal de seres humanos e animais homeotérmicos. Entretanto, algumas cepas são patogênicas tanto aos humanos quanto a diversos animais, principalmente jovens (suínos, bovinos e ovinos) (GONÇALVEZ *et al.*, 2003).

Nos animais, a *E. coli*, bem como várias outras bactérias da família *Enterobacteriaceae* e do grupo coliforme (*Klebsiella*, *Citrobacter*, *Edwardsiella*, *Enterobacter*, *Proteus* e *Serratia*) podem apresentar-se como patogênicos oportunistas, causando mastites e infecções do trato urinário. Dentre as doenças oportunistas humanas associadas à *E. coli* incluem-se infecções do trato urinário e rins (BASTOS *et al.*, 2003).

Os protozoários são organismos unicelulares, eucariotas, quimioeterotróficos e pertencem ao reino protista. O ciclo de vida dos protozoários relacionados aos esgotos sanitários é composto basicamente por duas fases: a primeira fase de alimentação e reprodução no trato intestinal do hospedeiro e uma fase de resistência ou inativo, em que ocorre formação de uma cápsula protetora (cisto) que permite sua sobrevivência até mesmo fora do hospedeiro.

As três protozooses mais importantes advindas pela água são: criptosporidiose, giardíase e amebíase. Estima-se que só a amebíase atinge mais de 400 milhões de pessoas no mundo e a giardíase, 200 milhões. (BOUZID *et al.*, 2008 apud MEDEIROS, 2010, p. 31)

Os protozoários *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. destacam-se em razão da elevada concentração eliminada e baixa dose infectante. A giardíase possui prevalência de 2 a 5% na população de países industrializados e de 20 a 30% em países em desenvolvimento (WHO, 2004a). Esta doença tem sido responsabilizada por distúrbios gastrointestinais, principalmente diarréia e síndromes de má-absorção (ALMEIDA, 1978). A sua descoberta foi feita por Antonie van Leeuwenhoek em 1681, em suas próprias fezes. Em 1879, Grassi descobriu a forma cística, e a nomeação atual deste protozoário foi empregada em 1915, como homenagem ao professor Alfred Giard.

O potencial zoonótico da giardíase é reconhecido, porém ainda é controverso o papel dos animais como fonte de infecção da doença para seres humanos, pela dificuldade de distinção de organismos espécie-específica. Estudos recentes, de infecções experimentais, oferecem evidências de que uma variedade de mamíferos silvestres e domésticos é capaz de albergar este parasita que infecta seres humanos (BASTOS *et al.*, 2003).

A presença destes protozoários já foi detectada até mesmo em efluentes de esgoto que passaram por um tratamento em nível terciário (SANTOS, 2007). Assim sendo, a avaliação na infectividade desses organismos patogênicos é imprescindível para verificar a eficiência de um processo de desinfecção.

### 3.2 DESINFETANTES

A desinfecção é um processo que usa um agente químico ou não químico e que tem por objetivo a inativação de microrganismos patogênicos presentes na água, incluindo bactérias, protozoários e vírus, além de algas, por meio da ocorrência de um ou mais dos seguintes mecanismos: a) destruição da estrutura celular; b) interferência no metabolismo com inativação de enzimas; c) interferência na biosíntese e no crescimento celular, evitando a síntese de proteínas, ácidos nucléicos e co-enzimas (DI BERNARDO, 2005).

Segundo Silva (2008), as principais características que se deseja de um desinfetante podem ser resumidas em:

- capacidade de destruir em tempo razoável, os organismos patogênicos a serem eliminados, na quantidade em que se apresentam e nas condições encontradas na água;

- não deve ser tóxico para o homem e para os animais domésticos e, nas dosagens usuais, não deve causar à água cheiro e/ou gosto que prejudiquem o seu consumo;
- custo de utilização deve ser razoável, além de apresentar facilidade e segurança no transporte, armazenamento, manuseio e aplicação;
- concentração na água tratada deve ser fácil e rapidamente determinável;
- deve produzir concentrações residuais persistentes na água, de maneira a constituir barreira sanitária contra eventual recontaminação antes do uso.

A estratégia para a escolha de um desinfetante/oxidante ou da combinação de alguns deles depende essencialmente da qualidade da água bruta (especialmente da concentração de carbono orgânico dissolvido e de brometos), principalmente quando a pré-desinfecção for necessária. A cloração é um modo fácil e de baixo custo de desinfecção, sendo uma das técnicas mais utilizadas em tratamentos de águas e esgotos; a radiação ultravioleta tem como grande ponto positivo a não adição de produtos químicos à água e ao esgoto e a não existência de prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente devido a modificações na matéria orgânica. O ozônio, escolhido pela eficiência na remoção de bactérias, vírus e protozoários, assim como na remoção de cor, odor e sabor. Com sua característica altamente oxidante, há a reação com grupos funcionais orgânicos e organometálicos originando subprodutos de menor peso molecular e mais biodegradáveis que seus precursores (CHERNICHARO *et al*, 2001). A partir disto, pode-se fazer uma análise discursiva e comparativa sobre os resultados e efeitos dos diferentes desinfetantes em sequência.

### 3.2.1 Ozônio

O ozônio ( $O_3$ ) é um gás à temperatura ambiente, com ponto de fusão a -251,4 °C e de ebulição a -112 °C, sendo uma variedade alotrópica do elemento oxigênio (O), formado por três átomos deste elemento unidos por ligações simples e duplas. É encontrado em pequenas concentrações naturalmente na atmosfera com a notável característica de absorver luz ultravioleta solar na faixa de 220-320 nm o que o torna um ‘escudo’ natural da Terra (camada de ozônio) para os seres humanos e a outras formas de vida, para o qual esses raios são nocivos (CHERNICHARO, 2001).

Os primeiros relatos sobre o ozônio surgiram em meados do século XIX, quando o químico suíço Christian Friedrich Schönbein observou que o odor notado quando se produziam descargas elétricas na atmosfera era similar àquele notado quando a água era

decomposta por uma corrente voltaica. Schönbein acreditou que esse odor poderia ser atribuído à existência de um gás atmosférico de odor peculiar. A esse gás atribuiu o nome ozônio, da palavra grega para cheiro – “ozein”. O ozônio é um gás produzido naturalmente na atmosfera terrestre, reativo e capaz de oxidar metais como ferro, chumbo e arsênio. A descoberta de que o ozônio pode despolarizar eletrodos de platina foi a principal motivação para que esse gás começasse a ser estudado e medido com maior atenção. Em seguida, Schönbein concluiu que o ozônio tinha um papel ainda mais importante, utilizando-o como um eficaz desinfetante durante epidemias infecciosas. O ozônio foi primeiramente utilizado para desinfetar água de abastecimento, no final do século 19, na cidade holandesa de Oudshoon (CHERNICHARO, 2001). Em 2003, existiam mais de 1000 instalações de ozônio no mundo utilizadas para fins de desinfecção (DEZOTTI, 2008).

Atualmente, entre as técnicas para se obter o ozônio, a mais empregada é a descarga corona, que consiste na passagem do gás contendo oxigênio através de dois eletrodos separados, onde se aplica tensão que varia de 8 a 20 kV. A descarga corona produzida entre os eletrodos é composta de elétrons com energia suficiente para promover a dissociação das moléculas de oxigênio em seus átomos constituintes (SOARES, 2007). Esta alta energia dissocia uma molécula de oxigênio em seus átomos constituintes, que se reestrutura com uma molécula de oxigênio, formando uma molécula de ozônio, através das reações (1) e (2) (MEDEIROS, 2010):

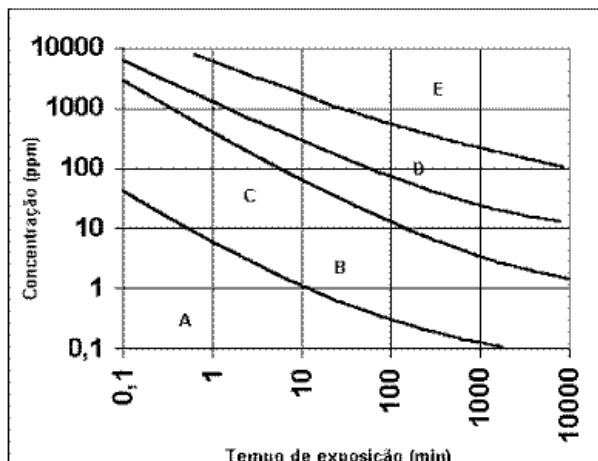


A taxa de dissociação depende principalmente da distribuição e quantidade de energia na descarga corona, da temperatura e da vazão do gás na entrada do gerador de ozônio. Segundo SOARES (2007), para produzir cerca de 1kg de  $\text{O}_3$  são necessários cerca de 16,5 kW.h (para 1% em massa de oxigênio na entrada). Aproximadamente 5% da energia requerida são consumidos na geração de  $\text{O}_3$ , enquanto a maior parte é liberada na forma de calor, e uma fração menor como energia luminosa.

O ozônio, por se caracterizar como forte agente oxidante, é aplicado no controle de odor e oxidação química. Possui rápida ação desinfetante – elevada eficiência na inativação de patogênicos por destruição da parede celular e danos aos constituintes dos

ácidos nucléicos – além de apresentar baixa toxicidade no efluente (MEDEIROS, 2010). Ele possui dois modos de reação: reação direta do próprio ozônio molecular e reação indireta, pelo radical hidroxila produzido em sua decomposição. A reação molecular é seletiva e possui uma taxa relativamente baixa, quando comparada à reação indireta. Quando a reação molecular é favorecida, há formação considerável de produtos intermediários parcialmente oxidados. A taxa de reação do radical hidroxila é bem maior e sua meia-vida em meio aquoso é curta, na faixa de microssegundos. Além disso, o radical é muito menos seletivo que o ozônio molecular (PASQUALINI, 2010).

Na questão de segurança, a concentração máxima admitida por uma pessoa exposta por 8 horas é de 0,1 ppm. O ozônio abaixo de 0,5 ppm irrita as vias respiratórias, sendo sentida sua presença pelo seu odor típico a concentrações entre 0,02 e 0,04 ppm. Longos períodos de exposição podem afetar cronicamente os brônquios. A inalação de concentrações industriais normalmente acima de 10.000,00 ppm podem levar à morte (Figura 1).



**A - Não sintomático B - Sintomático C - Irritação D - Tosse permanente E - Fatal**  
**Figura 3.1: Concentração por Tempo de Exposição e possíveis efeitos nos seres humanos**  
**Fonte: Adaptado CHERNICHARO, 2006**

O efeito de desinfecção se deve pela habilidade do ozônio em reagir prontamente com uma grande variedade de grupos funcionais orgânicos e organometálicos, promovendo a quebra de duplas ligações carbono-carbono e originando subprodutos de menor peso molecular, muitas vezes mais biodegradáveis que seus precursores (MONACO, 2006).

Com isso, o ozônio é capaz de efetuar a remoção de substâncias responsáveis pela cor, gosto e odor no tratamento de águas de abastecimento e microrganismos

diversos no tratamento de esgoto, incluindo espécies resistentes a outras técnicas de desinfecção.

Os principais propósitos na utilização do ozônio são a desinfecção, descoloração, desodorização e diminuição da toxicidade de efluentes e melhoria da biodegradabilidade, a oxidação de ferro solúvel e/ou manganês, remoção de cor e de algas (oxidação), oxidação de compostos orgânicos como fenóis, detergentes e pesticidas, a microfloculação de orgânicos dissolvidos e a oxidação de inorgânicos como o cianeto, sulfeto e nitrato (SILVA, 2008). A aplicação apropriada em esgotos seria em um efluente com bom nível de tratamento, como os terciários já nitrificados ou filtrados, com baixa concentração de matéria orgânica, visando a reduzir a demanda de ozônio (JORDÃO; PESSOA, 2009). Os fatores que podem influenciar no desempenho do ozônio são: a dose de ozônio, tempo de contato, sólidos suspensos, pH, demanda química de oxigênio (DQO), carbono orgânico, temperatura e a geometria da câmara de contato (CHERNICHARO, 2001).

