

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

CARLOS RAPHAEL PEDROSO

USO DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA PARA DESINFECÇÃO DE EFLUENTE DE  
REATOR ANAERÓBIO

IRATI

2015

CARLOS RAPHAEL PEDROSO

USO DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA PARA DESINFECÇÃO DE EFLUENTE DE  
REATOR ANAERÓBIO

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, associação ampla entre a Universidade Estadual de Ponta Grossa e a Universidade Estadual do Centro-Oeste. Área de concentração: Saneamento ambiental e recursos hídricos

Orientador<sup>a</sup>: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jeanette Beber de Souza

IRATI

2015

Catálogo na Fonte  
Biblioteca da UNICENTRO

P372u	<p>PEDROSO, Carlos Raphael.     Uso da radiação ultravioleta para desinfecção de efluente de reator anaeróbio / Carlos Raphael Pedroso. -- Irati, PR : [s.n], 2015.</p> <p>69f.</p> <p>Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jeanette Beber de Souza Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Paraná.</p> <p>1. Engenharia Sanitária e Ambiental – dissertação. 2. Coliformes totais. 3. <i>Escherichia coli</i>. 4. Colifagos. 5. <i>Clostridium perfringens</i>. I. Souza, Jeanette Beber de II. UNICENTRO. III. Título.</p> <p>CDD 20 ed. 628.4</p>
-------	---

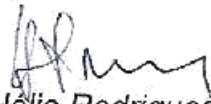
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**  
**ASSOCIAÇÃO AMPLA ENTRE A UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE – UNICENTRO**  
**E A UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA – UEPG**

**PARECER**

Defesa Nº 2

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Sanitária e Ambiental, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, em associação ampla entre a Universidade Estadual do Centro-Oeste e a Universidade Estadual de Ponta Grossa, após arguir o mestrando **Carlos Raphael Pedroso** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado “USO DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA PARA DESINFECÇÃO DE EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO”, é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do estudante, habilitando-o ao título de **Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental**, na Área de Concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Irati-PR, 06 de julho de 2015.



**Dr. Hélio Rodrigues dos Santos**  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Primeiro Examinador



**Dr.ª Kelly Geronazzo Martins**  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Segunda Examinadora



**Dr.ª Jeanette Beber de Souza**  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Orientadora e Presidente da Banca Examinadora

A minha amada e mãe guerreira, Arlete Maria França Pedroso.  
Dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela proteção e motivação para vencer os obstáculos da vida. Por colocar pessoas indizivelmente incríveis no meu caminho.

Ao meu pai João Carlos Pedroso e minha mãe Arlete Maria França Pedroso, por todo suporte e ajuda em todos os momentos da minha vida. Agradeço a vocês por me incentivarem sempre de maneira incondicional – o meu melhor veio de vocês. Amo muito vocês.

A minha orientadora Jeanette Beber de Souza pela oportunidade de desenvolver este trabalho; disponibilidade irrestrita; carinho; ajuda; compreensão; motivação; confiança e pelo bom humor que recebe qualquer pessoa. Fico realmente lisonjeado por receber tua orientação. Levarei teus ensinamentos para sempre.

A minha namorada Natiéle Caroline Czarnecki pelos “bons dias”, carinho, amor, motivação e por sempre acreditar em mim. Sou eternamente grato a Deus por ter você no meu lado. Eu te amo muito.

A minha vó Amélia Rodrigues França que sempre se orgulhou dos meus passos. Como é bom saber que tenho à honra de te levar nos bailes da melhor idade.

A Thaís Kovalski - parceira de laboratório -, que me acompanhou durante a etapa experimental. Sou grato por todo suporte. Sem tua ajuda, não conseguiria dar conta de todos os testes microbiológicos em um só dia. Conte comigo sempre.

Aos amigos de mestrado Fabíole, Gabi, Rafaela, Ricardo, Vitor, Zezo. Mesmo com pouco tempo, construímos um vínculo de amizade verdadeira. Guardarei sempre vocês no coração.

A técnica de laboratório Ana Maria Charnei por me ajudar no laboratório sempre com um sorriso no rosto. Obrigado pela confiança! Cada conversa foi um aprendizado.

A técnica de laboratório Odíméia Teixeira Mendes por ter me ajudado a interpretar com as leituras de absorvância à 254 nm com muita disposição.

Aos professores Artur Lourival da Fonseca Machado e Kelly Geronazzo Martins pelo carinho, tempo e dedicação nos ensinamentos com estatística.

Ao professor Carlos Magno de Souza Vidal pelo suporte e confiança para desenvolver esta pesquisa no laboratório.

As técnicas Margarete e Liane por me acompanharem nas coletas sempre com bom humor. Um grande abraço!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

“A simplicidade é sempre o segredo para uma profunda verdade, para fazer as coisas, para escrever, para pintar.”

Charles Bukowski

## RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da radiação UV na desinfecção de efluentes de reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) seguido de filtro anaeróbio. Empregamos um reator UV em escala de bancada operando em batelada. Avaliamos a interferência dos parâmetros tempo de exposição e alturas de lâminas líquidas (15, 30 e 45 segundos de exposição para as alturas de lâminas líquidas de 2 e 4 cm; 30, 60 e 90 segundos de exposição para a lâmina líquida de 6 cm). Realizamos uma campanha de três ensaios para cada altura de lâmina líquida empregada. Os ensaios foram denominados ALL2, ALL4 e ALL6 para as alturas de 2, 4 e 6 cm respectivamente. A eficiência da desinfecção por radiação UV foi avaliada empregando os microrganismos indicadores *Clostridium perfringens* (*C. perfringens*), colifagos, Coliformes totais (CT) e *Escherichia coli* (*E. coli*). Após a desinfecção por radiação UV foram realizados ensaios para avaliar a possibilidade de recuperação microbiológica (fotorreativação e recuperação do escuro) dos microrganismos indicadores *E. coli* e CT. Os parâmetros físico-químicos turbidez, absorvância à 254 nm e sólidos suspensos totais (SST) influenciaram a inativação microbiana por radiação UV. Houve decréscimo significativo dos microrganismos indicadores *E. coli*, CT (exceto ensaio ALL4) e colifagos comprovado através da análise de variância de medidas repetidas com nível de significância de 5%. *C. perfringens* foi o microrganismo indicador que apresentou maior resistência à ação da radiação UV em todos os ensaios. O ensaio ALL2 foi o que apresentou melhores resultados, a partir de 30 segundos de exposição (dose média efetiva de 68,04 mWs/cm<sup>2</sup>) houve inativação de aproximadamente  $1,65 \pm 0,29$  log para colifagos;  $2,30 \pm 1,55$  log para *E. coli* e  $3,85 \pm 2,17$  para CT. Mantendo o tempo de exposição de 30 segundos e variando a altura da lâmina líquida, as eficiências de inativação apresentaram inferiores ao ensaio ALL2. No que se refere aos ensaios de recuperação microbiológica, a fotorreativação foi mais perceptível do que a recuperação no escuro; porém, ambos os mecanismos de reparos foram pouco significativos.

**Palavras chave:** Radiação Ultravioleta, Coliformes totais, *Escherichia coli*, colifagos e *Clostridium perfringens*.



## ABSTRACT

The purpose of the involved research was to evaluate the applicability of the UV radiation in the disinfection process of the up-flow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) followed by anaerobic filter. We employed an UV reactor in countertop levels working in batching process. We evaluated the interference of time exposure parameters and the level of the liquid blades (15, 30 and 45 seconds of exposure for the liquid blades levels of 2 and 4 cm; 30, 60 and 90 seconds of exposure for the liquid blade level of 6 cm). We conducted a set of three tests for each liquid blade level applied. The tests were named ALL2, ALL4 and ALL6 in the levels of 2, 4 and 6 respectively. The efficiency was checked using the indicating microorganisms *Clostridium perfringens* (*C. perfringens*), coliphages, Total Coliforms (TC) and *Escherichia coli* (*E. coli*). After the disinfection by the UV radiation were carried out some tests to evaluate the possibility of microbiologic recovering (photoreactivation and dark repair) of indicating microorganisms *E. coli* and TC. The parameters physical-chemical turbidity, absorbance in 254 nm and total suspended solids (TSS) has influenced the microbial inactivation by UV radiation. There was a great plunge of the indicating microorganisms *E. coli*, TC (except for test ALL4) and coliphages proved trough the analyses of repeated measures variance with a significant level of 5%. *C. perfringens* was the indicating microorganism that showed the high resistance against the UV radiation in all of the tests. The test ALL2 was the one that showed the best results, after 30 seconds of exposure (effective average dose of 68,04 mWs/cm<sup>2</sup>) there was inactivation of approximately 1,65 ± 0,29 log for coliphages; 2,30 ± 1,55 log for *E. coli* and 3,85 ± 2,17 for TC. Keeping the exposure time of 30 seconds and varying the level of the liquid blade, the efficiencies of inactivation showed decreasing results comparing to the test ALL2. Although, in the tests of microbiologic recovering, the photoradiation was more perceptible than the dark repair; therefore, both repairing mechanisms were less significant.

**Key Words:** Ultraviolet Radiation, Total Coliforms, *Escherichia coli*, coliphages e *Clostridium perfringens*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro do UV, regiões e seus comprimentos de onda (nm). .....	17
Figura 2 – Ilustração do modelo das lâmpadas germicidas UV de vapor de mercúrio de baixa pressão utilizadas na presente pesquisa. ....	18
Figura 3 - Inativação por UV.....	21
Figura 4 – Fluxograma do procedimento experimental.....	31
Figura 5 - Esquema do reator UV de bancada.....	33
Figura 6 – Fotografia do reator UV de bancada e dos adaptadores.....	33
Figura 7 - Malha de pontos no fundo do reator UV e radiômetro que foram utilizados na pesquisa. ....	34
Figura 8 - Colônias de <i>E. coli</i> e CT em placa de Petri. ....	36
Figura 10 - Placas de lise (furos) representando os colifagos. ....	37
Figura 11 - Selagem com vaselina na etapa presuntiva (esquerda) e confirmativa (direita) na análise de <i>Clostridium perfringens</i> .....	39
Figura 12 - Ilustração do ensaio de desinfecção com radiação UV.....	40
Figura 13 - Alíquotas de 100 mL do efluente expostas por três horas ao sol para o ensaio de fotorreativação. ....	41
Figura 14 - Alíquotas de 100 mL de efluente expostas por três horas em ambiente escuro. ...	42
Figura 15 - Resultados dos ensaios de desinfecção UV para o ensaio ALL2 utilizando tempo de exposição de 15, 30 e 45 segundos. ....	46
Figura 16 - Resultados dos ensaios de desinfecção UV para o ensaio ALL4 utilizando tempo de exposição de 15, 30 e 45 segundos. ....	49
Figura 17 - Resultados dos ensaios de desinfecção UV para o ensaio ALL6 utilizando tempo de exposição de 30, 60 e 90 segundos. ....	51
Figura 18 - Eficiência de inativação (%) de todas as alturas de lâmina líquida para o tempo de exposição em comum de 30 segundos.....	53
Figura 19 - Resultados da recuperação média dos ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro para o ensaio ALL2.....	55
Figura 20 – Resultados da recuperação média dos ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro para o ensaio ALL4.....	55
Figura 21 - Resultados da recuperação média dos ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro para o ensaio ALL6.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela representativa da análise de variância. ....	27
Tabela 2 - Tabela representativa da análise de variância de medidas repetidas.....	29
Tabela 3 - Parâmetros analisados e metodologia analítica utilizadas.....	35
Tabela 4 - Resultados da intensidade média efetiva ( $I_m$ ) e doses médias efetivas ( $D_m$ ), levando em consideração: espessura da lâmina líquida, intensidade média emitida pela fonte na superfície ( $I_0$ ), absorvância e tempo de exposição.....	44
Tabela 5 - Caracterização físico-química e microbiológica do efluente de filtro anaeróbio dos ensaios empregando alturas de lâmina líquida de 2, 4 e 6 cm. ....	44