Segundo Lazarova *et al.* (1998), o ozônio tem a habilidade em inativar diversos tipos de bactérias, cistos de parasitas como *Giardia* e *Cryptosporidium*, e alguns vírus resistentes. Dentre as bactérias vegetativas, a *E. coli* é uma das mais sensíveis à inativação pelo ozônio, enquanto que, cocos gram-positivos, bacilos gram-positivos, e *Mycobacteria* estão entre as espécies mais resistentes. Segundo os mesmos autores, os vírus são muito mais resistentes ao ozônio do que bactérias vegetativas, porém não mais resistentes que as bactérias esporuladas. SOARES (2007) afirma que a ozonização é muito eficiente para desinfetar efluentes de águas residuárias domiciliares quanto à inativação de coliformes totais e fecais.

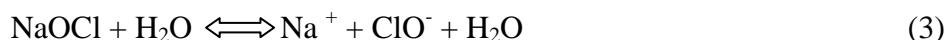
Embora o ozônio tenha poder para proporcionar alto grau de inativação, ele não deve ser utilizado como desinfetante secundário em tratamento de água, pois sua concentração residual decai rapidamente (DI BERNARDO, 2005).

A necessidade de um esgoto de baixíssima concentração de matéria orgânica, visando a reduzir a demanda de ozônio, limita o emprego da ozonização no caso de efluentes com elevada concentração de sólidos em suspensão, uma vez que os organismos podem estar adsorvidos na parcela de sólidos. Além disso, custos elevados dos equipamentos de geração de ozônio surgem como as principais desvantagens na utilização da desinfecção com ozônio.

### 3.2.2 CLORO

O cloro (líquido ou gasoso) é o agente inativador de organismos patogênicos presentes em esgotos sanitários mais econômico e difundido, sendo muito eficiente na inativação de bactérias e vírus. É uma tecnologia mundialmente conhecida, normalmente aplicada nas formas de cloro gasoso, hipoclorito de sódio ou cálcio e outros compostos na forma líquida ou sólida (CHERNICHARO, 2001).

A reação entre o hipoclorito de sódio e a água produz ácido hipocloroso e hidróxido de sódio (COSTA, 2007):

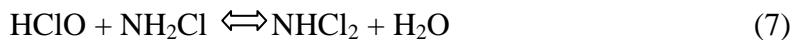


O ácido hipocloroso (HOCl), por sua vez, se dissocia em hidrogênio e íons hipoclorito, sendo que este processo é dependente do pH. O ácido hipocloroso e o íon hipoclorito são denominados de cloro residual livre (CRL).



Em pH acima de 8,5 todo o ácido hipocloroso se dissocia ao íon hipoclorito; em contraposição, em pH abaixo de 6,5 não há dissociação deste ácido. Considerando que o efeito germicida do HOCl é superior ao do OCl<sup>-</sup>, a desinfecção com cloro é mais eficiente em meio mais ácido (DANIEL, 2001).

Se amônia ou compostos amoniacais estão presentes no efluente quando se adiciona um derivado clorado, o que é bem provável uma vez que o esgoto apresenta altas concentrações de uréia, então há a formação de cloraminas inorgânicas (monocloramina, dicloramina e tricloramina) denominadas de cloro residual combinado. Estes compostos são resultantes da reação da amônia com o ácido hipocloroso. (DI BERNARDO, 2005)



As cloraminas (monocloramina, dicloramina) apresentam ação bactericida pelo menos 25 vezes inferior ao ácido hipocloroso. Percebe-se, portanto, que o cloro residual

livre é mais reativo do que o cloro residual combinado, o que equivale a dizer que seu potencial tóxico é muito maior (COSTA, 2007).

O cloro residual (livre e combinado) é o agente ativo da desinfecção que reage quimicamente com substratos orgânicos e inorgânicos. Quando o substrato orgânico é parte de um organismo vivo (fitoplâncton, zooplâncton, nécton, etc.), a reação pode gerar um efeito tóxico no mesmo. A toxicidade pode afetar o metabolismo ou a reprodução dos organismos, pode causar alterações cromossômicas e até causar mortalidade (COSTA, 2007).

A ação desinfetante do cloro deve-se principalmente ao mecanismo de oxidação do material celular, podendo também, segundo alguns trabalhos científicos, agir na inibição enzimática e danificação do material genético como outros mecanismos. Suas principais vantagens, segundo DI BERNARDO (2005), são:

- a) Inativa eficientemente uma grande variedade de microrganismos patogênicos encontrados na água.
- b) Produz residual na água facilmente medido e controlado.
- c) É facilmente encontrado no mercado a custos razoáveis.
- d) Manuseio relativamente simples e aplicação segura.

Entretanto, alguns de seus compostos podem produzir subprodutos tóxicos de efeitos crônicos à saúde humana e a animais em contato. A reação do cloro livre com diversos compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água para formar subprodutos indesejáveis é a causa de uma de suas desvantagens junto com a relação de sua alta dosagem com a causa de sabor e odor na água (DI BERNARDO, 2005). Além disso, compostos clorados possuem pouca capacidade desinfetante para protozoários patogênicos e helmintos (GONÇALVEZ *et al.*, 2003).

O emprego de cloro em água que contenha substâncias húmicas e outros compostos orgânicos pode levar à formação de vários produtos prejudiciais à saúde. A presença de trihalometanos normalmente é atribuída às reações do cloro com substâncias húmicas (DANIEL, 1993). A partir de então se passou a pesquisar o emprego de desinfetantes alternativos que oferecessem a mesma eficiência, segurança e facilidade operacional proporcionadas pelo cloro, e que fossem economicamente competitivas ao cloro. Os trihalometanos consistem principalmente de clorofórmio, bromofórmio e dos intermediários bromodiclorometano, dibromoclorometano e dicloroiodometano, sendo o clorofórmio o mais frequente. (SARTORI, 2007).

As primeiras suspeitas da correlação entre a água de abastecimento público e a ocorrência de câncer surgiram nos Estados Unidos, em 1974, quando as pesquisas da Agência de Proteção Ambiental (USEPA) indicaram a presença de trihalometanos, nas águas cloradas, em concentração superior a de outros contaminantes.

Outra desvantagem da aplicação de cloro na desinfecção de águas residuárias é a necessidade de descloração, que consiste na eliminação da toxicidade do cloro residual que é prejudicial para a vida aquática do corpo receptor (DANIEL, 2001). A descloração antes do lançamento tem sido a opção utilizada para reduzir os impactos da disposição de efluentes desinfetados com cloro no meio ambiente e adequar-se à legislação (GONÇALVEZ *et al.*, 2003).

Neste estudo, optou-se pela utilização do cloro pelo baixo custo e pela disseminação já existente de sua utilização para a desinfecção.

### **3.2.3 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA**

A radiação ultravioleta é um método alternativo para a desinfecção de efluentes de esgoto sanitário, pois pode fornecer eficiência superior à do cloro com a vantagem de não geração de subprodutos indesejáveis e não manutenção de residual desinfetante que poderia afetar o equilíbrio do ecossistema no qual o efluente está sendo lançado. (DANIEL, 1993). A viabilidade da desinfecção com a radiação ultravioleta consiste na não aplicação de produtos químicos à água ou esgoto. As poucas alterações que ocorrem devido à ação deste desinfectante não são impactantes para a saúde humana e ao meio ambiente.

Outrora, a radiação ultravioleta era aplicada apenas para a desinfecção de água de abastecimento, pois se acreditava que a matéria em suspensão, cor e turbidez, presentes em maiores quantidades, absorveriam grande parte da radiação incidente, prejudicando a desinfecção. Porém, pesquisas em todo mundo confirmam a viabilidade do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de esgoto sanitário (COLETTI, 2003).

Lourenço (2009) mostra que a energia ultravioleta dispõe da ação germicida a partir de determinados danos no conteúdo genético dos organismos. Os ácidos nucléicos são os mais importantes absorvedores de energia da luz no comprimento de onda na faixa de 240 a 280 nm. Devido ao fato de o DNA e o RNA carregarem informação de reprodução, danos nestas substâncias podem efetivamente inativar as células. O dano geralmente resulta da dimerização de duas moléculas de pirimidina. Os três tipos de

moléculas de pirimidina são citosina (encontrados no DNA e no RNA), timina (encontrados apenas no DNA) e uracila (encontrado apenas no RNA). Uma vez que as moléculas de pirimidina estejam dimerizadas, a replicação dos ácidos nucléicos torna-se difícil assim que a estrutura helicoidal é destruída. Se a replicação ocorrer, células filhas mutantes serão produzidas e serão inábeis para se replicar. Segundo DANIEL (2001), a absorção de altas doses pelas proteínas presentes nas membranas celulares leva ao rompimento dessas membranas e, com isso, à morte da célula. O autor cita, também, que a absorção de baixas doses pelo DNA pode interromper a habilidade de reprodução do microrganismo.

As lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio são a principal fonte de radiação ultravioleta utilizada na desinfecção tanto de águas para abastecimento quanto para águas residuárias. Essas lâmpadas emitem de 85 a 90% da sua energia no comprimento de onda de 254 nm que é efetiva na inativação de microrganismos, tendo vida útil de 4000 a 5000 horas de uso contínuo (SARTORI, 2007).

A efetividade do sistema de desinfecção com radiação ultravioleta depende das características do líquido a ser desinfetado, da intensidade da radiação ultravioleta, do tempo em que os microrganismos são expostos à radiação ultravioleta e da configuração do reator. (GONÇALVEZ *et al.*, 2003).

Suas vantagens perante outros métodos são (COLETTI, 2003):

- a) Por ser um processo físico elimina a necessidade de geração, manuseio, transporte e estoque de produtos químicos tóxicos e perigosos ou corrosivos;
- b) Não possui ação residual que pode ser prejudicial à vida aquática ou aos seres humanos;
- c) Inofensivo aos operadores, desde que não se exponham à radiação;
- d) Os tempos de contato (exposição) são inferiores aos outros desinfetantes (Aproximadamente 20 a 30 segundos com lâmpadas de baixa pressão);
- e) Os equipamentos requerem menor área que os outros métodos.

Segundo o mesmo autor, as desvantagens são:

- a) Doses baixas podem não ser suficientes para inativar alguns vírus, esporos ou cistos .

- b) Alguns microrganismos podem reparar ou reverter os efeitos causados pela radiação ultravioleta através dos mecanismos denominados de fotoreativação (presença de luz) ou recuperação no escuro (ausência de luz).
- c) Necessidade do controle da deposição de sólidos no envoltório das lâmpadas;
- d) A concentração de SST e a turbidez das águas residuárias podem prejudicar a desinfecção. Esta é menos eficiente com concentrações de SST superiores a 30 mg/L quando se utilizam lâmpadas de baixa pressão.

Podem-se citar fatores que afetam a intensidade da radiação UV como: a idade das lâmpadas, deposição da matéria orgânica e inorgânica nas lâmpadas, a configuração e a localização das lâmpadas no reator (SARTORI, 2007). Segundo Colleti (2003), pode-se incluir também a dose, que é afetada pela potência radiante das lâmpadas, tempo de contato (segundos) e turbidez da água residuária; a presença de constituintes interferentes na água residuária, especialmente ferro, manganês e dureza (cálcio e magnésio); formação de curtos-circuitos na câmara de contato, que podem ser minimizados. Por fim, a água na câmara de contato, que necessita ser mantida em níveis constantes para assegurar exposição suficiente na radiação.

### **3.3 DESINFECÇÃO CONJUGADA**

Segundo Daniel (2001), atualmente há tendência na utilização de desinfetantes conjugados, sendo atribuída ao fato que aplicações conjugadas de desinfetantes são mais eficientes que a adição individual. Esse processo produz um efeito sinérgico por aplicação simultânea ou seqüencial, denominada desinfecção interativa. O sinergismo ocorre, segundo Souza (2006), quando a aplicação combinada de desinfetantes promove inativação de microrganismos maior que a soma das inativações ocasionadas pelos mesmos desinfetantes aplicados separadamente. Pode-se classificar em dois tipos: Sequencial, na qual um desinfetante é aplicado após o outro, em sequência, havendo um desinfetante primário e um secundário; Simultânea, onde dois ou mais desinfetantes são aplicados simultaneamente, por exemplo, em um tanque de mistura.

Pesquisas sobre desinfecção conjugada e seqüencial para tratamento de efluentes sanitários estão em estado inicial, existindo inúmeros estudos para água de abastecimento.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 ENSAIOS DE DESINFECÇÃO

Os ensaios de desinfecção foram realizados com três desinfetantes e duas sequências de desinfecções (desinfetante I seguido do desinfetante II). A primeira sequência foi realizada com o cloro como desinfetante I e a radiação ultravioleta como desinfetante II; Na segunda sequência foi utilizado o ozônio como desinfetante I e a radiação ultravioleta novamente como desinfetante II (figura 2)

As coletas de amostras foram feitas do efluente do reator UASB da Universidade de São Paulo, Campus São Carlos, o qual possui volume útil de 18,8 m<sup>3</sup> e trabalhava com tempo de detenção hidráulica de 12 horas. A amostra coletada era dividida em quatro partes: uma foi direcionada para o tratamento com o desinfetante I (cloro ou ozônio) e em sequencial para o desinfetante II (radiação ultravioleta). A segunda seguiu para o tratamento apenas com o desinfetante I; a terceira seguiu para o tratamento apenas com o desinfetante II; por fim, a quarta seguiu sem tratamento por desinfetante.

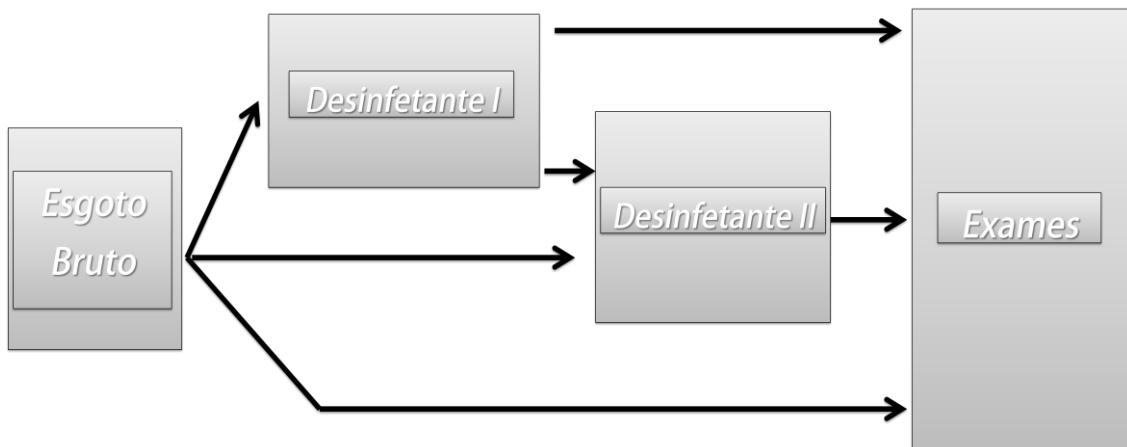


Figura 4.1: Fluxograma dos ensaios de desinfecção realizados.

#### 4.1.1 DESINFECÇÃO COM OZÔNIO

##### ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DO OZONIZADOR

A calibração do aparelho de ozonização seguiu o método iodométrico que consiste na determinação indireta do ozônio encontrado a partir da oxidação do iodeto de uma solução de iodeto de potássio (KI) como mostrado na reação (9):



Os procedimentos para a calibração do ozonizador seguem o empregado e descrito nos trabalhos de Soares (2007), Lourenço (2009) e Medeiros (2010).

- Para o ínicio dos ensaios, a coluna foi lavada três vezes com água.
- Para a estabilização do ozonizador foi realizado um ensaio com água, ligado durante 10 minutos, e descartada em seguida.
- Foram colocados 4,4 L de iodeto de potássio a 2% na coluna de ozonização e 400 mL da mesma solução no frasco de lavagem para determinação do offgas.
- O botão de oxigênio era acionado e era liberada em seguida a válvula de ligação entre o ozonizador e a coluna, ajustando a vazão requerida. Visto a formação de bolhas no frasco de lavagem, o ozônio era liberado.
- As vazões utilizadas foram de 1, 2, 3 e 4 L.min<sup>-1</sup>.
- As tensões utilizadas foram de 40%, 60% e 80%.
- Se houvesse a necessidade, a pressão era ajustada de forma a aumentar o envio de oxigênio para a coluna podendo, desta forma, alcançar as vazões de maior valor.
- Quando o botão de ozônio era ativado, cronometravam-se cinco minutos.
- Com o fim, retirava-se 200 mL do Frasco de Lavagem, assim como duas alíquotas de 200 mL da coluna de ozonização para duplicata.
- Logo após a coleta e antes da realização da titulação, acidificavam-se as amostras com 4 mL de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) com concentração 1 N e titulava-se com tiossulfato de sódio (0,025N) até a apresentação de coloração palha. Com isso, adicionava-se 2 mL de amido como indicador e prosseguia-se a titulação até a solução se tornar incolor.

- Por fim, descartava-se a solução de iodeto de potássio restante na coluna e realizava-se a lavagem da coluna com água (3 vezes).

### CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE OZÔNIO

O cálculo da produção de ozônio pode ser estimado a partir da equação (10):

$$P = \frac{(N_{tio} \times (V_{tio} - V_b) \times V_{KI} \times 1440)}{V_{am} \times T} \quad (10)$$

P: produção de ozônio ( $\text{g O}_3 \cdot \text{h}^{-1}$ )

$N_{tio}$ : normalidade da solução de tiossulfato de sódio

$V_{tio}$ : volume de tiossulfato de sódio gasto na titulação (mL)

$V_b$ : volume de tiossulfato de sódio gasto na titulação do branco (mL)

$V_{KI}$ : volume de solução de KI adicionada na coluna de ozonização (L)

$V_{am}$ : volume de amostra titulada (mL)

T: tempo de contato (min)

1440: fator de conversão

A constituição do branco baseia-se em uma amostra de 200 mL de KI (2%) não ozonizado, a qual foi acidificada com 10 mL de ácido sulfúrico (1N) e, em sequência, adicionava-se 2 mL de solução de amido. A amostra era titulada com tiossulfato de sódio (0,025N) até ficar incolor – esse procedimento foi feito em duplicata. Tinha-se então o volume do branco ( $V_b$ ).

A equação que indica a produção total de ozônio é dada pela soma do ozônio na coluna de ozonização e do off-gás no frasco lavador. A dosagem do ozônio está diretamente relacionada à produção através da equação (11):

$$D = \frac{P \times T \times 1000}{V \times 60} \quad (11)$$

D: dosagem de ozônio ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

P: produção de ozônio ( $\text{g O}_3 \cdot \text{h}^{-1}$ )

T: tempo de contato (min)

V: volume ozonizado (L)

A padronização da solução de tiossulfato de sódio foi realizada com solução de dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), de acordo com APHA, AWWA e WEF (1998).

O principal determinante para a obtenção dos valores de volume, tempo de contato, tensão aplicada e vazão de gás é a dosagem recebida de ozônio. As dosagens foram fixadas em 10 mg/L e 5 mg/L no Ensaio VII e VIII e Ensaio IX e X, respectivamente.

### **ENSAIOS DE DESINFECÇÃO COM OZÔNIO**

Os ensaios de desinfecção com ozônio foram realizados em batelada, utilizando uma coluna de ozonização localizada na Estação de Tratamento de Esgotos do Campus da USP de São Carlos. O equipamento de ozonização era constituído pelo gerador de ozônio (Eaglesat®), gerador de oxigênio pelo processo PSA (Pressure Swing Adsorption), coluna de ozonização, frasco lavador de gás para o recolhimento do ozônio que não reagia no processo.

Para a realização da desinfecção, inicialmente o esgoto foi direcionado para uma caixa d'água (350 L), previamente lavada com água, onde era armazenado. Após isso, foi realizado um descanso de 30 minutos para a decantação e uma estabilização do ozonizador de 10 minutos antes do início dos ensaios.

Os ensaios realizados para a desinfecção com ozônio seguiram os procedimentos da calibração do ozonizador, exceto pelas variações no volume, tempo de contato, tensão aplicada e vazão do gás, além da fixação de 600 mL de solução KI (2%) no frasco lavador.

### **BALANÇO DE MASSA DO OZÔNIO DISSOLVIDO NA FASE LÍQUIDA**

A transferência e consumo de ozônio durante o ensaio pode ser calculado a partir da possibilidade de quantificação da massa ou concentração do ozônio transferido durante a desinfecção a partir de um balanço de massa.

Assim, pode-se calcular a partir da equação (12):

$$M_A = D \times V \quad (12)$$

$M_A$ : massa aplicada de ozônio (mg)

D: Dosagem (mg/L)

V: Volume de efluente sendo ozonizado (L)

No entanto, a massa total de ozônio aplicada divide-se em: massa transferida para o meio líquido ( $M_T$ ) e massa não transferida ( $M_{NT}$ ), sendo esta última, quantificada no off-gás, sendo calculadas pelas equações (13) e (14):

$$M_{NT} = N_{tio} \times (V_{tio} - V_b) \times V_{offgás} \times 2400 / V_{am} \quad (13)$$

$M_{NT}$ : Massa de ozônio não transferida ( offgás ) (mg)

$N_{tio}$ : Normalidade do tiossulfato de sódio

$V_{tio}$ : Volume de tiossulfato gasto na titulação da amostra (mL)

$V_b$ : Volume de tiossulfato gasto na titulação do branco (mL)

$V_{offgás}$ : Volume de solução de KI (2%) adicionado no frasco lavador de gás (L)

$V_{am}$ : Volume de amostra de KI (2%) titulada (mL)

$$M_T = M_A - M_{NT} \quad (14)$$

$M_T$  : massa transferida ao meio líquido ( mg )

$M_A$  : massa total do ozônio aplicado ( mg )

$M_{NT}$ : massa de ozônio não transferida – offgás ( mg )

A massa transferida de ozônio no meio líquido (  $M_T$  ) pode ainda ser dividida em: massa residual (  $M_R$  ) e massa consumida (  $M_C$  ). A massa residual pode ser calculada conforme equação (15).

$$M_R = [O_3]_R \times V_{ef} \quad (15)$$

$M_R$  : massa residual ( mg )

$[O_3]_R$ : Concentração Ozônio Residual ( mg/L )

$V_{ef}$  : Volume do efluente ozonizado ( L )

$$M_C ( mg ) = M_T ( mg ) - M_R ( mg )$$

Assim, a concentração de ozônio consumido  $[O_3]_C$  pode ser estimada pela equação (16):

$$[O_3]_C = D - ([O_3]_R + [O_3]_{offgás}) \quad (16)$$

D: Dosagem de ozônio aplicada ( mg/L )

$[O_3]_R$ : Concentração de ozônio residual ( mg/L )

$[O_3]_{offgás}$ : Concentração de ozônio no offgás (mg/L)

### CALCULO DOS VALORES DE CONCENTRAÇÃO X TEMPO (CT) PARA OZÔNIO

Foi utilizado para o cálculo do CT a equação (17) desenvolvida por Wu e Doan (2005) e citada por Medeiros (2010):

$$CT = \int_0^t C(e)tdt \quad (17)$$

C: Taxa de consumo de ozônio (mg  $O_3 \cdot L^{-1} \cdot min^{-1}$ )

t: tempo de contato (min)

Pelo motivo da concentração de ozônio dissolvido ser muito pequena, foi feita a utilização do consumo de ozônio – massa de ozônio consumido dividido pelo tempo de contato, supondo que a vazão aplicada de ozônio permaneceu constante durante todo processo (SOARES, 2007).

#### 4.1.2 DESINFECÇÃO COM CLORO

Para os ensaios de cloro, foram utilizados bêqueres de 2 L de capacidade, utilizando aparelhos Jartest com gradiente de velocidade de  $100 s^{-1}$ . Os tempos e dosagens estudados foram: 10 mg e 10 minutos de contato, 10 mg e 20 minutos de contato e 20 mg e 10 minutos de contato; todos em duplicatas, totalizando 6 ensaios. A determinação de cloro residual livre e combinado foi realizada pelo método DDP colorimétrico (APHA, AWWA e WEF, 2005).

Certas operações eram realizadas previamente aos ensaios como: desinfecção das palhetas do aparelho de “Jartest” com solução de hipoclorito de sódio e álcool; desinfecção dos bêqueres de dois litros por radiação ultravioleta e enxaguados com solução Tween 80 (0,1%); desinfecção dos galões de coleta com solução de hipoclorito de sódio e posteriormente enxaguados com solução Tween 80 (0,1%).

A solução de Tween 80 (0,1%) era necessária para não haver a aderência de cistos em frascos, galões ou qualquer outro aparato que tivesse contato direto com a água resíduaria, para não influenciar nos resultados de exame microbiológico.