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1	Breve histórico da utilização radiação UV na desinfecção de água e esgoto.....	16
2.2	Princípios básicos da desinfecção por radiação UV.....	16
2.3	Mecanismos da desinfecção UV.....	19
2.4	Mecanismos de recuperação microbiológica.....	21
2.5	Desinfecção por radiação UV em sistemas de batelada.....	23
2.5.1	Dose aplicada e dose média efetiva.....	23
2.5.2	Intensidade.....	24
2.6	Efetividade da desinfecção UV e fatores que interferem no processo.....	24
2.7	Coeficiente de variação (CV), análise de variância de um fator e análise de variância de medidas repetidas.....	25
2.7.1	Coeficiente de variação (CV).....	25
2.7.2	Análise de variância de um fator e análise de variância de medidas repetidas ..	26
3	MATERIAS E MÉTODOS.....	31
3.1	Considerações iniciais.....	31
3.2	Medição da intensidade da radiação UV em comprimento de onda de 254 nm, por radiometria.....	32
3.2.1	Unidade Experimental: o reator UV.....	32
3.2.2	Medição da intensidade de radiação UV.....	33
3.3	Caracterização físico-química e microbiológica do efluente.....	34
3.3.1	Preparação dos meios de cultura e quantificação dos microrganismos.....	35
3.3.2	<i>Escherichia coli</i> e Coliformes totais.....	35
3.3.3	Colifagos.....	36
3.3.4	<i>Clostridium perfringens</i> .....	38
3.4	Etapa 1: ensaios com desinfecção por radiação UV.....	39
3.4.1	Protocolo de ensaios de desinfecção com radiação UV.....	39
3.5	Etapa 2: ensaios de recuperação microbiológica.....	40
3.5.1	Ensaio de fotorreativação.....	41
3.5.2	Ensaio de recuperação no escuro.....	41
3.5.3	Tratamento estatístico.....	42

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
4.1	Medição da intensidade e cálculo das doses médias efetivas de radiação UV .....	43
4.2	Caracterização físico-química e microbiológica do efluente .....	44
4.3	Ensaio de desinfecção com radiação UV .....	45
4.3.1	Ensaio ALL2: Resultados dos ensaios de desinfecção com radiação UV e da análise de variância de um fator para os tempos de 15, 30 e 45 segundos.....	46
4.3.2	Ensaio ALL4: Resultados dos ensaios de desinfecção com radiação UV e da análise de variância de um fator para os tempos de 15, 30 e 45 segundos.....	48
4.3.3	Ensaio ALL6: Resultados dos ensaios de desinfecção com radiação UV e da análise de variância de um fator para os tempos de 30, 60 e 90 segundos.....	50
4.3.4	Comparação da eficiência de inativação para cada altura de lâmina líquida empregada com o tempo de exposição em comum de 30 segundos .....	52
4.4	Ensaio de fotorreativação e recuperação no escuro .....	54
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	59
6	REFERÊNCIAS .....	61

## 1 INTRODUÇÃO

O lançamento de efluentes inadequadamente tratados nos corpos hídricos, compromete a qualidade das águas receptoras e principalmente, expõe a saúde da população a riscos, por potencializar a transmissão de doenças de veiculação hídrica.

Apenas 28,5% dos municípios brasileiros possuem estação de tratamento de efluentes (ETE), sendo que esse quadro deficitário de tratamento implica diretamente na qualidade dos recursos hídricos do país (IBGE, 2008).

As diarreias dentre as várias doenças que estão relacionadas com a qualidade microbiológica das águas, pois são causadas infecção por uma grande variedade de bactérias, vírus e parasitas e atingem globalmente cerca de 1,7 bilhões de pessoas por ano, sendo que esses números estão diretamente relacionados à água contaminada (WHO, 2013).

A prática do tratamento de efluentes e, especificamente, da etapa de desinfecção é uma poderosa barreira sanitária para o controle da qualidade microbiológica dos corpos hídricos, que é cada vez mais necessária, uma vez que os usos múltiplos das águas como abastecimento público, irrigação, atividades de recreação e diluição de despejos, constituem-se numa prática comum.

O desinfetante químico mais comumente utilizado no mundo é o cloro, para águas de abastecimento e águas residuárias (METCALF E EDDY, 2003; MEYER, 1994; JUNG, OH E KANG, 2008; KOIVUNEN E HEINONEN-TANSKI, 2005). Entretanto, a partir da década de 1970, seu uso começou a ser questionado em virtude da associação do cloro com a formação de subprodutos prejudiciais à saúde humana.

O cloro, além de poder promover a formação de subprodutos como os Trihalometanos (THM), que podem trazer riscos à saúde da população e à comunidade aquática, por serem potencialmente cancerígenos e mutagênicos pode trazer sérios prejuízos aos corpos aquáticos devido à sua toxicidade (EPA, 1999a; GUO, et al. 2011, HIJNEN, BEERENDONK E MEDEMA, 2005; LIBERTI, NOTARNICOLA E PETRUZZELLI, 2002; MEYER, 1994; NADDEO et al., 2009; TOMINAGUA E MIDIO, 1999).

Baird e Cann (2008) mostraram que a formação de subprodutos utilizando o cloro possui relação com a quantidade e a qualidade das substâncias húmicas presentes na água.

Segundo Lazarova, et al. (1999) ocorre um enorme impacto ambiental quando efluentes contendo cloro são lançados no ambiente aquático, devido aos residuais de cloro

apresentarem elevada toxicidade, sendo muita vezes necessária a etapa de descloração do efluente, o que provoca elevação de custos operacionais.

Assim, as pesquisas por outros métodos de desinfecção alternativos ao cloro vêm sendo estudados em todo o mundo. Uma das alternativas de desinfecção que vem ganhando grande destaque é o uso da radiação ultravioleta (UV), pois, essa tecnologia, além de não gerar subprodutos tóxicos que prejudicam a saúde, é efetiva na inativação de bactérias, protozoários e vírus; permite fácil manuseio; não exige um tempo de contato elevado; é economicamente viável e possui menor requisito de área dentre as demais opções de desinfecção (EPA, 1999b; HIJNEN, BEERENDONK E MEDEMA, 2006).

A radiação UV é emitida por lâmpadas especiais, de maneira que a inativação dos microrganismos ocorre quando a radiação de aproximadamente 254 nm de comprimento de onda chega ao material genético (DNA e RNA) dos organismos-alvos, que por sua vez sofrem reações fotoquímicas, perdendo a capacidade de reprodução das células e provocando alterações das funções enzimáticas (EPA, 1999a; JUNGFER, SCHWARTZ E OBST, 2007).

A efetividade dos sistemas de desinfecção UV depende de fatores como: qualidade do efluente, configuração do reator, vida útil da lâmpada, intensidade da radiação, espécie de microrganismo patogênico que será inativado, estratégias de doses e tempo de exposição (EPA, 2006). Outro fator é a resistência específica dos organismos-alvo e dentre os que se destacam por sua elevada resistência: vírus, bactérias formadoras de esporos e protozoários (HIJNEN, BEERENDONK E MEDEMA, 2006).

Segundo Lindenauer e Darby (1994) e Shang et al. (2009), contudo, após a desinfecção por radiação UV, alguns microrganismos possuem a capacidade de recuperação através de enzimas reparadoras. Tal recuperação pode ocorrer na presença da luz, fenômeno conhecido como fotorreativação, ou na sua ausência, fenômeno conhecido como recuperação no escuro, comprometendo assim o processo de desinfecção.

Esta pesquisa teve como objetivo estudar a aplicabilidade da desinfecção por radiação UV para efluentes de reator anaeróbio seguido de filtro anaeróbio na eliminação dos microrganismos indicadores *Escherichia coli* (*E. coli*), Coliformes Totais (CT), Colifagos e *Clostridium perfringens* (*C. perfringens*), bem como, avaliar a possibilidade dos fenômenos de fotorreativação e recuperação no escuro para CT e *E. coli*.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Breve histórico da utilização radiação UV na desinfecção de água e esgoto**

A primeira aplicação utilizando desinfecção UV ocorreu em Marseilles, França, no ano de 1910 (EPA, 2006). Porém, a desinfecção UV ganhou aplicabilidade confiável em águas de abastecimento depois da década de 1950 (EPA, 2006; HIJNEN, BEERENDONK E MEDEMA, 2006). Até então, a desinfecção por radiação UV era aplicada para águas de abastecimento. A radiação UV foi aplicada pela primeira vez em efluentes secundários no ano de 1975 por Oliver e Cosgrove (DANIEL, 1993).

Na década de 1990 a tecnologia de desinfecção UV começou a ser aprimorada, com o desenvolvimento de novas lâmpadas e materiais de auxílio (METCALF E EDDY, 2003). A partir de então, diversos autores da comunidade científica deram continuidade às pesquisas empregando esta tecnologia.

### **2.2 Princípios básicos da desinfecção por radiação UV**

A radiação UV é emitida de maneira natural (sol) e artificial (lâmpadas germicidas). Segundo Daniel (1993) os raios UV que atingem a Terra possuem energia para inativar os microrganismos que possuem menor resistência. A ação germicida da luz solar se deve à radiação UV-A e à infravermelha.

A radiação UV encontra-se entre os raios x e a luz visível, na faixa de 100 a 400 nm (METCALF E EDDY, 2003). Seu espectro é dividido em quatro regiões, que apresentam variações de comprimento de onda: UV-A (de 315 a 400 nm); UV-B (de 280 a 315 nm); UV-C (de 200 a 280 nm) e UV-V (de 100 a 200 nm) (EPA, 2006). A figura 1 ilustra o espectro UV bem como as regiões e seus respectivos comprimentos de onda.



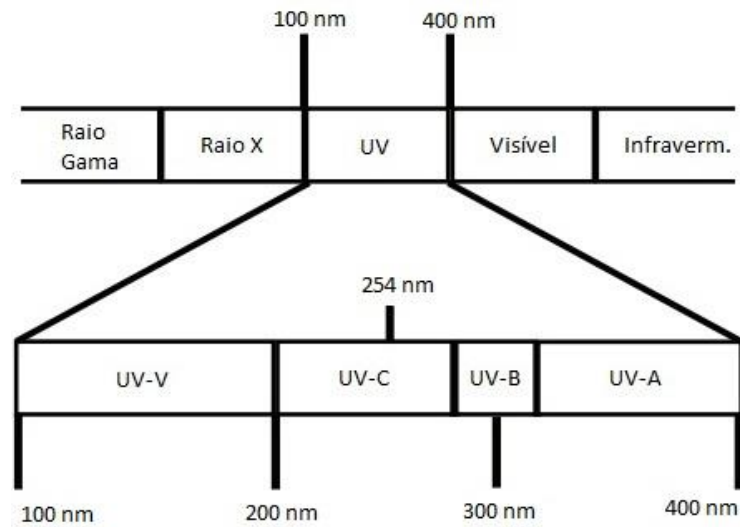


Figura 1 - Espectro do UV, regiões e seus comprimentos de onda (nm).

Fonte: Adaptado de EPA (2006) e METCALF E EDDY (2003).

A ação germicida das lâmpadas UV está situada entre a faixa UV-B e UV-C, sendo que o comprimento de onda de maior efeito para a desinfecção é o de 254 nm; o intervalo entre as faixas de 245 a 285 nm são adequadas para a inativação dos microrganismos, com maior proporção na faixa UV-C, que é extremamente perigosa e absorvida pelo material genético microbiano (DNA e RNA) (BOLTON, 1999; EPA, 1999a).

A radiação UV-B está associada ao câncer de pele, e é a radiação mais destrutiva, pois tem alto grau de energia para causar danos nos tecidos da pele; a UV-A é a mais fraca entre as radiações e necessita de longos tempos de exposição para que a desinfecção seja eficiente (RYER, 1997); já a UV-V (vácuo) é muito instável, pois ela é absorvida por quase todas as substâncias, principalmente pelo ar e pela água - sendo impraticáveis para a desinfecção de água e esgoto sanitário (BOLTON, 1999; EPA, 2006; GONÇALVES, et al, 2003).

A radiação UV usada para a desinfecção de água e esgoto sanitário é obtida através de lâmpadas germicidas especiais, sendo a maior parte constituída por vapor de mercúrio ionizado e gás inerte, comumente o argônio, de baixas e médias pressões e diferentes valores de potência - tais lâmpadas são similares às lâmpadas tubulares fluorescentes (DANIEL, 2001; EARTH TECH (CANADÁ) INC., 2005; RODRIGUEZ et al., 2014). A diferença entre as duas lâmpadas, é que a fluorescente possui o bulbo revestido com fósforo, na qual converte à radiação UV em luz visível; já as lâmpadas UV são revestidas de quartzo (EPA, 1999a). A figura 2 ilustra o modelo de lâmpada germicida que foi empregada na presente pesquisa.



Figura 2 – Ilustração do modelo das lâmpadas germicidas UV de vapor de mercúrio de baixa pressão utilizadas na presente pesquisa.

A energia é gerada por uma tensão que passa através do vapor de mercúrio, excitando o vapor contido e resultando na emissão da radiação. As lâmpadas germicidas podem ser constituídas de outros gases em seu interior e ser em baixa, média e alta pressão e intensidade, sendo o termo “pressão” relacionado à pressão dos gases no interior do bulbo (METCALF E EDDY, 2003).

As lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade possuem mistura de gases de mercúrio-argônio, são monocromáticas, trabalham com 85 a 90% de radiação UV-C de comprimento de onda de 253,7 nm, sendo o restante emitido em forma de calor, possuem uma pressão interna de 0,007 mmHg e temperatura ideal de trabalho de aproximadamente 40 °C; as lâmpadas de baixa pressão e alta intensidade são similares às anteriores, porém em seu interior a mistura é de mercúrio-índio, são de 2 a 4 vezes mais potentes que as de baixa intensidade, possuem pressão interna entre 0,001 a 0,01 mmHg e temperatura ideal de trabalho entre 90 a 150 °C; já as lâmpadas de média pressão e alta intensidade, são policromáticas, funcionam com comprimento de onda entre 180 a 1370 nm, sendo de 50 a 100 vezes superiores às convencionais, com isso, o tempo de contato e o número de lâmpadas são reduzidos, usadas em grande escala e em unidades compactas, a pressão interna varia entre 100 a 10000 mmHg e temperatura ideal de trabalho entre 600 a 800 °C (EPA 1999a; GOLÇALVES, et al, 2003; METCALF E EDDY, 2003; WRIGHT E CAIRNS, 1998). Segundo Daniel (1993) e Gonçalves et al. (2003) os fatores que influenciam as lâmpadas são: temperatura de operação, vida útil e oscilações de voltagem.

Além das lâmpadas, outros componentes que fazem parte da desinfecção UV são os equipamentos elétricos e acessórios como: os sensores e mecanismos de limpeza das

lâmpadas, bem como os reatores. Estes podem ser de canal aberto ou fechado, fluxo intermitente ou em batelada, e o posicionamento das lâmpadas germicidas nos reatores podem ser do tipo emerso ou imerso (EPA, 2006; METCALF E EDDY, 2003).

Em relação aos materiais que constituem os reatores, nem todo material que reflete a luz visível é bom refletor de luz UV, como o espelho por exemplo. A maioria dos metais são bons refletores de radiação UV, desde que suas superfícies sejam limpas e livres de manchas; o alumínio é um dos mais satisfatórios, pois é leve, de fácil manuseio e apresenta grande capacidade refletora no comprimento de onda de 254 nm (KOLLER, 1952).

Segundo a EPA (2006) a radiação UV se propaga através da sua fonte e interage com os componentes do reator (parede do reator e componentes das lâmpadas) e do efluente que passará pelo processo de desinfecção, por absorção, refração, reflexão e dispersão. Sendo assim, ela não se mantém constante com sua intensidade no meio.

A absorção é a transformação da radiação em outras formas de energia, quando ela passa através da substância; varia com o comprimento de onda da luz (EPA, 2006). Essa transformação de energia é devido ao efeito de atenuação (lei de Beer-Lambert) (GONÇALVES et al., 2003), sendo necessário utilizar o coeficiente de absorvância ( $\alpha$ ) (equação 1) para o cálculo da intensidade média de radiação, ou intensidade em qualquer ponto do reator. A refração, reflexão e a dispersão estão relacionadas com as mudanças de direção do raio luminoso (EPA, 2006). Substâncias dissolvidas e os sólidos presentes na água interferem na intensidade de radiação UV (LINDENAUER e DARBY, 1994).

$$\alpha = A \cdot \ln(10) = 2,303 \cdot A \quad (1)$$

$\alpha$ : coeficiente de absorvância;

A: absorvância medida a 254 nm ( $\text{cm}^{-1}$ ).

A absorvância a 254 nm é medida com auxílio de espectrofotômetro, sendo obtida por unidade de profundidade, comumente 1 cm; é usada para medir a quantidade de energia absorvida (quando o feixe de luz passa através do líquido e é absorvido).

### 2.3 Mecanismos da desinfecção UV

Diferentemente de outros métodos de desinfecção no qual a inativação ocorre por meio de interação química, a radiação UV atua como um processo físico, por isso, não gera um residual desinfetante de proteção. Em termos de tratamento de esgoto sanitário, essa é uma vantagem, visto que não há lançamento de efluente no corpo receptor com grau de risco de toxicidade para a comunidade aquática (EPA, 1999a).

A absorção da radiação UV no DNA e RNA dos microrganismos ocorre entre 230 nm e 300 nm, onde a máxima absorção é de aproximadamente de 260 nm (CHERNICHARO et al., 2001; JUNGFER, SHWARTZ E OBST, 2006). A inativação dos microrganismos-alvo ocorre quando a radiação passa através da parede celular e atinge e danifica o material genético (DNA e RNA) através da fotólise, ocasionando o bloqueio da replicação do DNA e resultando na inativação dos microrganismos (EPA, 1999a; HALLMICH E GEHR, 2010; RODRIGUEZ et al., 2014).

O ácido nucléico, responsável por definir as funções metabólicas e de reprodução, possui as duas formas mais comuns: ácido desoxirribonucléico (DNA) e ácido ribonucléico (RNA), sendo o DNA responsável pela síntese de proteínas, enquanto que o RNA guarda toda a informação genética (EPA, 2006).

O DNA é formado por uma fita dupla de nucleotídeos unida por pontes de hidrogênio, formando a dupla hélice, possui quatro subunidades de nucleotídeos (bases emparelhadas): adenina e guanina (purinas) e citosina e timina (pirimidinas) (GONÇALVES, et al., 2003). No RNA as purinas são as mesmas, diferenciando nas pirimidinas, onde a timina é substituída pela uracila (EPA, 2006).

Segundo Bolton e Linden (2003) o resultado da inativação ocorre quando a radiação UV quebra as ligações não saturadas do DNA e RNA, unindo duas bases do mesmo nucleotídeo, comumente as pirimidinas, processo chamado de dimerização (figura 3), impedindo a replicação das células dos microrganismos após a radiação UV. Os três possíveis dímeros do DNA são: timina-timina (mais comum), timina-citosina e citosina-citosina; já no RNA, não há presença de timina e os dímeros são a uracila-uracila e citosina-citosina (BOLTON E LINDEN, 2003; EPA, 2006; WRIGHT E CAIRNS, 1998). Segundo Adler (1966) citado por EPA (2006) e Tinôco (2011), organismos com mais timina em sua composição no DNA são mais sensíveis à luz UV.

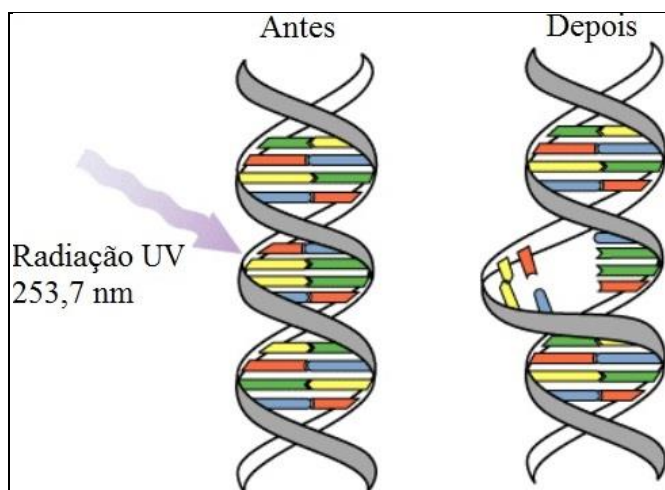


Figura 3 - Inativação por UV.

Fonte: Adaptado de Earth Tech (Canadá) Inc. (2005).

Mesmo assim se após a desinfecção UV, houver a reprodução dos microrganismos, as novas células geradas serão mutantes descendentes, perdendo a capacidade de se duplicarem (USEPA, 1996 apud EPA, 1999a, TINÔCO, 2011). O dano causado no material genético microbiano depende de fatores como: resistência dos microrganismos e doses de radiação UV. Segundo Souza (2000) a formação e a quantidade de dímeros possuem relação com o comprimento de onda e da dose de radiação absorvida e, que em aproximadamente 254 nm a formação de dímeros é cerca de oito vezes superior do que a desdimerização – processo de recuperação dos microrganismos após a radiação UV.

#### 2.4 Mecanismos de recuperação microbiológica

Vários microrganismos possuem a capacidade de se recuperarem após a exposição à radiação UV, através de enzimas reparadoras. Os microrganismos na presença ou na ausência da luz visível podem ter os danos causados no DNA revertidos, voltando ao estado ativo, podendo, inclusive, voltar a se reproduzirem novamente; tais fenômenos são conhecidos como fotorreativação e recuperação no escuro, respectivamente (EPA, 1999a; SHANG et al., 2009).

Guo et al. (2011) citam que tais processos de recuperação são uma grande desvantagem da desinfecção UV, sendo que para esgoto sanitário a recuperação é mais significativa do que para água; pois a qualidade do líquido interfere na desinfecção por radiação UV. Os mesmos autores citam que há três fatores que devem ser considerados após a

desinfecção UV de esgoto sanitário: crescimento dos microrganismos que não foram inativados, reativação e crescimentos dos que foram reativados.

Os mecanismos de recuperação, tanto a fotorreativação quanto a recuperação no escuro, variam entre espécies ou até mesmo entre os da mesma espécie, havendo grande diversidade de mecanismos de reparo, inclusive nos organismos mais simples como a *E. coli*, dependendo da lesão ocasionada pela radiação e da estrutura biológica dos microrganismos (DANIEL, 1993; QUEK E HU, 2008a; TINÔCO, 2011). Já para os vírus, não há mecanismos de reparação; havendo apenas, no caso, quando estão na célula hospedeira (HIJNEN, BEERENDONK E MEDEMA, 2006; WRIGHT E CAIRNS, 1998).

Segundo Jagger (1967) citado por EPA (2006) e Wright e Cairns (1998) a fotorreativação reverte apenas os dímeros da pirimidina (quebrando as ligações) através de uma enzima fotorreativante que utiliza a radiação luminosa no comprimento de onda entre 300 e 500 nm, ou seja, entre UV-A e luz visível. O pH e a temperatura da água interferem no processo (LINDENAUER E DARBY, 1994; WRIGHT E CAIRNS, 1998).

A recuperação no escuro é um processo em que não há presença de luz, onde ocorre uma excisão reparadora de nucleotídeos, removendo a parte lesada pela luz UV e uma parte de uma cadeia de nucleotídeos complementar (intacta), que será usada para a reparação e substituição da camada danificada, com posterior ressíntese da mesma sequência, o processo ocorre através de várias enzimas que reparam o DNA (DANIEL, 1993; EPA, 2006; RODRIGUEZ et al., 2014; WRIGHT E CAIRNS, 1998).

Hijnen, Beerendonk e Madema (2006), que realizaram ampla revisão de literatura sobre radiação UV, citam os tipos de microrganismos que podem ser fotorreativados, recuperados no escuro e os mecanismos de desinfecção; os autores citam que bactérias como *E. coli* e *Streptococcus faecalis* são mais sensíveis à radiação UV e bactérias esporuladas aeróbias como *Bacillus subtilis* e anaeróbias como *C. perfringens* são mais resistentes à luz UV, comparadas às anteriores. Já os protozoários como *Cryptosporidium spp* e *Giardia sp* são os que apresentam as maiores resistências à radiação, porém, mais resistentes ainda são os vírus tipo Adenovírus e esporos bacterianos.

Em relação à recuperação no escuro, Hijnen, Beerendonk e Madema (2006) citam que esse fenômeno é possível de ocorrer para a quase totalidade de bactérias; enquanto que esporos não possuem metabolismo de recuperação, mas podem ser reparados através da germinação, e, alguns vírus vêm demonstrado enzimas de reparação através de suas células hospedeiras. Em relação à fotorreativação, os mesmos autores citam que várias bactérias vêm demonstrando reparação após a radiação UV, e que a significância deste fenômeno está

relacionada com a influência de reparação sobre as curvas de dose-resposta da cinética de inativação.

Lindenauer e Darby (1994) reportaram que o efeito da fotorreativação diminui com o aumento da dose de radiação UV.

## 2.5 Desinfecção por radiação UV em sistemas de batelada

### 2.5.1 Dose aplicada e dose média efetiva

Na desinfecção por radiação UV a dose é um parâmetro muito importante, sendo definida como o produto da intensidade de radiação pelo tempo de exposição (equação 2). Segundo a EPA (2006) e Gonçalves et al. (2003) as unidades normalmente usadas para as doses UV são: J/m<sup>2</sup>, mJ/cm<sup>2</sup> e mWs/cm<sup>2</sup>; onde: 10 J/cm<sup>2</sup> = 1 mJ/cm<sup>2</sup> = 1 mWs/cm<sup>2</sup>.

$$D = I * t \quad (2)$$

D = dose de radiação UV (mWs/cm<sup>2</sup>);

I = intensidade de radiação (mW/cm<sup>2</sup>);

t = tempo de exposição (s).

Segundo Daniel (2001) e Metcalf e Eddy (2003) deve-se levar em consideração as intensidades médias (atenuação devida à lei de Beer-Lambert) no tempo de exposição. Em sistemas de fluxo em batelada (reatores) a intensidade não é homogênea dentro do reator. Assim, a equação 2 representa a dose aplicada, e a dose média efetiva é a média das intensidades pelo tempo de exposição, e é representada na equação 3.

$$D_m = I_m * t \quad (3)$$

D<sub>m</sub> = Dose média efetiva (mWs/cm<sup>2</sup>);

I = Intensidade média de radiação (mW/cm<sup>2</sup>);

T = Tempo de exposição (s).