Primeiramente, necessitava-se saber qual seria a concentração de NaOCl utilizada em cada ensaio. Para isso, utilizava-se 1,5 L de água deionizada adicionando 0,5 mL de solução de NaOCl concentrada ( 4 a 6% ). Com o tempo de um minuto, verificava-se a concentração de cloro livre a partir do método DPD colorimétrico, com a amostra de água deionizada usada como “branco”. Com isso, verificava-se o volume necessário de solução concentrada de NaOCl a ser adicionado nos ensaios, utilizando-se, assim, uma amostra de esgoto como “branco” para zerar o espectrofotômetro.

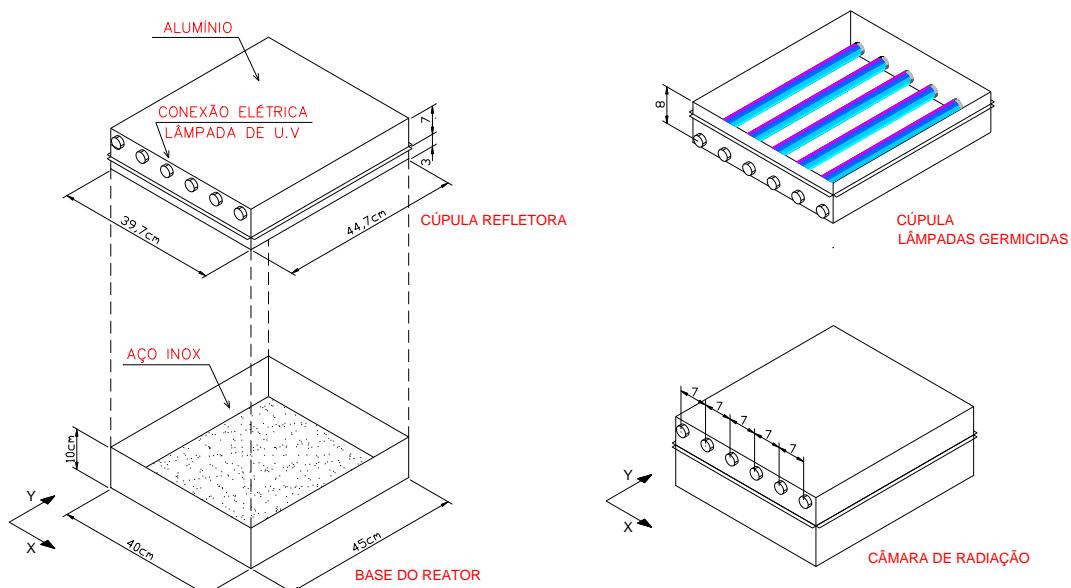
Destarte, os ensaios ocorreram do seguinte modo:

- Em um conjunto de quatro bêqueres eram adicionados 1,5 L de esgoto em cada. Em um quinto bêquer, era adicionado 1 L, servindo de amostra controle. Todos eram alocados para o aparelho de “Jartest”.
- Eram inoculados aproximadamente  $10^4$  cistos de *Giardia* spp. por litro.
- Adicionava-se a solução de hipoclorito de sódio com o tempo e concentrações já determinadas no aparelho de “Jartest”, ligando-o sobre agitação de  $100\text{ s}^{-1}$ .
- Duas alíquotas de 10 mL eram retiradas para a realização das análises de cloro residual livre e cloro residual total.
- Separavam-se 600 mL de amostra de esgoto clorado e os 5,4 L restantes eram encaminhados para a câmara de radiação ultravioleta para a desinfecção seqüencial. Esse volume era o necessário para se ter uma lâmina inicial de 3 cm no reator de ultravioleta.
- O metabissulfito de sódio (3%) era adicionado para cessar a reação do cloro na amostra de esgoto analisada.
- Retiravam-se alíquotas do esgoto bruto e clorado para a leitura de absorbância a 254 nm, em espectrofotômetro DR 4000 (Hach).
- Era feito o armazenamento das amostras para posteriores análises físico-químicas e exames microbiológicos.

#### 4.1.3 DESINFECÇÃO COM RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Os ensaios foram realizados em unidade de bancada (Figura 4.2) para melhor controle operacional de dose de UV, em comparação ao uso de reator com vazão constante.

A unidade de desinfecção foi construída com chapa de aço inoxidável e a fonte de radiação ultravioleta era proveniente de seis lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio, cada uma de 15 W de potência nominal que encaixavam numa cúpula refletora construída de chapas de alumínio polido.



**Figura 4.2 - Reator de desinfecção ultravioleta.**

O reator possuia dimensões de 40 cm x 45 cm x 10 cm de altura, acoplado uma cúpula refletora de alumínio de 39,7 cm x 44,7 cm e 10 cm de altura, onde as lâmpadas não mantinham contato com o meio líquido.

Assim, os ensaios foram feitos da forma descrita abaixo:

- Anteriormente a cada ensaio, era verificado se todas as lâmpadas estavam ligadas, utilizando como cobertura nas lâmpadas uma placa de vidro comum de 5 mm de espessura.
- Era feito a desinfecção da câmara de ultravioleta ligando as lâmpadas, com ela fechada, por 10 minutos.
- Espalhava-se o Tween 80 (0,1%), para a não retenção de cistos, no fundo e laterais do reator.

- Colocava-se 5,4 L do efluente para a criação de uma lâmina de 3 cm de esgoto.
- Com a ajuda de quatro agitadores magnéticos equidistantes, o efluente era homogeneizado.
- O tempo necessário era estipulado a partir das leituras de absorbância a 254 nm dos efluentes a serem tratados, com a dose de 2,5 Wh/m<sup>3</sup>.
- Finalmente, eram retirados 600 mL para ensaios físico-químicos e microbiológicos.
- O restante do efluente, que não era utilizado, era mantido por, no mínimo, 5 minutos adicionais para desinfecção antes do descarte.

Para a utilização das lâmpadas, há a necessidade do cálculo de intensidade de radiação média na superfície do reator. Para isso foi realizada, anteriormente às análises, uma avaliação por radiometria, em comprimento de onda de 254 nm, da intensidade em nove pontos distintos e equidistantes do reator.

Com o valor da intensidade em cada ponto, pode-se determinar a intensidade ponderada média de radiação emitida pelas lâmpadas ( $I_0$ ), a partir da equação (18):

$$I_0 = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (18)$$

$I_0$  = Intensidade da radiação na superfície do reator (mW.cm<sup>-2</sup>)

$I_i$  = Intensidade da radiação no ponto  $i$  (mW.cm<sup>-2</sup>)

$A_i$  = Área de influência do ponto de mediação ( a x a )

$n$  = pontos de medição (1,2,3,...)

Obtido o valor único de  $I_0$  (devido ao curto espaço de tempo entre as desinfecções) e de absorbância a 254 nm a cada ensaio, pôde-se calcular a Intensidade Média da Radiação ( $I_m$ ).

$$I_m = \frac{I_0}{a \cdot L} [1 - \exp(-a \cdot L)] \quad (19)$$

A: absorbância a 254 nm, cubeta de 1,0 cm;

L: espessura da lâmina líquida ou caminho óptico (cm)

a: coeficiente de extinção ( $\text{cm}^{-1}$ )

$$a = A \cdot \ln(10) = 2,303 \cdot A$$

Assim, com o valor de  $I_m$  obtido, foi calculada a Dose Recebida por volume (Dr):

$$Dr = \frac{I_m \cdot t}{L} \cdot 0,2778 \quad (20)$$

$I_m$ : Intensidade Média de Radiação do Reator

Dr : Dose Recebida Por Volume ( $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-3}$ )

0,2778: fator de conversão de mW para W, s para h e cm para m.

#### 4.1.4 DESINFECÇÃO SEQUENCIAL

Para a realização da desinfecção sequencial, foram feitos os mesmos procedimentos do ozônio e do cloro e, logo em seguida, os ensaios de desinfecção com radiação ultravioleta para avaliar os efeitos sinérgicos.

### 4.2 EXAMES MICROBIOLÓGICOS

#### 4.2.1 QUANTIFICAÇÃO DE COLIFORMES TOTAIS E *E. COLI*

Foi utilizada a técnica de “pour plate”, usando o meio Chromocult® Coliform Agar (Merck Cat.No.1.10426) na determinação simultânea da presença de coliformes totais e *E. coli*. Para a realização do teste, utilizando-se de placas de Petri estéreis, foram necessários 1 mL de amostra, adicionados a 9 mL de meio de cultura líquido a 55°C e homogeneizadas em movimentos em “oito”. Após a solidificação do meio, as placas foram incubadas a  $36 \pm 1^\circ\text{C}$  por  $24 \pm 1$  h. Nesta técnica as colônias que apresentarem coloração salmão / vermelha são reconhecidas como coliformes totais (sem *E. coli*) e coloração azul-escura / violeta como *E. coli*. Este procedimento foi escolhido pela quantidade de sólidos existente nas amostras, o que atrapalharia o método da filtração.

#### 4.2.2 QUANTIFICAÇÃO DE *GIÁRDIA* spp.

Para a quantificação de *Giardia* spp. foram utilizados dois métodos. O método I com a seguinte sequência: Concentração de Amostras; Purificação da amostra por IMS e captura de cistos; Dissociação ácida dos cistos das partículas e teste de viabilidade;

Leitura dos resultados. O método II com a sequência: Concentração de Amostras e teste de viabilidade; Leitura dos resultados.

O que difere os dois métodos é a exclusão nos ensaios da desinfecção com ozônio-ultravioleta do processo de purificação da amostra por IMS e captura de cistos e do processo de dissociação ácida dos cistos das partículas.

#### 4.2.2.1 MÉTODO I

O primeiro método foi aplicado nos ensaios realizados para a desinfecção com cloro-radiação ultravioleta.

##### CONCENTRAÇÃO DAS AMOSTRAS

A concentração das amostras foi feita com base na metodologia adaptada de McCuin & Clancy (2005) e Robertson *et al.* (2000), segundo Medeiros (2010)..

- Consistiu na coleta de 75 mL de efluente acrescentados 25 mL de Tween 80 a 0,1%, totalizando 100 mL e agitando-o por, no mínimo, 3 minutos.
- Distribui-se o volume em dois tubos de centrífuga de 50 mL, previamente enxaguados com Tween 80 (0,1%).
- Centrifugou-se a 1500g (Centrífuga 5810, Eppendorf) por 15 minutos.
- Descartou-se o sobrenadante até que restasse 10 mL no final de cada tubo de centrífuga, dissolvendo o “pellet” formado com a ajuda de um vórtex.
- Concentrou-se o restante dos dois tubos em um tubo apenas, resultando em 20 mL, lavando o outro com 5 mL junto a um vórtex por duas vezes, totalizando assim em 30 mL finais.
- Centrifugou-se novamente a 1500 g por 15 minutos.
- Descartou-se o sobrenadante até 5 mL restantes, levando ao vórtex e mantendo em repouso a 4 °C de um dia para o outro (*overnight*).

##### PURIFICAÇÃO DA AMOSTRA POR IMS E CAPTURA DOS CISTOS

A purificação de amostras foi realizada através da separação imunomagnética (IMS) segundo protocolo do fabricante Dynal CG – Combo anti-*Cryptosporidium* & *Giardia*.

- Previamente, procedeu-se a retirada do Kit de IMS (Invitrogen Dynal AS, Norway) da geladeira para ficar à temperatura ambiente.
- Realizou-se uma diluição 1X do tampão SL-A, a partir do tampão SL-A 10X do kit, totalizando em uma diluição 100 µL de SL-A 10X completado

com 1,0 mL de água, consequentemente realizando uma diluição de 10 vezes.

- No tubo de lado plano adicionou-se 1 mL de tampão SL-A 10X, 1 mL do tampão SL-B e a amostra concentrada que estava em *overnight*.
- Lavou-se o tubo de centrífuga com 2,5 mL de água deionizada, transferindo o volume final para o tubo de lado plano, repetindo essa ação por 2 vezes. O volume final no tubo plano foi de 12 mL.
- Adicionou-se 100 µL dos *Dynabeads*® de anti-Crypto e 100 µL de anti-Giardia ao tubo contendo o concentrado da amostra e os tampões A e B.
- Fixou-se o tubo de lado plano em um misturador rotatório com agitação de 18 rpm durante 1 hora, à temperatura ambiente.
- Colocou-se o tubo de lado plano no Concentrador de partículas (MPC-1), após a 1 hora de agitação, com o lado plano do tubo junto ao magneto, balançando manualmente (cerca de 90°), suavemente e continuada durante 2 minutos.
- Ainda no MPC-1, despejou-se o sobrenadante do lado contrário ao lado plano, sem agitação e sem removê-lo durante esta etapa.
- Com a remoção, ressuspendeu-se a amostra em 0,5 mL do tampão SL-A 1X, duas vezes, misturando levemente, sem a necessidade do vórtex.
- Foi feita, então, a transferência de todo o líquido para um tubo de microcentrífuga (eppendorf), deixando-o repousar pelo menos 1 minuto, assegurando que todo o líquido e as partículas foram transferidos.
- Colocou-se o tubo de microcentrífuga em um segundo concentrador de partículas magnéticas (MPC-M) com sua faixa magnética no local, agitando suavemente o tubo em um ângulo de 180°, por, aproximadamente, 1 minuto.
- Após isso, as partículas produziram uma nítida mancha marrom na parte de trás do tubo. Por fim, foi necessária a aspiração do sobrenadante do tubo e da tampa, mantidos no MPC-M, sem remover o tubo e sem agitar.

#### **DISSOCIAÇÃO ÁCIDA DOS CISTOS DAS PARTÍCULAS E TESTE DE VIABILIDADE**

- Após a remoção da fita magnética do Concentrador de Partículas ( Dynal MPC-S), adicionou-se 50 µL de ácido clorídrico 0,1N ao tubo de microcentrifugação, agitando-o no vórtex logo em seguida, durante 10 segundos.

- Colocou-se novamente o tubo no Concentrador Magnético de Partículas, sem a tira magnética e o manteve na posição vertical durante 10 minutos, à temperatura ambiente.
- O tubo de microcentrífuga foi levado ao vórtex por 10 segundos e, logo após, retornado ao concentrador de partículas, colocando a fita magnética.
- Deixou-se em repouso por 10 segundos. Colocou-se em um well (poço) 5  $\mu$ L de NaOH (1 N), transferindo em seguida o sobrenadante da microcentrífuga.
- Deixou-se secar completamente (cerca de 1 hora). Adicionou-se de 10 a 50  $\mu$ L de metanol, deixando secar por 10 minutos.
- Colocou-se, com cuidado, 1 gota do Reagente/Fluído de Detecção, marcado com fluorescência e 1 gota do contra-corante, ocasionando a mistura.
- Deixou-se em repouso por 30 minutos em uma câmara úmida, incubada a 37°C.
- Efetuou-se a lavagem com água mantendo a lâmina inclinada.
- Colocou-se 100  $\mu$ L de uma solução DAPI (4', 6-diamidino-2fenil-indol) a cada poço e deixou-se a temperatura ambiente durante no mínimo um minuto.
- Inclinou-se a lâmina, com a borda do lado mais longo para baixo, em papel toalha.
- Adicionou-se 50  $\mu$ L da solução de iodeto de propídeo nos poços com a amostra desinfetada e deixa-se a temperatura ambiente por 15 minutos.
- Inclinou-se a lâmina, com a borda do lado mais longo para baixo, em papel toalha. Por fim, adicionou-se o meio de montagem em cada poço e colocou-se a lamínula e procedeu-se à leitura das lâminas.

As amostras foram examinadas em microscópio de imunofluorescência sob aumento de 400X para pesquisar a ocorrência e viabilidade de cistos de *Giardia* spp.

#### 4.2.2.2 MÉTODO II

O segundo método foi aplicado nos ensaios realizados para a desinfecção com ozônio-ultravioleta, com base na metodologia adaptada de McCuin & Clancy (2005) e Robertson *et al.* (2000). Utilizou-se 50 mL de efluente homogeneizado acrescentados 50 mL de Tween 80 a 0,1% que, depois de centrifugados a 1500g (Centrífuga 5810, Eppendorf) por 15 minutos, foi realizada a etapa de RID.

## REAÇÃO DE IMUNOFLORESCÊNCIA DIRETA (RID)

- Em um poço da placa, colocou-se, após 2 minutos de homogeneização, 50  $\mu$ L da amostra, espalhando com uma alça plástica.
- Deixou-se secar completamente à temperatura ambiente por, no mínimo, 2 horas.
- Colocou-se uma gota de metanol, deixando secar por 10 minutos.
- Com o Kit Merifluor, colocou-se o reagente de detecção junto ao contracorante, misturando-os com a alça plástica, com cuidado para não tocar o fundo do poço.
- Logo após, foi necessário o repouso da placa em uma placa de petri com papel úmido na incubadora à 37°C por 30 minutos.
- Após o tempo de espera, colocou-se 5 gotas de água no poço e inclinou-se 45° a placa para que o líquido escorresse, secando-o em volta com papel seco.
- Colocou-se 30  $\mu$ L de iodeto de propídio (PI), deixando em repouso por 15 minutos.
- Depois, colocou-se 5 gotas de água deionizada no poço e virou-se a placa 45° secando novamente com papel.
- Por fim, colocou-se o meio de montagem e a lamínula, podendo armazenar na geladeira.

As amostras foram examinadas em microscópio de imunofluorescência sob aumento de 400X para pesquisar a ocorrência e viabilidade de cistos de *Giardia* spp.

### 4.2.2.3 LEITURA DOS RESULTADOS

***Giardia* spp.:** Se forem observados objetos arredondados a ovais, com fluorescência verde (8-18  $\mu$ m de comprimento por 5-15  $\mu$ m de largura), passar o filtro bloco UV para DAPI.

Utilizando o filtro de bloco UV para DAPI, o objeto irá apresentar uma ou mais das seguintes características:

- a) dois a quatro núcleos azul-claros;
  - b) intensa coloração azul interna;
  - c) ligeira coloração azul interna (sem núcleos distintos) e uma borda verde.
- (a) e (b) são registrados como DAPI + e (c) como DAPI -.

Se essas estruturas atípicas não forem observadas, identificar cada objeto com fluorescência verde do tamanho e forma acima mencionados como cistos presuntivos de *Giárdia*.

Para o teste com PI, os cistos identificados por RID e DAPI eram diferenciados em: PI negativo, que consiste na não penetração do reagente de iodeto de propídio no cisto, declarando assim como um cisto viável; PI positivo, com a penetração do reagente no cisto, sendo assim, um cisto inviável.

A análise da contabilização de cistos viáveis e inviáveis e os resultados procedentes de inativação baseiam-se na quantificação a partir da equação 20.

$$\text{Inativação} = -\log (N/N_0)$$

Onde:

N: Porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de efluente

N<sub>0</sub>: Porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto

#### **4.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS**

As análises realizadas no estudo de parâmetros físico-químicos foram seguidas a partir do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF (2005). Assim, na tabela a seguir (Tabela 4.1) são apresentados os equipamentos e métodos utilizados:

**Tabela 4.1 – Métodos Analíticos empregados para análises físico-químicas.**

Análise	Método e Equipamentos
<b>Absorbância em comprimento de onda de 254 nm</b>	Espectofotômetro DR 4000
<b>Alcalinidade Total</b>	Titulação potenciométrica com ácido sulfúrico até pH 4,3 (Método 2320B)
<b>Cloro residual livre e total</b>	Método DPD colorimétrico (4500 G)
<b>DQO</b>	Método colorimétrico em refluxo fechado (5220 D)
<b>Ozônio Residual</b>	Método iodométrico e método colorimétrico (4500 B)
<b>pH</b>	Método Potenciométrico. pH meter – Denver Instrument
<b>Sólidos Totais</b>	Método Gravimétrico (2540 B)
<b>Sólidos Suspensos Totais</b>	Método Gravimétrico – filtração em membrana (1,2 µm) (2540 B)
<b>Temperatura</b>	Termômetro de mercúrio

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

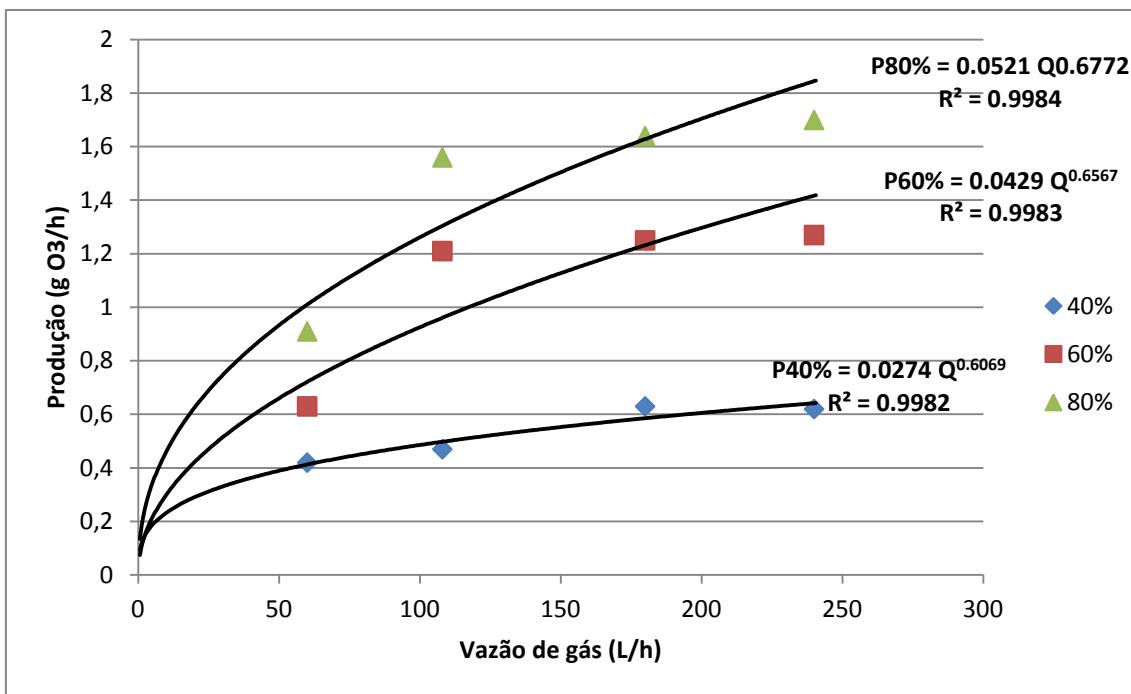
### 5.1 CALIBRAÇÃO DA COLUNA DE OZONIZAÇÃO

Os valores obtidos na produção de ozônio para a sua calibração estão reunidos na tabela 5.1.

**Tabela 5.1 – Produção de Ozônio pelo equipamento gerador de ozônio**

Tensão Aplicada	Vazão (L/h)	Produção (g O <sub>3</sub> /h)
40%	0	0
	60	0,42
	108	0,47
	180	0,63
	240	0,62
60%	0	0
	60	0,63
	108	1,21
	180	1,25
	240	1,27
80%	0	0
	60	0,91
	108	1,56
	180	1,64
	240	1,7

As curvas de calibração (Figura 5.1) foram ajustadas relacionando as vazões de gás e suas respectivas produções de ozônio, só valendo para as condições experimentais semelhantes às dos ensaios.



**Figura 5.1: Curva de Calibração do Gerador de ozônio.**

A realização de uma curva de calibração baseia-se na necessidade de uma análise comportamental da coluna de ozônio para o inicio das desinfecções com esgoto. Esta curva fornece os dados necessários para ajustar a vazão de gás à produção requerida na obtenção da dosagem de ozônio. Nota-se a estabilização da produção de ozônio com o aumento da vazão de gás, assim como um aumento relevante do mesmo em intervalos de pequenas vazões. A curva foi ajustada a um modelo exponencial.

## 5.2 BALANÇO DE MASSA DO OZÔNIO

Foram realizados quatro ensaios com a utilização de Ozônio (Ensaios VII, VIII, IX, X). Os dados característicos estão apresentados na tabela a seguir (Tabela 5.2).

**Tabela 5.2: Balanço de massa dos ensaios com ozônio.**

<b>Variável</b>	<b>Ensaios</b>			
	<b>VII</b>	<b>VIII</b>	<b>IX</b>	<b>X</b>
<b>Produção de O<sub>3</sub> (g/L)</b>	0,63	0,63	0,63	0,63
<b>Dosagem (mg/L)</b>	10,5	10,5	5	5
<b>Ma (mg)</b>	105	105	50	50
<b>Mt (mg)</b>	105	105	50	50
<b>M<sub>off-gás</sub></b>	0	0	0	0
<b>M<sub>R</sub> (mg)</b>	0,12	0,10	0	0
<b>Mc (mg)</b>	104,88	104,9	50	50
<b>[O<sub>3</sub>]<sub>off-gás</sub> (mg/L)</b>	0	0	0	0
<b>[O<sub>3</sub>]<sub>R</sub> (mg/L)</b>	0	0	0	0
<b>[O<sub>3</sub>]<sub>C</sub> (mg/L)</b>	10,5	10,5	5	5

Notas: M<sub>A</sub>: massa total do ozônio aplicada; M<sub>T</sub>: massa transferida ao meio líquido; M<sub>off-gás</sub>: massa do off-gás – não transferida; M<sub>R</sub> = massa residual; M<sub>C</sub> = massa consumida; [O<sub>3</sub>]<sub>off-gás</sub> (mg/L): concentração de ozônio referente ao off-gás; [O<sub>3</sub>]<sub>R</sub>: concentração de ozônio residual; [O<sub>3</sub>]<sub>C</sub>: concentração de ozônio consumida.