### 2.5.2 Intensidade

A duas intensidades de radiação UV que devem ser consideradas são: intensidade média de radiação emitida pela fonte e aplicada à superfície do reator ( $I_0$ ) (sem atenuação) e a intensidade média efetiva de radiação ( $I_m$ ) (equação 4) que leva em consideração a atenuação ocasionada pela absorção de radiação no meio líquido (CHANG, 1977 apud GONÇALVES et al., 2003; SOUZA et al., 2012). A absorção segue a lei de Beer-Lambert (MOROWITZ, 1950).

$$I_m = \frac{I_0}{\alpha * L} [1 - e^{(-\alpha * L)}] \quad (4)$$

$I_m$  = intensidade média efetiva (mW/cm<sup>2</sup>);

$I_0$  = intensidade média da radiação emitida pela fonte e aplicada à superfície (mW/cm<sup>2</sup>);

$\alpha$  = coeficiente de absorção (cm<sup>-1</sup>);

$L$  = espessura da lâmina líquida (cm).

A intensidade da radiação UV pode ser quantificada por: actinometria química, bioavaliação, modelagens matemáticas e radiometria. Em relação à radiometria, esta consiste na utilização de equipamentos (radiômetros) acoplados a sensores detectores de radiação em comprimento de onda específico, para determinação das intensidades (RYER, 1997). É importante salientar que deve haver uma distância segura entre a fonte de emissão e o ponto a ser medido, pois, segundo Severin e Roessler (1998), quanto mais perto da lâmpada o radiômetro estiver posicionado, maior será o erro. Os mesmos autores, a partir de modelagem matemática, observaram que a distância entre a lâmpada e o ponto deve ser maior que 3 cm. As medições precisas estão relacionadas com a sensibilidade do equipamento de medição e ao número de medições feitas no interior do reator (DANIEL, 1993).

### 2.6 Efetividade da desinfecção UV e fatores que interferem no processo

A efetividade de inativação microbiana por radiação UV varia para cada microrganismo. A fração de microrganismos sobreviventes pode ser calculada através da equação 5 (EARTH TECH (CANADÁ) INC., 2005; EPA, 2006).



$$\text{Eficiência de inativação} = \log_{10} \frac{N_0}{N} \quad (5)$$

$N_0$  = Número inicial de microrganismos;

$N$  = Número de microrganismos após a desinfecção por radiação UV.

A eficiência de inativação, em porcentagem, pode ser calculada através da equação 6.

$$\text{Eficiência de inativação (\%)} = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100 \quad (6)$$

A qualidade do líquido a ser desinfetado influencia o processo. Substâncias orgânicas e inorgânicas como, por exemplo, os metais presentes na água reduzem a transmissão da radiação UV (EPA, 1999a; HIJNEN, BEERENDONK E MEDEMA, 2006). Os sólidos suspensos podem elevar a absorvância da luz UV e servir de proteção para os microrganismos (BAIRD, 2008; MAMANE E LINDEN, 2006; PASSANTINO 2004; TEMPLETON, ANDREWS E HOFMANN, 2006).

Segundo Daniel (1993) quanto maior for o tamanho da partícula menor será a eficiência da desinfecção UV. A dureza e o pH interfere na solubilidade dos metais que podem absorver a luz UV e é recomendável que a presença de sólidos suspensos totais não ultrapasse 30 mg/L para não comprometer a eficiência da desinfecção (EPA, 1999b).

Outros fatores que devem ser levados em consideração são a intensidade de radiação UV, tempo de exposição que os microrganismos ficam expostos à radiação UV, potência e limpeza das lâmpadas germicidas, configuração e propriedades hidráulicas do reator (evitar zonas mortas e curto-circuito) (EPA, 1999b; WRIGHT e CAIRNS, 1995).

## **2.7 Coeficiente de variação (CV), análise de variância de um fator e análise de variância de medidas repetidas**

### **2.7.1 Coeficiente de variação (CV)**

Segundo Santana e Ranal (2000) o coeficiente de variação (CV) mostra a dispersão dos dados em termos relativos à média. O CV é calculado através da equação 6.

$$CV(\%) = \frac{S}{M} \times 100 \quad (6)$$

CV = Coeficiente de variação;

S = Desvio-padrão;

M = Média dos dados.

O CV também pode ser calculado através da tabela da análise de variância pela equação 7.

$$CV(\%) = \frac{\sqrt{MQ \text{ Res.}}}{M} \times 100 \quad (7)$$

MQ Res. = Média dos quadrados dos resíduos.

Segundo Gomes (2009) apud Couto, Paternelli e Barbosa (2013) quanto menor o valor do coeficiente de variação, maior a precisão. Segundo Gurgel, Ferreira e Soares (2013) valores de CV de até 20% são considerados aceitáveis, pois apresentam boa precisão.

### **2.7.2 Análise de variância de um fator e análise de variância de medidas repetidas**

No desenvolvimento de uma pesquisa experimental o controle das variações do ambiente é de fundamental importância para assegurar a precisão do experimento, sendo utilizados para isso, três princípios experimentais, a saber: repetição, casualização e controle local (ZAR, 1999).

A repetição corresponde ao número de vezes em que o tratamento se repete, sendo que, com o aumento desse parâmetro ocorre uma diminuição da chance de erro do experimento. Já a casualização evita que um tratamento seja favorecido em detrimento de outro. Assim, este princípio distribui de forma casualizada os tratamentos de um experimento. A maneira com que o pesquisador casualiza seus ensaios irá discriminar o tipo de delineamento experimental (LEVINE et al., 2012). Vale ressaltar que tratamento pode ser o método, elemento ou material cujo efeito deseja-se medir ou comparar em um experimento, e que delineamento experimental é o plano utilizado na experimentação e implica na forma como os tratamentos serão designados às unidades experimentais.

O controle local, que não é necessário em todos os experimentos como os demais princípios servem para evitar as influências externas aos tratamentos que apresentam efeitos consideráveis em uma dada variável resposta, o que distorce os resultados da pesquisa. Neste contexto, repetição, casualização e controle local irão controlar as variações do ambiente e melhorar a precisão do experimento (LEVINE et al., 2012).

Quando os princípios de repetição e casualização são considerados em um experimento, é possível aplicar técnicas estatísticas para aumentar a confiabilidade dos resultados. Uma das análises mais utilizadas é a análise de variância com um fator (*one – way ANOVA*).

O objetivo da análise de variância, também conhecido como ANOVA, é identificar se existem diferenças populacionais significativas entre as médias atuando sobre os elementos da população (COSTA NETO, 1977 apud OLIVEIRA, 2008). Para tanto, a técnica baseia-se na decomposição da variação total da variável resposta em partes que podem ser atribuídas aos tratamentos e ao erro experimental (tabela 1).

Tabela 1 - Tabela representativa da análise de variância.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Teste F	Valor P
Tratamento	I-1	SQ Trat.	MQ Trat.	MQ Trat./MQ Res.	
Resíduo	I(J-1)	SQ Res.	MQ Res.		
Total	IJ-1	SQ total			

NOTA: I = Tratamento; J = Repetição; SQ Trat. = Soma dos quadrados dos tratamentos; SQ Res. = Soma dos quadrados dos resíduos; SQ Total = Soma dos quadrados totais; MQ Trat = Média dos quadrados dos tratamentos; MQ Res. = Média dos quadrados dos resíduos.

Fonte: Adaptado de Anjos (2009).

Segundo Anjos (2009) a análise de variância está associada com a decomposição da variação total da variável dependente em partes que são atribuídas aos tratamentos e ao erro do experimento; tal variação é calculada através da soma dos quadrados. As equações 8 e 9 mostram como calcular a soma dos quadrados das variáveis, que é a variação que existe entre os diferentes tratamentos (ANJOS, 2009).

$$SQ\ Trat = \frac{\sum_{i=1}^I y^2 - c}{J} \quad (8)$$

y = Variável aleatória dependente.

$$C = \frac{(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij})^2}{IJ} \quad (9)$$

O cálculo da soma dos quadrados totais, na qual mede a variação geral de todas as observações, é dada pelas equações 9 e 10.

$$SQ\ Total = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij}^2 - C \quad (10)$$

Já para o cálculo da soma dos quadrados dos resíduos, que é a função das diferenças existentes entre as repetições de um mesmo tratamento (ANJOS, 2009), pode ser calculado através da diferença entre a soma dos quadrados totais pela soma dos quadrados dos tratamentos (SQ Res. = SQ Total – SQ Trat.).

A média dos quadrados dos tratamentos é definida pela divisão da soma dos quadrados dos tratamentos pelo grau de liberdade dos tratamentos (MQ Trat. = SQ Trat./ (I-J)). A média dos quadrados dos resíduos é definida pela divisão da soma dos quadrados dos resíduos pelo grau de liberdade dos resíduos (MQ Res. = SQ Res./ I(J-1)). O quociente (MQ Trat./MQ Res.) dá o resultado de  $F_{\text{calculado}}$ . Se o  $F_{\text{calculado}}$  for maior que o  $F_{\text{tabelado}}$ ; pode-se dizer que há diferenças significativas entre as médias do tratamento a um nível  $\alpha$  de significância determinado (geralmente 5%), caso contrário, não há diferenças significativas entre os valores das médias dos tratamentos (ANJOS, 2009).

Segundo Anjos (2009), outro modo de avaliar se há ou não diferenças significativas entre as médias dos tratamentos são através do valor de P (*p-value*) a determinado nível  $\alpha$  de significância; onde se o valor  $P < \alpha$ , tem diferenças entre as médias, caso o valor P for maior, não há diferença significativa.

Na análise de variância além de verificar se há diferenças significativas entre as médias a um determinado nível de significância (probabilidade de erro), ela também permite verificar se os fatores, também conhecido como variáveis independentes (ex: tempo de exposição à radiação ultravioleta) influenciam nas variáveis dependentes ou de resposta (ex: quantidade de microrganismos em 100 mL de esgoto sanitário) (MONTGOMERY, 2001).

Conforme postulado pelo geneticista e matemático Ronald Fisher, para fazer análise de variância deve-se levar em consideração as premissas da análise (MEMÓRIA, 2004):

- Os dados das respostas das variáveis devem estar dentro de uma distribuição normal ou Gaussiana de probabilidade; apresentando simetria confiável. Segundo Normando,

Tjäderhane e Quintão (2010) a distribuição normal concentra os dados em torno de uma média e se dispersam de forma simétrica a partir desta média.

- Os fatores (variáveis independentes) onde a resposta está sendo medida devem apresentar homogeneidade de variância, ou seja, a variância deve ser a mesma dentro dos grupos experimentais.

- As amostras analisadas devem ser independentes e coletadas aleatoriamente.

No experimento efetuado no presente estudo, as amostras são ditas dependentes, pois foi a mesma amostra (efluente) que sofreu efeito de radiação em tempos distintos, violando a premissa de independência de amostra. Por conta disso foram calculadas a análise de variância de medidas repetidas. O termo medidas repetidas refere-se a medidas feitas na mesma unidade experimental ou sujeitos duas ou mais vezes na variável dependente, em múltiplas ocasiões sobre múltiplas condições (DAVIS, 2002; DIGGLE, 1988). Em relação a essa dependência, os valores de F precisam ser ajustados.

O pressuposto para a análise de variância de medidas repetidas é a condição de esfericidade ou circularidade (trata-se de que as variâncias nos pontos do tempo não diferem significativamente entre si); para tanto o teste F é corrigido com base nas sugestões de Greenhouse-Geisser, tais correções modificam os valores dos graus de liberdade (MAIA et al., 2004).

A tabela 2 representa a análise de variância de medidas repetidas.

Tabela 2 - Tabela representativa da análise de variância de medidas repetidas.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Médias dos quadrados	Teste F (Greenhouse-Geisser)	Valor P
Sujeitos	K-1	SQ Suj.	MQ Suj.	MQ Suj./ MQ res.	
Ocasões	L-1	SQ Oc.	MQ Oc.	MQ Oc./ MQ res.	
Resíduo	(K-1)(L-1)	SQ Res.	MQ Res.		
Total	n-1	SQ Total			

NOTA: K = Número de repetições (tratamento); L = Repetição (casos); n = Total de dados (K\*L); SQ Suj. = Soma dos quadrados dos sujeitos; SQ Oc. = Soma dos quadrados das ocasiões; SQ Res. = Soma dos quadrados dos resíduos; SQ Total = Soma dos quadrados totais; MQ Suj. = Média dos quadrados dos sujeitos; MQ Oc. = Média dos quadrados das ocasiões; MQ Res. = Média dos quadrados dos resíduos.

Os sujeitos (tratamentos) são o número de vezes em que foi repetido o experimento e as ocasiões são os tempos de exposição da presente pesquisa.