Assim, os valores para CT utilizados foram (Tabela 5.3):

**Tabela 5.3: Taxa de consumo e CT dos ensaios com ozônio.**

	<b>Ensaios</b>			
	<b>VII</b>	<b>VIII</b>	<b>IX</b>	<b>X</b>
<b>Tempo de Contato (min)</b>	10	10	4,75	4,75
<b>[O<sub>3</sub>]<sub>C</sub> (mg/L)</b>	10,5	10,5	5	5
<b>Taxa de consumo de O<sub>3</sub> (mg/L.min)</b>	1,05	1,05	1,05	1,05
<b>CT (mg.min/L)</b>	52,5	52,5	11,8	11,8

Notas: [O<sub>3</sub>]<sub>C</sub>: concentração de ozônio consumida; CT: concentração x tempo de contato

### 5.3 EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS

Nas tabelas 5.4 a 5.9 estão apresentados os resultados dos ensaios físico-químicos para desinfecção com cloro (dosagens de 10 e 20 mg e tempos de 10 e 20 min), radiação ultravioleta (dosagem de 2,5 Wh/m<sup>3</sup>) e desinfecção seqüencial cloro-radiação ultravioleta.

**Tabela 5.4 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio I.**

<b>Ensaio I - Cloro (10 min e 10 mg) e UV (2,5 Wh/m<sup>3</sup>)</b>				
	Bruto	Cloro	UV	Cloro – UV
<b>Temperatura</b>	24°C	-	-	-
<b>pH</b>	6,82	6,62	6,88	6,97
<b>Alcalinidade</b>	182	183	183	181
<b>DQO</b>	542 ± 14	572 ± 40	453 ± 17	551 ± 13
<b>ST</b>	434 ± 82	657 ± 24	658 ± 59	512 ± 74
<b>SST</b>	111 ± 43	147 ± 7	155 ± 66	127 ± 34
<b>Cl – Livre</b>	-	1,91	-	-
<b>Cl – Total</b>	-	2,90	-	-

**Tabela 5.5 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro. – Ensaio II.**

<b>Ensaio II - Cloro (10 min e 10 mg) e UV (2,5 Wh/m<sup>3</sup>)</b>				
	Bruto	Cloro	UV	Cloro – UV
<b>Temperatura</b>	21°C	-	-	-
<b>pH</b>	6,71	6,77	6,97	6,87
<b>Alcalinidade</b>	258	246	256	252
<b>DQO</b>	585 ± 5	637 ± 0	615 ± 1	612 ± 4
<b>ST</b>	550 ± 0	757 ± 4	639 ± 47	726 ± 3
<b>SST</b>	183 ± 7	153 ± 3	205 ± 11	141 ± 11
<b>Cl – Livre</b>	-	0,39	-	0,14
<b>Cl – Total</b>	-	2,53	-	0,17

**Tabela 5.6 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio III.**

<b>Ensaio III - Cloro (20 min e 10 mg) e UV ( 2,5 Wh/m<sup>3</sup>)</b>				
	<b>Bruto</b>	<b>Cloro</b>	<b>UV</b>	<b>Cloro - UV</b>
<b>Temperatura</b>	26°C	-	-	-
<b>pH</b>	7,16	7,23	7,23	7,39
<b>Alcalinidade</b>	237	237	236	234
<b>DQO</b>	384 ± 15	386 ± 1	389 ± 2	416 ± 24
<b>ST</b>	500 ± 6	590 ± 20	554 ± 17	604 ± 23
<b>SST</b>	91 ± 5	89 ± 6	98 ± 11	90 ± 4
<b>Cl – Livre</b>	-	0,39	-	-.
<b>Cl – Total</b>	-	2,53	-	-

**Tabela 5.7 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio IV.**

<b>Ensaio IV - Cloro (20 min e 10 mg) e UV ( 2,5 Wh/m<sup>3</sup>)</b>				
	<b>Bruto</b>	<b>Cloro</b>	<b>UV</b>	<b>Cloro - UV</b>
<b>Temperatura</b>	21°C	-	-	-
<b>pH</b>	6,52	6,58	6,84	6,76
<b>Alcalinidade</b>	237	220	237	227
<b>DQO</b>	599 ± 2	511 ± 7	567 ± 6	534 ± 10
<b>ST</b>	675 ± 18	889 ± 69	602 ± 17	722 ± 25
<b>SST</b>	200 ± 11	137 ± 13	155 ± 15	134 ± 1
<b>Cl – Livre</b>	-	0,07	-	-
<b>Cl – Total</b>	-	0,16	-	-

**Tabela 5.8 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro – Ensaio V**

<b>Ensaio V - Cloro (10 min e 20 mg) e UV ( 2,5 Wh/m<sup>3</sup>)</b>				
	<b>Bruto</b>	<b>Cloro</b>	<b>UV</b>	<b>Cloro - UV</b>
<b>Temperatura</b>	21°C	-	-	-
<b>pH</b>	6,52	6,44	6,84	6,67
<b>Alcalinidade</b>	237	195	237	226
<b>DQO</b>	599 ± 2	615 ± 5	567 ± 6	541 ± 5
<b>ST</b>	675 ± 18	1157 ± 61	602 ± 17	822 ± 51
<b>SST</b>	200 ± 11	139 ± 3	155 ± 15	125 ± 20
<b>Cl – Livre</b>	-	4,42	-	0,04
<b>Cl – Total</b>	-	4,5	-	0,10

**Tabela 5.9 – Resultados de ensaios de desinfecção com cloro –Ensaio VI.****Ensaio VI - Cloro (10 min e 20 mg) e UV ( 2,5 Wh/m<sup>3</sup>)**

	<b>Bruto</b>	<b>Cloro</b>	<b>UV</b>	<b>Cloro – UV</b>
<b>Temperatura</b>	27° C	-	-	-
<b>pH</b>	6,99	6,84	7,03	7,09
<b>Alcalinidade</b>	221	261	267	256
<b>DQO</b>	420 ± 7	439 ± 0	473 ± 3	444 ± 6
<b>ST</b>	499 ± 1	700 ± 6	473 ± 35	681 ± 16
<b>SST</b>	112 ± 4	109 ± 12	93 ± 1	127 ± 32
<b>Cl – Livre</b>	-	1,8	-	-
<b>Cl – Total</b>	-	6,64	-	-

Pode-se notar em relação ao pH alguns aspectos:

Nos ensaios I e II com aplicação de cloro de 10 mg/L e tempo de contato de 10 minutos, ocorreu queda do pH no primeiro e aumento de pH no segundo ensaio. Com o aumento de contato para 20 minutos, o cloro mostrou uma tendência em aumentar o pH. Nos ensaios com a dosagem aumentada para 20 mg/L e o tempo de contato em 10 minutos há a ocorrência da diminuição do pH.

A diminuição do pH é uma consequência da oxidação da monoclaramina, ocasionada pela formação e decaimento até o breakpoint do NaOH a partir da adição de NaOCl. Nas análises após a desinfecção seqüencial, verifica-se um aumento do pH, provavelmente ocasionada pela dose de UV adicionada.

Em relação à DQO, nota-se que na maioria dos ensaios ela aumentou consideravelmente. Isso se deve principalmente à interferência de íons cloreto na análise da DQO, advindos do próprio esgoto e da solução de hipoclorito de sódio utilizada nos ensaios de desinfecção.

Os sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos totais possuem um papel importante na desinfecção. Eles podem aderir microrganismos patogênicos, interferir a difusão do cloro e a penetração da luz ultravioleta, podendo absorver e limitar sua ação como desinfetante. Pode-se notar que a cloração ocasionou aumento na concentração de sólidos totais em todos os ensaios, como ocorreu com Lourenço

(2009). A partir da aplicação da dose de UV, houve um decréscimo da concentração de sólidos totais.

Pode-se notar que o aumento na concentração de cloro residual livre (Cl – livre) e cloro residual total (Cl – total) é ocasionado pelo aumento da dosagem de cloro. O tempo de contato também influi, quanto maior este tempo, menor foi a concentração de cloro residual devido às reações com a matéria orgânica.

Os padrões físicos e químicos servem como apoio para uma comparação a diversos resultados, principalmente em relação à inativação dos microrganismos.

Nas tabelas 5.10 a 5.13 estão apresentados os valores das variáveis obtidos nos ensaios de desinfecções com dosagem de ozônio a 10 e 5 mg/L respectivamente.

**Tabela 5.10: Características Físico-Químicas da desinfecção com ozônio – Ensaio VII**

<b>Ensaio VII - Desinfecção com Ozônio (10 mg/L)</b>				
	<b>Bruto</b>	<b>Ozônio</b>	<b>U.V.</b>	<b>Ozônio – U.V.</b>
<b>Temperatura</b>	25°	25°	25°	25°
<b>DQO</b>	100 ± 2	86 ± 3	91 ± 2	87 ± 5
<b>Alcalinidade</b>	282	170	183	172
<b>pH</b>	6,98	7,80	7,06	7,75
<b>ST ( mg/L )</b>	137	105	165	491
<b>SSV ( mg/L )</b>	80	74	70	72

**Tabela 5.11: Características Físico-Químicas da desinfecção com ozônio – Ensaio VIII**

	<b>Bruto</b>	<b>Ozônio</b>	<b>U.V.</b>	<b>Ozônio – U.V.</b>
<b>Temperatura</b>	25°	25°	25°	25°
<b>DQO</b>	107 ± 5	99 ± 3	98 ± 2	90 ± 2
<b>Alcalinidade</b>	301	170	192	181
<b>pH</b>	6,77	7,20	7,20	7,45
<b>ST ( mg/L )</b>	142	98	120	108
<b>SSV ( mg/L )</b>	79	71	71	72

**Tabela 5.12: Características Físico-Químicas da desinfecção com ozônio – Ensaio IX**

<b>Ensaio IX - Desinfecção com Ozônio (5 mg/L)</b>				
	Bruto	Ozônio	U.V.	Ozônio – U.V.
<b>Temperatura</b>	24°	25°	24°	25°
<b>DQO</b>	171 ± 2	176 ± 4	198 ± 3	186 ± 2
<b>Alcalinidade</b>	236	166	182	190
<b>pH</b>	6,62	7,08	6,85	6,98
<b>ST ( mg/L )</b>	122	109	140	150
<b>SSV ( mg/L )</b>	57	52	55	52

**Tabela 5.13: Características Físico-Químicas da desinfecção com ozônio – Ensaio X**

<b>Ensaio X - Desinfecção com Ozônio (5 mg/L)</b>				
	Bruto	Ozônio	U.V.	Ozônio – U.V.
<b>Temperatura</b>	26°	26°	25°	25°
<b>DQO</b>	163 ± 1	171 ± 2	185 ± 3	172 ± 4
<b>Alcalinidade</b>	222	157	190	199
<b>pH</b>	6,68	7,30	6,70	6,74
<b>ST ( mg/L )</b>	117	99	131	130
<b>SSV ( mg/L )</b>	40	50	67	59

Pode-se notar que houve um aumento do pH conforme o aumento da dosagem de ozônio no efluente. Segundo Lourenço (2009) e Medeiros (2010), isso se deve ao *stripping* de gás carbônico. Porém, não revelam efeitos quanto à desinfecção e a ação do pH no mesmo.

A alcalinidade, segundo Soares (2007), tende à diminuição conforme a utilização dos desinfetantes, facilitando a desinfecção a partir da prevalência do ozônio na forma de ozônio molecular, sendo este o mais eficiente.

A modificação da DQO deve-se ao consumo de ozônio perante a oxidação de matéria orgânica. Ou seja, quanto menor a sua dosagem, menor a sua oxidação e consequentemente, maior os valores de DQO. Parte da DQO pode ter sido removida junto com espuma resultante após o borbulhamento de gás na coluna de ozonização, explicado por Lourenço (2009).

Observam-se remoções de sólidos totais conforme a utilização de ozônio, mostrando a efetivação na oxidação de matéria. Podemos notar esta ocorrência com uma diminuição de aproximadamente 31% no ensaio VIII e de 16% no ensaio X. Segundo Medeiros (2010), a quantidade de sólidos totais no efluente pode limitar a ação desinfetante do ozônio por formar agregados partícula-microrganismo. Também segundo Medeiros (2010) a dose reforçada de U.V. perante as doses recebidas de ozônio deveriam aumentar a remoção de sólidos, o que não foi observado. Isso se deve a possível qualidade do esgoto, assim como a homogeneização.

## 5.4 EXAMES MICROBIOLÓGICOS

### 5.4.1 *E. COLI* E COLIFORMES TOTAIS

As tabelas a seguir mostram as desinfecções das bactérias com a utilização de cloro e ultravioleta singulares e em seqüência.

**Tabela 5.14 – Resultados da desinfecção de bactérias com a utilização de cloro.**

Ensaio [C ; T]	Coliformes Totais		<i>E. coli</i>	
	N/No	Inativação	N/No	Inativação (log)
<b>Ensaio I – [10;10]</b>	$2 \times 10^{-4}$	3,70	< 1d	> 4,60
<b>Ensaio II – [10;10]</b>	$5 \times 10^{-5}$	4,30	< 1d	> 4,30
<b>Ensaio III – [10;20]</b>	< 1d	> 4,95	< 1d	> 4,43
<b>Ensaio IV – [20;10]</b>	< 1d	> 4,95	< 1d	> 4,43
<b>Ensaio V – [10;20]</b>	$1,4 \times 10^{-3}$	2,9	< 1d	> 4,36
<b>Ensaio VI – [20;10]</b>	< 1d	> 4,40	< 1d	> 3,48

Notas: [C;T]: [Concentração aplicada de cloro; tempo de contato]; N: Porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de efluente; No: Porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto; Inativação: - log (N/No).

Como se podem notar, as resistências de Coliformes Totais e *E. coli* são baixas comparadas a desinfecção causada pelo cloro, causando 100% de eficiência na inativação de *E.coli* em todos os ensaios e apenas nos ensaios III, IV e V para coliformes totais. No ensaio V, houve a menor inativação dos coliformes totais com 2,9 unidades logarítmicas. Sartori (2007) encontrou até 5 log de remoção para *E.coli* e coliformes fecais com o mesmo tempo e concentração.

**Tabela 5.15 – Resultados da desinfecção de bactérias com a utilização de radiação ultravioleta**

<b>Ensaio</b>	<b>Coliformes Totais</b>		<b><i>E. coli</i></b>	
	<b>N/No</b>	<b>Inativação</b>	<b>N/No</b>	<b>Inativação (log)</b>
<b>Ensaio I</b>	$1 \times 10^{-3}$	3,0	$2,5 \times 10^{-4}$	3,60
<b>Ensaio II</b>	$2,1 \times 10^{-5}$	4,67	< ld	> 4,30
<b>Ensaio III</b>	$6,8 \times 10^{-4}$	3,17	$1,9 \times 10^{-4}$	3,73
<b>Ensaio IV</b>	$3,2 \times 10^{-4}$	3,50	< ld	> 4,36
<b>Ensaio V</b>	$8,8 \times 10^{-4}$	3,06	$6,7 \times 10^{-4}$	3,18
<b>Ensaio VI</b>	$2,4 \times 10^{-4}$	3,62	$6,3 \times 10^{-5}$	4,20

Notas: No = nº de microrganismos no esgoto bruto de cada ensaio; N = nº de microrganismos após desinfecção; Inativação: -log (N/No); ld: limite de detecção.

A bactéria *E. coli* foi o microrganismo que mais sofreu inativação com a exposição à radiação ultravioleta com dose de 2,5 Wh/m<sup>3</sup>, chegando nos ensaios II e IV a ser 100% inativado e nos outros, tendo uma inativação acima de 3,0 unidades logarítmicas. Os coliformes totais apresentaram uma inativação alta, sendo todas acima de 3,0 unidades logarítmicas. Os dados se assemelham aos encontrados na literatura, onde Lorenção (2009), Monaco (2006) e Coletti (2003) encontraram valores coincidentes, assim como Dias (2001) encontrou 1 a 2 log adicionais para coliformes totais.

**Tabela 5.16 Resultados da desinfecção de bactérias por desinfecção sequencial cloro-ultravioleta**

<b>Ensaio [C ; T]</b>	<b>Coliformes Totais</b>		<b><i>E. coli</i></b>	
	<b>N/No</b>	<b>Inativação (log)</b>	<b>N/No</b>	<b>Inativação (log)</b>
<b>Ensaio I – [10;10]</b>	< ld	> 5,70	< ld	> 4,60
<b>Ensaio II – [10;10]</b>	< ld	> 5,15	< ld	> 4,30
<b>Ensaio III – [10;20]</b>	< ld	> 4,95	< ld	> 4,43
<b>Ensaio IV – [20;10]</b>	< ld	> 4,95	< ld	> 4,43
<b>Ensaio V – [10;20]</b>	$2,4 \times 10^{-4}$	3,6	< ld	> 4,36
<b>Ensaio VI – [20;10]</b>	< ld	> 4,40	< ld	> 3,48

Notas: [C;T]: [Concentração aplicada de cloro; tempo de contato]; N: Porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de esgoto; No: Porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto; Inativação: -log (N/No); nd: não detectada a presença de cistos.

Com 100% de inativação da *E. coli* somente utilizando o desinfetante cloro, a mesma inativação foi obtida utilizando a desinfecção seqüencial. Em relação aos

coliformes totais, somente o ensaio IV não obteve 100% de inativação, conseguindo o valor de 3,6 log.

As tabelas 5.17, 5.18 e 5.19 mostram as desinfecções das bactérias com a utilização de ozônio e radiação ultravioleta, singulares e em seqüência.

**Tabela 5.17 – Resultados da desinfecção de bactérias com a utilização de ozônio**

Ozônio	Coliformes Totais		<i>E. coli</i>	
	N/No	Inativação (log)	N/No	Inativação (log)
<b>Ensaio VII – [10 mg/L]</b>	$8,6 \times 10^{-4}$	3,0	< 1d	> 4,6
<b>Ensaio VIII – [10 mg/L]</b>	< 1d	> 4,6	< 1d	> 4,6
<b>Ensaio IX [5 mg/L]</b>	$1,8 \times 10^{-4}$	3,7	$3,0 \times 10^{-5}$	4,5
<b>Ensaio X [5mg/L]</b>	$2,9 \times 10^{-4}$	3,5	< 1d	> 4,6

Notas: No = nº de microrganismos no esgoto bruto de cada ensaio; N = nº de microrganismos após desinfecção; Inativação: -log (N/No); Id: limite de detecção.

**Tabela 5.18 – Resultado da desinfecção de bactérias com utilização de radiação ultravioleta**

Ultravioleta	Coliformes Totais		<i>E. coli</i>	
	N/No	Inativação (log)	N/No	Inativação (log)
<b>Ensaio VII – [10 mg/L]</b>	$3,6 \times 10^{-5}$	4,4	$2,5 \times 10^{-4}$	3,6
<b>Ensaio VIII – [10 mg/L]</b>	$4,4 \times 10^{-5}$	4,3	< 1d	> 4,6
<b>Ensaio IX [5 mg/L]</b>	$2,1 \times 10^{-5}$	4,6	< 1d	> 4,6
<b>Ensaio X [5mg/L]</b>	$2,6 \times 10^{-5}$	4,6	< 1d	> 4,6

**Tabela 5.19 Resultado da desinfecção de bactérias por desinfecção sequencial ozônio – radiação ultravioleta**

Seqüencial	Coliformes Totais		<i>E. coli</i>	
	N/No	Inativação (log)	N/No	Inativação (log)
<b>Ensaio VII – [10 mg/L]</b>	< 1d	> 4,6	< 1d	> 4,6
<b>Ensaio VIII – [10 mg/L]</b>	< 1d	> 4,6	< 1d	> 4,6
<b>Ensaio IX [5 mg/L]</b>	< 1d	> 4,6	< 1d	> 4,6
<b>Ensaio X [5mg/L]</b>	< 1d	> 4,6	< 1d	> 4,6

Nos ensaios realizados, nota-se a fragilidade da *E. coli* perante os desinfetantes. Nos casos de desinfecção apenas com ozônio e em sequência, nota-se a possível presença abaixo do limite de detecção (1d), tanto na desinfecção com CT de 52 mg.min/L como para 11. Segundo Sartori (2004), suas pesquisas conseguiram uma

inativação de 3 log para *E. coli*, sob CT de 180 mg.min/L. Lourenção, com CT de 55 mg.min/L obteve 0,75 log de inativação.

Para coliformes totais, a eficiência da desinfecção sequencial ainda é observada. Em ambos os ensaios, a desinfecção sequencial obteve uma inativação maior que o limite de detecção.

#### 5.4.2 *GIARDIA* spp.

As tabelas 5.20, 5.21 e 5.22 a seguir são os resultados das desinfecções utilizando apenas cloro, apenas radiação ultravioleta e a desinfecção sequencial cloro-ultravioleta respectivamente.

**Tabela 5.20 – Resultados da inativação de *Giardia* spp. utilizando cloro.**

Ensaio [C ; T]	N/No	Inativação
Ensaio II - [10;10]	$8,2 \times 10^{-1}$	0,09
Ensaio III - [20;10]	1	0
Ensaio IV - [10;20]	1	0
Ensaio V – [20;10]	$6,9 \times 10^{-1}$	0,16

Notas: [C;T]: [Concentração aplicada de cloro; tempo de contato]; N: Porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de efluente; No: Porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto; Inativação: - log (N/No); nd: não detectada a presença de cistos.

Da análise dos resultados obtidos da desinfecção de cistos de *Giardia* spp. com cloro, pode-se concluir que foi pouco eficaz, conseguindo no máximo 0,16 log de inativação (Ensaio V). Segundo Sartori (2007), para o mesmo tempo de contato e concentração de 10 minutos e 20 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, a desinfecção foi efetiva e obteve 0,44 log de inativação. Esta variação pode ser caracterizada pela diferença em fatores experimentais, assim como a caracterização físico-química da amostra analisada, além de fatores específicos da cinética de inativação.

**Tabela 5.21 – Resultados da inativação de *Giardia* spp. utilizando radiação ultravioleta**

Ensaio	<i>Giardia</i> spp.	
	N/No	Inativação (log)
Ensaio II	$9,6 \times 10^{-1}$	0,016
Ensaio IV	1	0
Ensaio V	$7,1 \times 10^{-1}$	0,15
Ensaio VI	1,12	-0,05

Notas: N:porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de efluente; No: porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto; Inativação: -log (N/No); nd: não detectada a presença de cistos

Os ensaios de recuperação podem ter sido prejudicados pela discrepância das características físico-químicas, podendo ser o motivo do valor negativo encontrado no Ensaio VI. Uma das explicações prováveis é a possível influência da sensibilidade do método com iodeto de propídio, para inferir viabilidade dos cistos.

Sartori (2007) indica uma inativação de cistos de *Giardia* spp. na ordem de 0,3 a 0,35 log para doses próximas a  $2,5 \text{ Wh.m}^{-3}$ . Os ensaios realizados neste projeto obtiveram inativações de no máximo 0,15 unidades logarítmicas, verificando uma resistência maior dos cistos a radiação utilizada, junto a uma diminuição da viabilidade.

**Tabela 5.22 – Resultados da inativação de *Giardia* spp por sequencial cloro - ultravioleta**

Ensaio [C ; T]	<i>Giardia</i> spp.	
	N/No	Inativação
Ensaio II - [10;10]	$5,8 \times 10^{-1}$	0,23
Ensaio III - [20;10]	$9,8 \times 10^{-1}$	0,01
Ensaio IV - [10;20]	$8,2 \times 10^{-1}$	0,09
Ensaio V – [20;10]	$6,7 \times 10^{-1}$	0,18

Notas: [C;T]: [Concentração aplicada de cloro; tempo de contato]; N: Porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de efluente; No: Porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto; Inativação: - log (N/No); nd: não detectada a presença de cistos.

Os cistos de *Giardia* spp. foram menos viáveis com a desinfecção seqüencial no ensaio II, com concentração em 10 mg/L e tempo de 10 minutos, alcançando 0,23 unidades logarítmicas.