As equações 11 e 12 mostram como calcular a soma dos quadrados totais.

$$SQ\ Total = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L y_{ij}^2 - C \quad (11)$$

Y = Variável aleatória dependente.

$$C = \frac{(\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L y_{ij})^2}{n} \quad (12)$$

A soma dos quadrados dos sujeitos é calculada através das equações 12 e 13.

$$SQ\ Suj. = \frac{\sum_{i=1}^K y^2 - C}{L} \quad (13)$$

Através das equações 12 e 14, pode-se calcular a soma dos quadrados das ocasiões.

$$SQ\ Oc. = \frac{\sum_{i=1}^L y^2 - C}{K} \quad (14)$$

A soma dos quadrados dos resíduos pode ser obtida através da diferença entre a soma dos quadrados totais, soma dos quadrados dos sujeitos e pela soma dos quadrados das ocasiões (SQ Res. = SQ Total – SQ Suj. – SQ Oc.).

A média dos quadrados é calculada da mesma forma da análise de variância anteriormente citada; através da divisão das somas dos quadrados pelo número de graus de liberdade correspondente.

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

#### 3.1 Considerações iniciais

O efluente utilizado na pesquisa foi proveniente de uma estação de tratamento de efluentes (ETE), localizada no bairro Riozinho em Irati-PR; sendo a ETE-RIOZINHO constituída por grade, calha parshall, reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF) e filtro anaeróbio, onde, na saída do filtro, foram coletadas as amostras do efluente.

O trabalho experimental de desinfecção por radiação UV foi desenvolvido em escala de laboratório, utilizando um reator de bancada de operação em batelada.

O experimento foi dividido em duas etapas: na primeira foram realizados os ensaios de desinfecção por radiação UV empregando os microrganismos indicadores *E. coli*, CT, colifagos e *C. perfringens*. Na segunda, após os ensaios de desinfecção, foram realizados ensaios de recuperação microbiológica (fotorreativação e recuperação no escuro) para os microrganismos indicadores *E. coli* e CT. Anteriormente a realização dos ensaios de desinfecção por radiação UV, foi realizada a medição da intensidade de radiação UV emitida pelas lâmpadas. A figura 4 mostra o fluxograma do procedimento experimental.

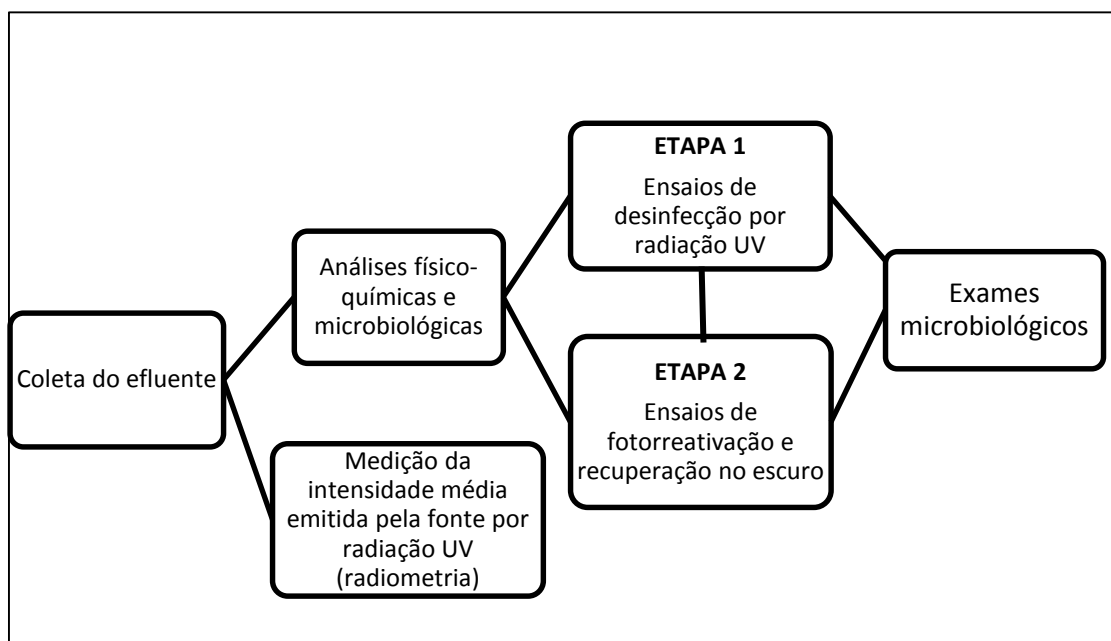


Figura 4 – Fluxograma do procedimento experimental.

Nos ensaios de desinfecção por radiação UV foram utilizadas três alturas de lâminas líquidas: 2, 4, e 6 cm; denominados ensaio ALL2, ALL4 e ALL6 respectivamente. Foram realizados três repetições para cada altura de lâmina líquida. A cada três semanas, fechava-se uma triplicata dos ensaios.

As variáveis dependentes foram os microrganismos indicadores empregados e, a variável independente foi o tempo de exposição à radiação UV. Pretendeu-se testar se o fator tempo de exposição foi significativo para as alturas de lâmina líquidas empregadas.

### **3.2 Medição da intensidade da radiação UV em comprimento de onda de 254 nm, por radiometria.**

#### **3.2.1 Unidade Experimental: o reator UV**

O reator UV empregado na pesquisa foi confeccionado em aço inox com uma cúpula móvel em alumínio com 10 cm de altura, tendo como fonte de radiação UV 6 lâmpadas emersas de vapor de mercúrio de baixa pressão, marca Philips, com comprimento de onda de 254 nm, com aproximadamente 15 W de potência em cada uma das lâmpadas e distanciadas uniformemente 2,2 cm entre si. Cada uma das lâmpadas na cúpula podia ser ligada independente. A câmara de desinfecção possuía 45 cm de comprimento, por 40 cm de largura e 15 cm de altura.

Para variar a espessura da lâmina líquida e manter constante a altura da lâmpada até a superfície do líquido a ser desinfetado, foram construídos dois adaptadores em aço inox medindo 45 cm de comprimento por 40 cm de largura e com alturas de 2 e 4 cm (Tinôco, 2011). O adaptador é um suporte que fica encaixado por fora do reator e sua principal função é de apenas manter as alturas entre as lâmpadas e a superfície do efluente constante, conforme aumenta a profundidade. Para a primeira altura de lâmina líquida não houve necessidade de utilizar o adaptador. Para os demais ensaios de 4 e 6 cm, foram utilizados os adaptadores de 2 e 4 cm, respectivamente.

Na figura 5 é apresentado o esquema do reator UV e na figura 6 são apresentadas as ilustrações fotográficas do reator UV, bem como dos adaptadores.



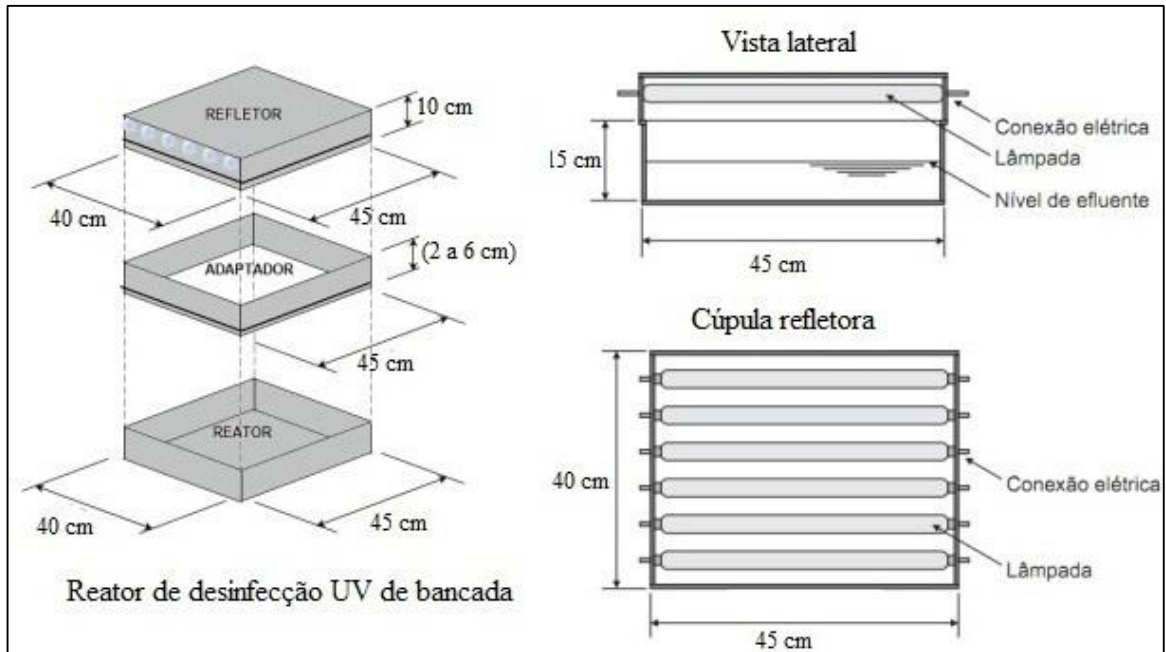


Figura 5 - Esquema do reator UV de bancada.

Fonte: Bilota e Daniel (2007); Tinôco (2011).



Figura 6 – Fotografia do reator UV de bancada e dos adaptadores.

### 3.2.2 Medição da intensidade de radiação UV

A medição da intensidade da radiação UV emitida pelas lâmpadas ( $I_0$ ) no interior do reator, foi realizada utilizando um radiômetro da marca Vilber Loumart (VLX-3W) com um sensor acoplado que detectava a radiação em 254 nm.

Primeiramente as seis lâmpadas foram ligadas 15 minutos antes da realização dos ensaios para estabilização. A seguir, utilizou-se o radiômetro para as medições de intensidade no fundo do reator (sem líquido a ser desinfetado), no qual foi inserido um desenho de malha de 56 pontos de amostragem equidistantes em 5 cm (para a realização das medições ponto a ponto). A partir das medições, foi feita uma média dos 56 pontos, totalizando uma intensidade média de radiação UV emitida pela fonte ( $I_0$ ), que foi necessária para o cálculo da intensidade média efetiva de radiação UV. A partir da intensidade média efetiva, pôde-se calcular a dose média de radiação.

A figura 7 ilustra a malha de pontos dentro do reator e o radiômetro empregado na pesquisa.



Figura 7 - Malha de pontos no fundo do reator UV e radiômetro que foram utilizados na pesquisa.

### 3.3 Caracterização físico-química e microbiológica do efluente

A caracterização físico-química seguiu as metodologias analíticas preconizadas em APHA (1999) e, os exames microbiológicos: *E. coli* e CT (APHA, 1999); colifagos (CETESB L5/225, 1990) e *C. perfringens* (CETESB L5/213, 1993). Na tabela 3 são apresentados os parâmetros analisados e a metodologia analítica.

Tabela 3 - Parâmetros analisados e metodologia analítica utilizadas.

PARÂMETROS	METODOLOGIA ANALÍTICA	REFERÊNCIA
colifagos (UFP/100 mL)	Ensaio de placa	CETESB L5/225 (1990)
<i>Clostridium Perfringens</i> (NMP/100 mL)	Técnica do número mais provável	CETESB L5/213 (1993)
Coliformes totais (UFC/100 mL)	Membrana filtrante	APHA (1999)
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)	Membrana filtrante	APHA (1999)
Absorbância (254 nm)	Espectrofotometria UV	APHA (1999)
Cor aparente (uC)	Medida espectrofotométrica	APHA (1999)
Cor verdadeira (uC)	Medida espectrofotométrica	APHA (1999)
Condutividade (µS/cm)	Condutivimétrie	APHA (1999)
DQO (mg/L)	Titulometria de refluxo fechado	APHA (1999)
Sólidos totais (mgST/L)	Gravimetria	APHA (1999)
Sólidos suspensos totais (mgSST/L)	Gravimetria	APHA (1999)
Temperatura (°C)	Termometria com filamento de mercúrio	APHA (1999)
Turbidez (uT)	Nefelometria	APHA (1999)
pH	Potenciometria com eletrodo combinado	APHA (1999)

### 3.3.1 Preparação dos meios de cultura e quantificação dos microrganismos

### 3.3.2 *Escherichia coli* e Coliformes totais

A *E. coli* é indicadora exclusivamente de contaminação fecal, está copiosamente presente nas fezes humanas e de animais de sangue quente, sendo encontrada em elevado no número esgoto, efluentes tratados e águas naturais contaminadas com esgoto (VON SPERLING, 2005; WHO, 2011). Os CT são bactérias encontradas em águas e solos, poluídos ou não, nas fezes humanas e de animais homeotérmicos; porém, estas bactérias não são exclusivamente provenientes de contaminação fecal, sendo encontradas também no ambiente natural (VON SPERLING, 2005).