As tabelas 5.23, 5.24 e 5.25 demonstram os resultados das desinfecções utilizando apenas ozônio, apenas radiação ultravioleta e a desinfecção seqüencial ozônio-ultravioleta respectivamente.

**Tabela 5.23 – Resultado da inativação de *Giardia spp.*, apenas por ozônio**

Ensaio	<i>Giardia spp.</i>	
	N/No	Inativação
Ensaio VII – [10 mg/L]	0,66	0,18
Ensaio VIII – [10 mg/L]	0,71	0,14
Ensaio IX [5 mg/L]	0,79	0,10
Ensaio X [5mg/L]	0,83	0,08

Notas: N:porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de efluente; No: porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto; Inativação: -log (N/No); nd: não detectada a presença de cistos

Pode-se notar que a inativação não alcançou valores altos, destacando o Ensaio VI, com 0,18 unidades logarítmicas de inativação com o maior valor e o Ensaio X, com 0,08 logs de inativação sendo o menor valor.

**Tabela 5.24 – Resultado da inativação de *Giardia spp.*, apenas por ultravioleta**

Ensaio	<i>Giardia spp.</i>	
	N/No	Inativação
Ensaio VII – [10 mg/L]	0,73	0,14
Ensaio VIII – [10 mg/L]	0,84	0,07
Ensaio IX [5 mg/L]	0,81	0,09
Ensaio X [5mg/L]	0,875	0,06

Notas: N:porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de efluente; No: porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto; Inativação: -log (N/No); nd: não detectada a presença de cistos

A diminuição de viabilidade somente por radiação ultravioleta foi o de pior desempenho perante os ensaios. Isto se deve à resistência dos cistos existentes, impedindo a entrada efetiva da radiação. Com isto, o maior valor de inativação chegou a 0,14 log para o Ensaio I (10 mg/L) e o menor de 0,06 para o Ensaio IV (5 mg/L).

**Tabela 5.25 – Resultado da inativação de *Giardia spp*, por desinfecção sequencial ozônio-ultravioleta**

Ensaio	<i>Giardia spp</i>	
	N/No	Inativação
Ensaio VII – [10 mg/L]	0,12	0,92
Ensaio VIII – [10 mg/L]	0,26	0,57
Ensaio IX [5 mg/L]	0,32	0,49
Ensaio X [5mg/L]	0,68	0,16

Notas: N:porcentagem de cistos viáveis em determinado tipo de efluente; No: porcentagem de cistos viáveis no esgoto bruto; Inativação: -log (N/No); nd: não detectada a presença de cistos

Para a *Giardia spp.*, nota-se aumento significativo da inativação, de 0,49 com dosagem de ozônio a 5 mg/L e 0,92 para dosagem de ozônio a 10 mg/L.

## 5.5 SINERGISMO

O sinergismo ocorre ao haver maior inativação no ensaio seqüencial em relação à soma de inativação na aplicação dos desinfetantes separadamente. A tabela 5.26 e 5.27 apresenta em quais ensaios ocorreu sinergismo.

**Tabela 5.26 – Sinergismo na desinfecção seqüencial Cloro – Radiação UV**

Microrganismo	Ensaio	$\Sigma$ Inativação	Inativação	Sinergismo
		Individual	Seqüencial	
<i>Giardia spp.</i>	II	0,11	0,23	0,12
<i>Giardia spp.</i>	IV	0	0,09	0,09

**Tabela 5.27 – Sinergismo na desinfecção seqüencial Ozônio – Radiação UV**

Microrganismo	Ensaio	$\Sigma$ Inativação	Inativação	Sinergismo
		Individual	Seqüencial	
<i>Giardia spp.</i>	VII	0,32	0,92	0,80
<i>Giardia spp.</i>	VIII	0,21	0,57	0,36
<i>Giardia spp.</i>	IX	0,19	0,42	0,57
<i>Giardia spp.</i>	X	0,14	0,16	0,02

De acordo com os resultados obtidos, nota-se sinergismo bastante significativo no microrganismo *Giardia spp.*, tanto com dosagem de ozônio de 5 mg/L como para 10 mg/L, nos quais a desinfecção sequencial alcança uma maior eficácia que a inativação

individual. O sinergismo perante os coliformes fecais e a *E. coli* não pode ser aferido devido a desinfecção apenas com ozônio ou com radiação ultravioleta resultar em inativação dos microrganismos abaixo do limite de detecção, inviabilizando a contagem e a avaliação de sinergismo.

## 6 CONCLUSÕES

Variações de cloro residual livre no esgoto eram evidentes, principalmente para 10 mg/L. A medida que se aumentou a concentração aplicada de cloro, aumentou-se também a concentração de cloro combinado para todos os tempos estudados.

O baixo número de cistos encontrados e até mesmo a ausência destes nas lâminas de leitura não permitiu uma conclusão mais efetiva a respeito das desinfecções seqüenciais nos ensaios com cloro. Isso pode ser devido à baixa recuperação existente e também à sensibilidade do iodeto de propídio para inferir a viabilidade.

Os efeitos sinérgicos foram observados no organismo mais resistente, no caso, a *Giardia* spp., mas não nos organismos *E. coli* e coliformes totais. Estes organismos indicadores (*E. coli* e coliformes totais) não foram resistentes a desinfecção singular e muito menos à seqüencial, diferentemente da *Giardia* spp., não podendo assim concluir sobre efeitos sinergéticos nas bactérias.

Os exames microbiológicos tiveram um desempenho satisfatório, principalmente pelo método sem utilização de IMS, seguido de RID. Nas análises microbiológicas do esgoto após o tratamento por reator UASB, na ETE da USP – São Carlos, foram encontradas concentrações relevantes de protozoários patogênicos, como *Giardia* spp. Como os resultados não são específicos quanto à espécie, o grau de contaminação para a população de São Carlos não pode ser avaliada.

## 7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALMEIDA, I. S. (1978). Estudo Clínico e Epidemiológico da Giardíase em Crianças de Um a Doze Anos do Bairro Nossa Senhora de Fátima – Planaltina – DF. Dissertação (Mestrado em Curso de Pós-Graduação em Medicina Tropical – Universidade de Brasília, 1978.
- APHA, AWWA, WEF (2005). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- BASTOS, R. K. X. et al., (2003). Organismos Patogênicos e Efeitos Sobre a Saúde Humana. In: Desinfecção de Efluentes Sanitários. PROSAB 3. Ricardo Franci Gonçalves (coordenador).
- BNDES. (1996). Saneamento ambiental; foco: saneamento básico nº 1. Cadernos de Infra-Estrutura. Rio de Janeiro: BNDES/Área de Projetos de InfraEstrutura/Gerência de Estudos de Saneamento Ambiental, out. 1996
- BOUZID, M.; STEVERDING, D.; TYLER, K.M. (2008). Detection and surveillance of waterborne protozoan parasites. Current Opinion in Biotechnology. 19: 1-5.
- CHAPARRO, A. T. R., (2010). Tratamento de efluentes de branqueamento de polpa celulósica em reator anaeróbio seguido de processo oxidativo avançado. Tese (Doutorado em Engenharia na Área de Hidráulica e Saneamento). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010
- CHERNICHARO, C.A.L.; DANIEL, L.A.; SENS, M.; CORAUCCI FILHO, B.(2001b). Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. In: Pós-tratamento de efluentes anaeróbios por sistemas de desinfecção. PROSAB 2. Carlos Augusto Lemos Chernicharo (coord) 66p.
- COSTA, J.B. (2007). Avaliação ecotoxicológica de efluente de tratamento secundário de esgoto sanitário após desinfecção com ácido peracético, cloro, ozônio e radiação ultravioleta. São Carlos, 2007. 178 p. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- DANIEL, L. A. (1993). Desinfecção de Esgotos com Radiação Ultravioleta: Fotorreativação e Obtenção de Parâmetros Cinéticos. São Carlos: SHS-EESC, 1993.

- 164p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.
- DANIEL, L.A. (Coord) (2001). Processos de Desinfecção e Desinfetantes Alternativos na Produção de Água Potável. PROSAB. 1. ed. São Carlos, 139 p.
- DEZOTTI, M. (2008). Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos. Série Escola Piloto de Engenharia Química COPPE/UFRJ. v.5.
- DI BERNARDO, L. (2005) – Métodos e Técnicas de Tratamento de Água – Volume 2. São Carlos: RiMa, 2005. 792 p.
- GONÇALVEZ, F. G.; JORDÃO, E. P.; SOBRINHO, P. A . (2003). Introdução. In: Desinfecção de Efluentes Sanitários. PROSAB 3. Ricardo Franci Gonçalves (coordenador).
- JORDÃO, E.P. e PESSOA, A.C, (2009); Tratamento de Esgotos Domésticos. – 5<sup>a</sup> Edição – Rio de Janeiro, 2009, 940 p.
- LAZAROVA et al., (1998). Advanced wastewater disinfection technologies: short and long term efficiency. *Wat. Sci. Tech.*, .38, n.12.
- LIMA, A.B.B.V. (2006). Pós-Tratamento de efluente de Reator Anaeróbio em Sistema Sequencial Constituído de Ozonização em Processo Biológico Aeróbio. – Dissertação ( Mestrado em Hidráulica e Saneamento ). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, 2006.
- LOURENÇAO, J. (2009). Avaliação da resistência de microrganismos patogênicos à desinfecção seqüencial com ozônio-radiação ultravioleta e cloro-radiação ultravioleta. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- MCQUIN, R. M., CLANCY, J. L. (2005). Methods for the recovery, isolation and detection of *Cryptosporidium* oocysts in wastewater. *Journal of Microbiological Methods*.
- MEDEIROS, D. R., (2008), Tratamento de Efluentes do Branqueamento da Polpa Celulósica por Processos Oxidativos Avançados Baseados em Ozônio – Tese (Doutorado em Engenharia na Área de Hidráulica e Saneamento). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- MEDEIROS, R. C., (2010), Comparação da resistência de protozoários patogênicos – *giárdia* spp. e *cryptosporidium* spp. – e de microrganismos indicadores à desinfecção seqüencial cloro-radiação ultravioleta e ozônio-radiação ultravioleta.

- Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.
- MONACO, P.B. (2006). Inativação de Indicadores Patogênicos em Sistemas Combinados de Tratamento e Pré-Desinfecção de Esgoto Sanitário. Tese (Doutorado em Engenharia Civil na Área de Hidráulica e Saneamento). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- PASQUALINI, L. N. (2010). Estudo da oxidação de matéria orgânica de lixiviado de aterro sanitário por meio de tratamento com ozônio, peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta. Dissertação (Mestrado em Engenharia na Área de Hidráulica e Saneamento). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.
- ROBERTSON, L.J.; HERMANSEN, L.; GJERDE, B.K. (2006). Occurance of *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts in Sewage in Norway. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol.72, nº8, p.5297-5303.
- von SPERLING, M. (1996). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. *Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA)*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- SANTOS, L.U.(2007). Ocorrência de oocistos de *Cryptosporidium* spp. e cistos de *Giardia* spp. em uma estação de tratamento de esgoto: avaliação das eficiências do processo de lodo ativado na remoção e de desinfecção por luz ultravioleta na inativação desses patógenos. Tese (Doutorado em Parasitologia) – Instituto de Biologia, Universidade de Campinas, 2007.
- SARTORI, L. (2007). Avaliação da presença de microrganismos patogênicos no rio Monjolinho (SP) e a resistência aos desinfetantes combinados ozônio-radiação ultravioleta, ácido peracético-radiação ultravioleta e cloro-radiação ultravioleta. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- SILVA, G.H.R. (2008). Formação de Aldeídos e Trialometanos da Desinfecção por Ozonização, Cloração e Ozonização/Cloração de Efluente de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Sanitário. Tese ( Doutorado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento ) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- SOARES, L.V. (2007). Ozonização de esgoto sanitário: estudo da hidrodinâmica, transferência de massa e inativação de microorganismos indicadores. Tese

- (Doutorado na área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- TUNDISI, J.G. (2003). Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez. RiMa Editora/ Instituto Internacional de Ecologia. 248p
- USEPA – U.S. Environmental Protection Agency (1998). *Giardia: Human Health Criteria Document*. August. EPA-823-R-002.
- WEF – WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1996). Wasterwater Disinfeciton: Manuak of Pratice.
- WHO (2004 <sup>a</sup>). Emerging Issues in Sater and Infectious Disease- Water, Sanitation and Health. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health](http://www.who.int/water_sanitation_health).