O meio de cultura utilizado para a quantificação de CT e *E. coli* foi o Hicrome ECC Selective Agar Base (REF: M1294-500G), que determina conjuntamente as presenças de *E. coli* e CT. Para o seu preparo foram dissolvidos 26,5 g do meio em 1000 mL de água destilada esterilizada, aquecendo a mistura e, não deixando que a mesma atingisse a temperatura de ebulição. A água destilada foi esterilizada em autoclave a 120°C e 103,3 kPa por 15 minutos, juntamente com os materiais necessários para o preparo do meio. O meio de cultura era transferido em alíquotas de 10 mL para placas de Petri que eram armazenadas em um *freezer* até a realização dos exames microbiológicos.

Para a quantificação de *E. coli* e CT, foi utilizada a técnica da membrana filtrante segundo metodologia descrita em APHA (1999). Brevemente, as amostras do efluente de 100 mL filtradas em membrana de nitrato de celulose de porosidade de 0,45 µm, sendo a

membrana contendo as células bacterianas colocadas nas placas de Petri e incubadas na estufa por  $24 \pm 1$  h à  $36 \pm 1^\circ\text{C}$ . Nesta técnica, as colônias de coloração azul são reconhecidas como *E. coli*, as de coloração vermelha/roxa como CT e o resultado expresso como unidade formadora de colônias por 100 mL da amostra (UFC/100 mL).

Na figura 8 encontram-se representadas as colônias de *E. coli* e CT em placa de Petri.

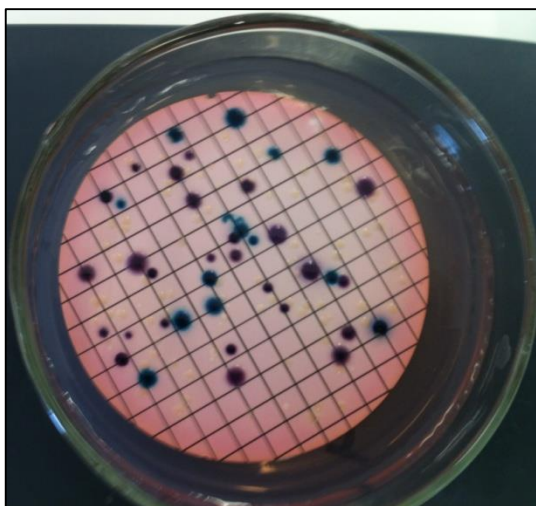


Figura 8 - Colônias de *E. coli* e CT em placa de Petri.

### 3.3.3 Colifagos

Colifagos ou fagos são indicadores de vírus e constituem um nome genérico aplicado aos bacteriófagos que atacam bactérias *Escherichia coli* (CETESB/L5.225, 1990). Para quantificar este microrganismo indicador, foi necessária a preparação prévia da cepa de *E. coli* CIP 55:30, hospedeira apropriada para os colifagos.

O meio de cultura para repicagem e conservação da *E. coli* CIP 55:30 foi o TSB (Tryptic Soy Broth). Inicialmente, foram dissolvidos 1,5 g de TSB em 50 mL de água destilada, aquecendo-se a mistura até sua completa dissolução, entretanto, sem que se atingisse a temperatura de ebulição. Em seguida, adicionou-se 10% de glicerol ao meio para preservação das células durante o congelamento posterior da cepa. O processo para a repicagem da cepa hospedeira e armazenamento até a realização dos ensaios seguiu a norma técnica da CETESB/LS.225 (CETESB, 1990).

Para os colifagos, o meio de cultura utilizado foi o TSA (Tryptic Soy Agar) modificado. Dissolvia-se 40 g do meio em 1000 mL de água destilada, aquecendo sem

atingisse a temperatura de ebulição. Em seguida, foram distribuídos volumes de 5,5 mL em tubos de ensaio, autoclavados a 120 °C e 103,3 kPa por 15 minutos. Os meios de cultura preparados eram depois armazenados em *freezer* até a realização dos ensaios.

O procedimento geral para a determinação de colifagos nas amostras de efluentes é descrito nas seguintes etapas:

- Desinfetava-se a bancada com álcool 70%, liquidificavam-se os tubos de ensaio com o meio TSA modificado no bico de Bunsen e descongelavam-se os flaconetes com a bactéria hospedeira a distância próxima à chama;
- Para cada um dos quatro tubos de ensaios com TSA modificado, eram colocados 5 mL de amostra de efluente e 1 mL da bactéria hospedeira *E. coli* CIP 55:30;
- Homogeneizavam-se os tubos de ensaios, e vertia-se sua composição em placas de Petri, sendo estas homogeneizadas com movimentos circulares em forma de  $\infty$ ;
- Incubavam-se as placas na estufa a  $36 \pm 1^\circ\text{C}$  durante 4 a 6 horas.

Após 4 ou 6 horas, as placas eram retiradas para a contagem; onde as zonas claras na superfície do ágar (lise), representam os colifagos. O número final de fagos era obtido multiplicando-se por 5 a somatória das contagens das placas de lise nas 4 placas de Petri e o resultado expresso como unidades formadoras de placas (UFP) por 100 mL da amostra do efluente (UFP/100 ml). A figura 10 mostra as placas de lise representando os colifagos.

Vale ressaltar que toda vez que eram realizados os ensaios de desinfecção UV, eram refeitas novas cepas da bactéria hospedeira.

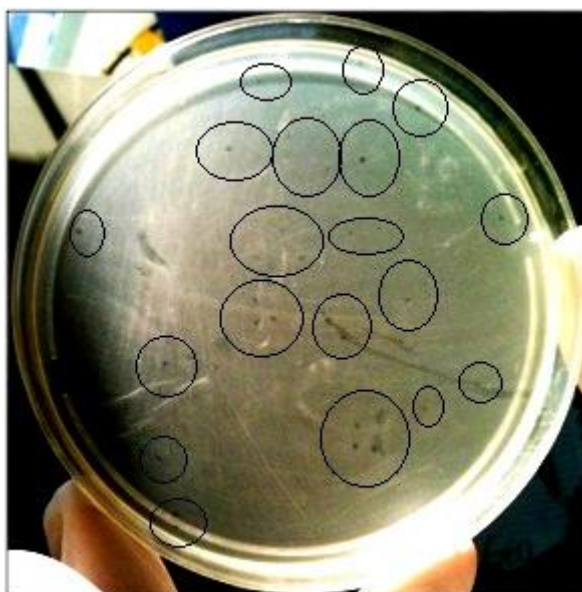


Figura 9 - Placas de lise (furos) representando os colifagos.

### 3.3.4 *Clostridium perfringens*

*C. perfringens* são microrganismos anaeróbios obrigatórios, imóveis e esporogênicos, que possuem grande resistência às condições adversas do meio ambiente, sendo usados como indicador bacteriológico de contaminação fecal, tanto para poluição fecal recente como remota (CETESB/L5.213, 1993).

Para o exame deste microrganismo, são realizadas duas etapas: a presuntiva e a confirmativa. Para a preparação do meio de cultura para quantificação deste microrganismo indicador foram utilizados: água destilada, meio de cultura diferencial enriquecido para clostrídios (DRCM; etapa presuntiva), meio de cultura leite tornassolado (Litmus Milk; etapa confirmativa), vaselina líquida, soluções de citrato férrico (7%) e sulfito de sódio (4%).

Na etapa presuntiva, utiliza-se o meio DRCM. Dissolvia-se 29 g do meio em 1000 ml de água destilada, aquecendo e misturando até chegar a uma característica translúcida, sem atingir a temperatura de ebulição. Após, foram distribuídos 10 ml do meio em tubos de ensaios.

Para a etapa confirmativa, o meio de cultura foi o Litmus Milk. Dissolvia-se 101 g em 1000 ml de água destilada, aquecendo, não deixando atingir a temperatura de ebulição. Depois eram distribuídos 6 ml do meio em tubos de ensaios.

Os tubos contendo tanto o DRCM quanto o Litmus Milk eram autoclavados a 120 °C e 103,3 kPa por 15 minutos e depois mantidos no *freezer* até a realização dos experimentos.

Para o procedimento geral da etapa presuntiva, eram aquecidos os tubos de ensaio contendo o meio DRCM e em seguida, resfriados com banho de gelo provocando um choque térmico. Na sequência eram adicionados 0,1 ml de citrato férrico 7% + 0,1 ml de sulfito de sódio 4% + 1 ml de amostra de efluente a cada tubo de ensaio. Após, os tubos eram incubados a  $36 \pm 1^\circ\text{C}$  por 48 h. Para garantir a anaerobiose, os tubos de ensaios eram “selados” com vaselina líquida.

Antes da realização da etapa confirmativa, os tubos de ensaios contendo o meio de cultura Litmus Milk eram previamente aquecidos em água fervente por 5 minutos, com a finalidade retirar o oxigênio. A etapa confirmativa baseava-se na transferência de 0,1 mL coletado com auxílio de uma micropipeta no fundo de cada um dos tubos de DRCM com resposta presuntiva positiva, os quais apresentavam enegrecimento ou turvação do meio (devido à redução do sulfeto a sulfito) para os tubos de Litmus Milk. Após, estes tubos de

ensaios contendo Litmus Milk + 0,1 mL da amostra com resposta presuntiva, eram selados novamente com vaselina e depois incubados em estufa a  $36 \pm 1^\circ\text{C}$  por 48 h. A formação de coágulos rompidos devido à acidificação do meio é uma prova confirmativa da presença de *C. perfringens*.

Na figura 11 é apresentada a foto com a selagem do tubo de ensaio com vaselina, bem como a etapa presuntiva e confirmativa. A quantificação de *C. perfringens* seguiu a norma CETESB/L5. 213 (1993). O resultado final obtido é expresso como número mais provável por 100 ml da amostra (NMP/100 ml).



Figura 10 - Selagem com vaselina na etapa presuntiva (esquerda) e confirmativa (direita) na análise de *Clostridium perfringens*.

### 3.4 Etapa 1: ensaios com desinfecção por radiação UV

#### 3.4.1 Protocolo de ensaios de desinfecção com radiação UV

O efluente era coletado no dia do ensaio de desinfecção. Inicialmente ligava-se o reator por 15 minutos para estabilização das lâmpadas (em todos os ensaios foram empregadas as seis lâmpadas), em seguida, o reator era preenchido com o efluente, para a realização dos ensaios (figura 12). Os tempos de exposição para as alturas de 2 e 4 cm foram de 15, 30 e 45 segundos e, para a altura de 6 cm os tempos foram de 30, 60 e 90 segundos. No final de cada ensaio o reator era lavado com água destilada e desinfetado com álcool 70%. No início do próximo, o reator UV era enxaguado com água destilada.



Figura 11 - Ilustração do ensaio de desinfecção com radiação UV.

Para cada altura de lâmina líquida, foram realizadas três campanhas amostrais, sendo primeiramente realizada para a altura de lâmina líquida de 2 cm (ensaio ALL2), depois três campanhas para a altura de lâmina líquida de 4 cm (ensaio ALL4) e por último, para a altura de lâmina líquida de 6 cm (ensaio ALL6). Uma triplicata para cada altura de lâmina líquida era completada a cada três semanas.

Em cada ensaio e para cada tempo de exposição à radiação UV empregado foram coletadas amostras do efluente desinfetado e realizados os exames microbiológicos de *E. coli*, CT, colifagos e *C. perfringens*. Nos exames microbiológicos, foram realizadas diluições da amostra, as quais variaram de  $10^{-1}$  a  $10^{-4}$ .

Para cada ensaio de desinfecção UV, foi utilizado um sistema de agitação magnética com a finalidade de evitar a sedimentação dos sólidos. A altura entre as lâmpadas e a superfície do líquido foi de 14 cm em todos os ensaios.

### 3.5 Etapa 2: ensaios de recuperação microbiológica

Para cada tempo de exposição dos ensaios ALL2, ALL4 e ALL6, alíquotas de 100 mL do efluente já desinfetado (em cada tempo de exposição) eram coletadas para avaliação da possibilidade dos fenômenos de fotorreativação e recuperação no escuro para os microrganismos indicadores *E. coli* e CT. A escolha destes microrganismos indicadores para avaliar a possibilidade da fotorreativação e recuperação no escuro foi pelo motivo de que



esses mecanismos de reparo vêm sendo demonstrados para a maioria das bactérias (HIJNEN, BEERENDOK E MADEMA, 2006). Tanto os ensaios de fotorreativação quanto os de recuperação no escuro, foram adaptados de Tinôco (2011).

### 3.5.1 Ensaios de fotorreativação

Para o ensaio de fotorreativação as alíquotas eram colocadas em béckeres de vidro de 250 mL, previamente esterilizados e parcialmente tampados e recobertos com policroto de vinila (PVC) contendo pequenos furos para a entrada de ar. As alíquotas de efluente eram colocadas sob o sol por um período de três horas (figura 13).



Figura 12 - Alíquotas de 100 mL do efluente expostas por três horas ao sol para o ensaio de fotorreativação.

Os horários da realização dos ensaios de fotorreativação foram das 11:00 às 14:00 horas. Cabe ressaltar que a temperatura do ensaio ALL2 foi em média de  $17 \pm 1,0$  °C, e que o céu estava parcialmente nublado em todos os ensaios. Já para o ensaio ALL4, a temperatura foi de  $27,7 \pm 5,0$  °C e que para o céu estava com poucas nuvens para todos os ensaios da altura de lâmina líquida de 4 cm. No ensaio ALL6 a temperatura média foi de  $21,6 \pm 7,8$  °C e, em uma das triplicatas o tempo estava chuvoso e nublado, e no restante parcialmente nublado.

### 3.5.2 Ensaios de recuperação no escuro

Para os ensaios de recuperação no escuro, as alíquotas de cada tempo de exposição foram colocadas em frascos plásticos previamente esterilizados e vedados com papel alumínio, perfurados para passagem de ar e postos em ambiente escuro por três horas (figura 14).



Figura 13 - Alíquotas de 100 mL de efluente expostas por três horas em ambiente escuro.

Nos ensaios de recuperação no escuro a temperatura foi de 25 °C para todos os ensaios e o horário foi o mesmo empregado na fotorreativação.

### 3.5.3 Tratamento estatístico

Para observar se a absorvância possui correlação com a concentração de SST e turbidez foi feita a correlação de Kendall. Para avaliar se o tempo de exposição à radiação UV foi um fator significativo na inativação dos microrganismos indicadores *E. coli*, coliformes totais, colifagos e *Clostridium perfringens*, foram calculadas as análises de variâncias de medidas repetidas com um fator (tempo de exposição). Ambos utilizando o software STATISTICA 7.0. Quando as amostras não apresentavam esfericidade o teste de Greenhouse-Geisser foi utilizado para corrigir os graus de liberdade e corrigir o valor de teste F para amostras dependentes. O limite de significância utilizado tanto para correlação de Kendall quanto para a análise de variância de medidas repetidas foi de 5%.

Concomitantemente os coeficientes de variação e desvios padrões das médias dos diferentes tratamentos foram calculados para auxiliar na interpretação dos resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, os resultados apresentados estão discutidos nesta ordem: medição da intensidade e cálculo das doses médias efetivas de radiação UV; caracterização físico-química e microbiológica do esgoto sanitário; ensaios de desinfecção com radiação UV com altura de lâmina líquida de 2 cm (ensaio ALL2), de 4 cm (ensaio ALL4) e 6 cm (ensaio ALL6), juntamente com a análise de variância de medidas repetidas; ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro para os microrganismos indicadores *E. coli* e CT.

### 4.1 Medição da intensidade e cálculo das doses médias efetivas de radiação UV

As intensidades de radiação UV emitidas pelas lâmpadas dentro do reator de bancada não são homogêneas. Maiores intensidades de radiação UV encontram-se na região central do reator e menores nas proximidades laterais.

A configuração do reator UV da pesquisa permite espaços entre as lâmpadas, assim como a forma da cúpula refletora propicia a desestabilização da distribuição da intensidade emitida da radiação UV. Para o conjunto de 6 lâmpadas ligadas, a intensidade média emitida pela fonte ( $I_0$ ), sem levar em consideração a atenuação, apresentou média de radiação na superfície de  $5,48 \pm 1,09$  mW/cm<sup>2</sup> (malha de 56 pontos).

Com os valores de absorbâncias das amostras, foi calculado o coeficiente de absorvância de acordo com a lei de Beer-Lambert (equação 1). Em seguida; com a espessura da lâmina líquida, coeficiente de absorvância, tempo de exposição e o valor da intensidade média emitida pela fonte ( $I_0$ ; sem atenuação); utilizando a equação 4, obtiveram-se os valores de intensidade média efetiva ( $I_m$ ), que leva em consideração a capacidade de absorção de energia pelas substâncias encontradas no efluente. Por fim, utilizou-se a equação 3, para a obtenção das doses médias efetivas ( $D_m$ ) para cada tempo de exposição empregado.

Na tabela 4 são apresentados os resultados das intensidades e doses médias efetivas de radiação UV para cada altura de lâmina líquida.

Tabela 4 - Resultados da intensidade média efetiva ( $I_m$ ) e doses médias efetivas ( $D_m$ ), levando em consideração: espessura da lâmina líquida, intensidade média emitida pela fonte na superfície ( $I_0$ ), absorvância e tempo de exposição.

Intensidade média de radiação na superfície ( $I_0$ ) (mW/cm <sup>2</sup> )	Espessura da lâmina líquida (cm)	ensaio	Absorvância (254 nm)	Tempo de exposição (s)	Intensidade média efetiva ( $I_m$ ) (mW/cm <sup>2</sup> )	Dose média efetiva (mWs/cm <sup>2</sup> )
<b>5,48 ± 1,09</b>	2	ALL2	<b>0,45 ± 0,2</b>	15	<b>2,29 ± 0,7</b>	<b>34,47 ± 11,2</b>
				30	<b>2,29 ± 0,6</b>	<b>68,07 ± 19,6</b>
				45	<b>2,32 ± 0,7</b>	<b>104,89 ± 33,6</b>
	4	ALL4	<b>0,59 ± 0,2</b>	15	<b>1,04 ± 0,2</b>	<b>15,12 ± 3,8</b>
				30	<b>1,02 ± 0,2</b>	<b>30,48 ± 8,2</b>
				45	<b>1,06 ± 0,2</b>	<b>47,58 ± 11,5</b>
	6	ALL6	<b>0,47 ± 0,3</b>	30	<b>1,04 ± 0,5</b>	<b>31,22 ± 16,2</b>
				60	<b>1,11 ± 0,5</b>	<b>66,35 ± 34,1</b>
				90	<b>1,10 ± 0,5</b>	<b>98,68 ± 48,6</b>

NOTA:  $I_0$ : Intensidade média emitida pela fonte na superfície sem levar em consideração a atenuação (lei de Beer-Lambert);  $I_m$ : Intensidade média efetiva levando em consideração a atenuação.

#### 4.2 Caracterização físico-química e microbiológica do efluente

Os resultados das médias e desvio padrão dos ensaios de desinfecção, com a caracterização físico-química e microbiológica do efluente do filtro anaeróbio estão apresentados na tabela 6.

Tabela 5 - Caracterização físico-química e microbiológica do efluente de filtro anaeróbio dos ensaios empregando alturas de lâmina líquida de 2, 4 e 6 cm.

Parâmetros	Ensaio ALL2	Ensaio ALL4	Ensaio ALL6
Turbidez (uT)	<b>45,3 ± 16,6</b>	<b>54,1 ± 22,8</b>	<b>33,7 ± 11,8</b>
Cor aparente (uC)	<b>293 ± 34,2</b>	<b>486 ± 152,7</b>	<b>248 ± 197,0</b>
Cor verdadeira (uC)	<b>126 ± 16,3</b>	<b>195 ± 66,4</b>	<b>191 ± 170,4</b>
T (°C)	<b>17 ± 1,0</b>	<b>19 ± 1,5</b>	<b>20 ± 3,5</b>
pH	<b>7,1 ± 0,4</b>	<b>7,4 ± 0,4</b>	<b>7,1 ± 0,2</b>
DQO (mg/L)	<b>63 ± 21,9</b>	<b>79 ± 12,9</b>	<b>85 ± 58,2</b>
ST (mgST/L)	<b>191 ± 127,1</b>	<b>398 ± 80,0</b>	<b>239 ± 182,3</b>
SST (mgSST/L)	<b>9 ± 2,5</b>	<b>17 ± 4,0</b>	<b>17 ± 6,6</b>
Condutividade (mS/cm)	<b>475,2 ± 289,6</b>	<b>853,8 ± 70,8</b>	<b>644,0 ± 569,5</b>
Abs (254 nm)	<b>0,45 ± 0,2</b>	<b>0,59 ± 0,2</b>	<b>0,47 ± 0,3</b>
<i>E.coli</i> (UFC/100mL)	<b>6,60E+04 ± 3,01E+04</b>	<b>4,38E+05 ± 2,53E+05</b>	<b>1,82E+05 ± 2,49E+05</b>
Coliformes totais (UFC/100mL)	<b>2,68E+06 ± 3,74E+06</b>	<b>5,91E+05 ± 4,07E+05</b>	<b>3,35E+05 ± 3,39E+05</b>
<i>Clostridium Perfringens</i> (NMP/100mL)	<b>4,05E+06 ± 4,51E+06</b>	<b>1,12E+06 ± 8,31E+05</b>	<b>1,12E+06 ± 8,31E+05</b>
Colifagos (UFP/100mL)	<b>4,48E+03 ± 7,29E+02</b>	<b>4,28E+02 ± 2,09E+02</b>	<b>1,29E+03 ± 1,44E+03</b>

NOTA: T: temperatura; DQO: demanda química de oxigênio; ST: sólidos totais; SST: sólidos suspensos totais; ABS: absorvância em comprimento de onda de 254 nm.

A absorvância, turbidez e os sólidos suspensos totais (SST) representam grande interferência na desinfecção por radiação UV. A absorvância está associada à concentração de sólidos suspensos, metais, componentes orgânicos e inorgânicos dissolvidos presentes na água ou no esgoto (CHERNICHARO et al., 2001; METCALF E EDDY, 2003). A turbidez está relacionada com SST. Os sólidos suspensos servem de proteção aos microrganismos-alvo e absorvem a radiação UV (METCALF E EDDY, 2003; TEMPLETON, ANDREWS e HOFMANN, 2006).

Os valores de absorvância de efluentes tratados anaerobicamente se encontraram dentro da faixa dos valores típicos (0,4 a 0,8) dos parâmetros de dimensionamento de reatores UV com lâmpadas emersas (GONÇALVEZ et al., 2003). Tanto no ensaio ALL4 como no ensaio ALL6, ocorreu aumento da concentração de SST comparado ao ensaio ALL2; mesmo assim, esses valores ficaram abaixo do valor de 30 mg/L admitido pela EPA (1999b) para trabalhar com desinfecção por radiação UV.

Os valores de absorvância possuem correlação com a concentração de SST ( $r_{\text{Kendall}} = 0,50$ ;  $p < 0,05$ ) e turbidez ( $r_{\text{Kendall}} = 0,50$ ;  $p < 0,05$ ). Nesse contexto, maiores valores de absorvância, implicam maiores valores tanto de SST quanto de turbidez; podendo contribuir com menores valores de dose de radiação e eficiência de desinfecção.

Os parâmetros temperatura, pH, DQO, cor e condutividade (associada à concentração de sólidos dissolvidos totais) possuem efeitos pouco significativos na desinfecção por radiação UV comparado à turbidez, sólidos suspensos totais e absorvância (EPA, 1999; METCALF E EDDY, 2003). Os valores de temperatura e pH na presente pesquisa se encontraram na faixa ideal, tanto no que se refere ao padrão de lançamento (resolução CONAMA Nº 430/2011) quanto para trabalhar com desinfecção por radiação UV (EDSTRON INDUSTRIES INC. 2003; NATURALTEC, 2014). A DQO não é significativa em concentrações baixas, mas substâncias húmicas presentes podem absorver a radiação UV (EPA, 1999; METCALF E EDDY, 2003). A cor não é necessariamente um problema quando se trata de efluentes; porém, pode ser usado como indicador visual (SPELLMAN, 2011). As condutividades da presente pesquisa apresentaram valores elevados, devido aos valores também elevados de sólidos totais; mesmo assim, não interferiram na eficiência de desinfecção.

### **4.3 Ensaios de desinfecção com radiação UV**

#### 4.3.1 Ensaio ALL2: Resultados dos ensaios de desinfecção com radiação UV e da análise de variância de um fator para os tempos de 15, 30 e 45 segundos.

Os resultados da análise de variância de medidas repetidas e da inativação média dos microrganismos indicadores empregados no ensaio ALL2, utilizando os tempos de 15, 30 e 45 segundos de exposição para a altura de lâmina líquida de 2 cm são apresentados na figura 15.

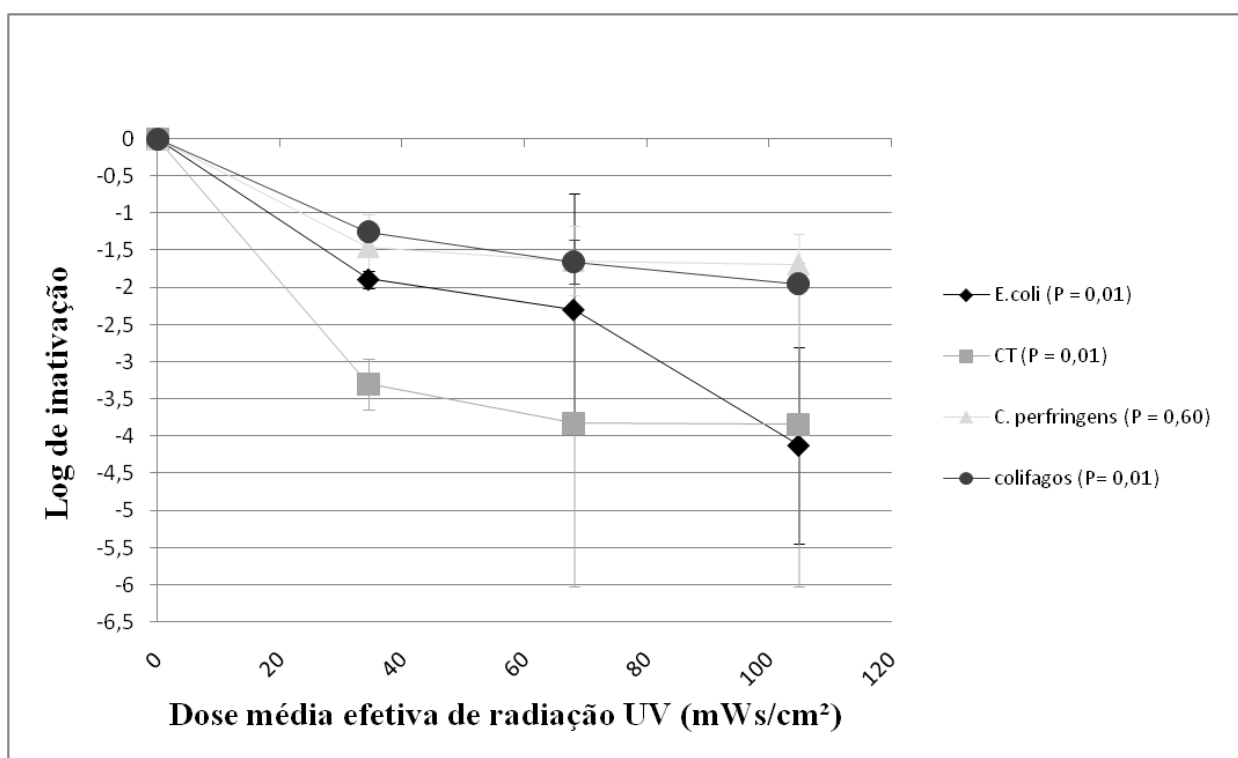


Figura 14 - Resultados dos ensaios de desinfecção UV para o ensaio ALL2 utilizando tempo de exposição de 15, 30 e 45 segundos.

De modo geral e através da análise de variância de medidas repetidas, observou-se que os microrganismos indicadores *E. coli*, CT e colifagos apresentaram decréscimo significativo ( $P=0,01$ ) com o aumento do tempo de exposição e das doses de radiação UV empregadas, enquanto que *C. perfringens* foi o microrganismo que apresentou maior resistência, pois, as médias não apresentaram diferenças significativas no decorrer do aumento do tempo de exposição ( $P=0,60$ ).

A análise de variância de medidas repetidas indicou que houve diferença entre as médias para *E. coli*, CT e colifagos; mostrando que para estes microrganismos indicadores o tempo de exposição foi um fator significativo. Para *C. perfringens* o mesmo efeito não foi

observado. Vale ressaltar que para todos os microrganismos indicadores empregados para esta altura de lâmina líquida os coeficientes de variação foram menores que 20%, indicando precisão nos resultados.

No presente ensaio, a desinfecção com radiação UV foi bastante efetiva para *E. coli*, CT e colifagos, sendo comprovada pela análise de variância de medidas repetidas à um nível de significância de 5%. A partir de 30 segundos de exposição (dose média efetiva de  $68,07 \pm 19,6$  mWs/cm<sup>2</sup>), alcançaram-se inativação média de  $2,29 \pm 1,55$  log para *E. coli*;  $3,82 \pm 2,20$  log para CT e,  $1,65 \pm 0,29$  log para colifagos.

*C. perfringens*, foi o microrganismo que apresentou maior resistência à desinfecção por radiação UV, por tratar-se de uma bactéria formadora de esporos que, de fato, é mais resistente à desinfecção por radiação UV; necessitando de doses elevadas, para alcançar uma total inativação (HIJNEN, BEERENDOK E MADEMA, 2006). As médias da concentração remanescente deste microrganismo indicador para cada tempo de exposição empregados neste ensaio não apresentaram diferenças significativas.

Pode-se, com base nos resultados, observar que a resistência à desinfecção por radiação UV foi classificada na seguinte ordem: bactérias < vírus < esporos; estando de acordo com Burch e Thomas (1998).

Gonçalves et al. (2003) citam que doses maiores que 20 mWs/cm<sup>2</sup> já são capazes de inativar a maioria das espécies de bactérias e vírus; porém, para a inativação de protozoários e helmintos o mesmo não acontece, necessitando-se de doses mais elevadas, o que pode ser antieconômico. Silva et al. (2001) obteve inativação aproximadamente entre 4 e 5 unidades logarítmicas para *E. coli* e CT respectivamente, com doses variando de 13,6 a 102,43 mWs/cm<sup>2</sup> aplicadas a efluentes de reator UASB. Na presente pesquisa, as doses de radiação UV empregadas encontraram-se nesta faixa, observando semelhanças nas unidades logarítmicas de remoção para *E. coli* e CT.

De acordo com Lazarova et al. (1999), doses de radiação UV entre 30 a 45 mWs/cm<sup>2</sup> para efluentes oriundos de tratamento secundário e terciário, são suficientes para a remoção entre 3 a 5 unidades logarítmicas de CT. Estes resultados mostraram semelhanças aos resultados obtidos neste trabalho para CT. Guo et al. (2011) obteve inativação de aproximadamente 5 unidades logarítmicas para *E. coli* e coliformes fecais com dose de radiação de 20 e 40 mWs/cm<sup>2</sup> respectivamente, para efluentes de tratamento secundário e terciário. Com radiação de  $34,47 \pm 11,2$  mWs/cm<sup>2</sup> a inativação média foi aproximadamente 3 log para CT; Porém, para *E. coli* foi aproximadamente de 2 log. A diferença de inativação em função da dose de radiação UV não só pode estar relacionado com os menores valores de

turbidez 0,3-1,0 uT (GUO et al. 2011), mas também com a resistência dos microrganismos que variam entre as espécies e até mesmo dentro da mesma espécie (QUEK E HU, 2008).

Para *E. coli* e colifagos no presente ensaio, com 15 segundos de exposição à radiação UV (dose média efetiva de  $34,47 \pm 11,2$  mWs/cm<sup>2</sup>) houve inativação média de  $1,89 \pm 0,11$  e  $1,26 \pm 0,02$  log respectivamente. Tal resultado de inativação com base na dose média efetiva foi semelhante ao trabalho de Koivunen e Heinonen-Tanski (2005), onde doses de radiação entre 10 a 14 mWs/cm<sup>2</sup> e 22 a 38 mWs/cm<sup>2</sup> alcançaram uma inativação de 0,55 a 1,44 para *E. coli* e 1 a 1,4 log para colifagos MS2 em efluente sintético.

Gehr et al. (2003) em efluentes de tratamento secundário com SST de 16 a 45 mgSST/L, mostrou que as doses de 20 e 30 mWs/cm<sup>2</sup> para colifagos MS-2 e *C. perfringens* foram suficientes para a inativação de aproximadamente 90% (1 log). Na presente pesquisa, colifagos e *C. perfringens*, com tempo de 15 segundos (dose média efetiva de  $34,47 \pm 11,6$  mWs/cm<sup>2</sup>) alcançaram inativação média de  $1,25 \pm 0,02$  e  $1,56 \pm 0,43$  log respectivamente, mostrando resultados próximos encontrados neste trabalho.

Hijnen, Beerendok e Madema (2006), a partir desse estudo bibliográfico, mostraram que a desinfecção por radiação UV é efetiva na desinfecção de diversos microrganismos patogênicos. Para a maioria das bactérias, foram obtidos, por exemplo, 3 unidades logarítmicas de inativação com doses próximas a 20 mWs/cm<sup>2</sup>. No presente ensaio, foi observado semelhanças de unidades logarítmicas de inativação para os microrganismos indicadores de bactérias.

#### **4.3.2 Ensaio ALL4: Resultados dos ensaios de desinfecção com radiação UV e da análise de variância de um fator para os tempos de 15, 30 e 45 segundos.**

Os resultados da análise de variância de medidas repetidas e da inativação média dos microrganismos indicadores empregados no ensaio ALL4, utilizando os tempos de 15, 30 e 45 segundos de exposição para a altura de lâmina líquida de 4 cm são apresentados na figura 16.



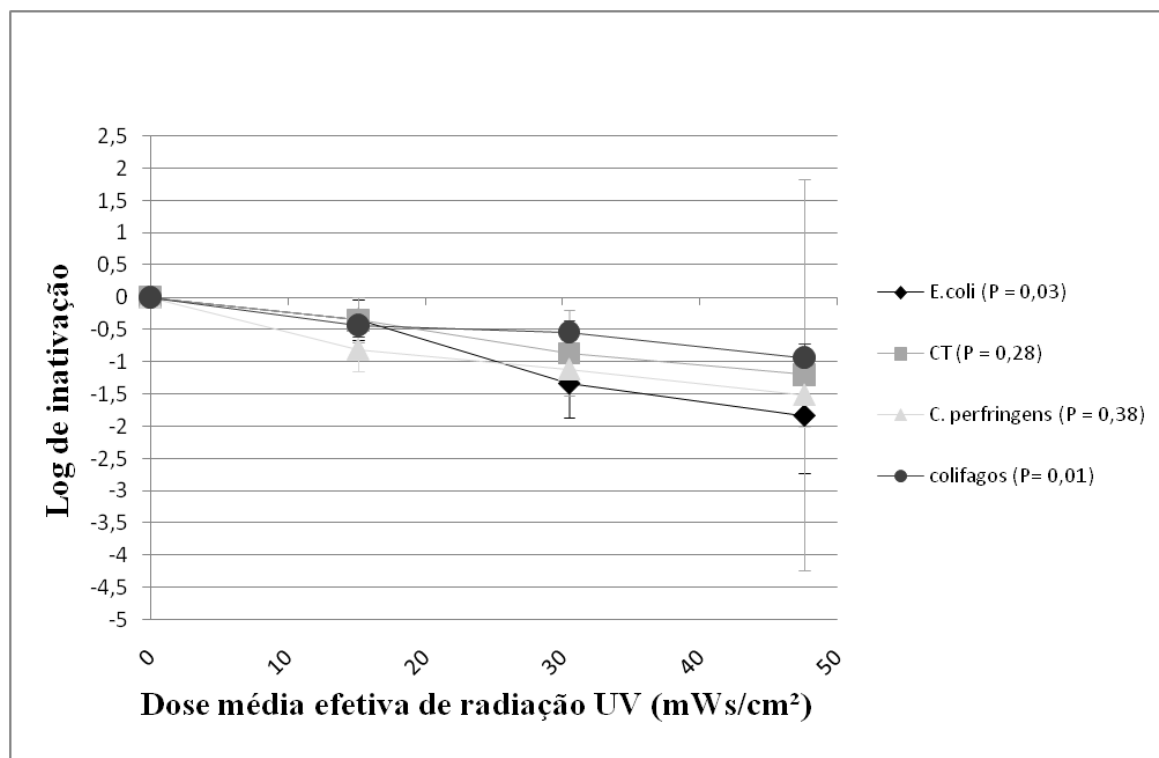


Figura 15 - Resultados dos ensaios de desinfecção UV para o ensaio ALL4 utilizando tempo de exposição de 15, 30 e 45 segundos.

De modo geral observou-se sensibilidade à radiação UV, comprovada pela análise de variância de medidas repetidas, dos microrganismos indicadores *E. coli* (P=0,03) e colifagos (P=0,01) no decorrer do tempo de exposição e devido ao aumento de doses de radiação UV.

Observou-se o decaimento das doses de radiação UV comparados ao ensaio anterior; pois, neste ensaio ocorreu queda na qualidade do esgoto sanitário, detectado a partir dos parâmetros físico-químicos avaliados. A análise de variância de medidas repetidas, não indicou decréscimo estatisticamente significativo da concentração remanescente dos microrganismos indicadores *C. perfringens* (P=0,38) e CT (P=0,28) com o aumento do tempo de exposição.

Em relação ao microrganismo CT, os resultados das eficiências ( $\log N_0/N$ ) das triplicatas após 45 segundos de exposição à radiação UV oscilaram de 0,20 a 5,97. O coeficiente de variação para este microrganismo indicador foi de 46%, portanto elevado. Esta variação ocasionada foi determinante no resultado da análise de variância de medidas repetidas que não detectou diferença estatística para este tempo de exposição. Enquanto os demais coeficientes de variação foram abaixo de 20%.

Para a *E. coli*, a partir de 45 segundos (dose média efetiva de  $47,58 \pm 11,5$  mWs/cm<sup>2</sup>), houve inativação média de  $1,84 \pm 0,88$  log. Para colifagos, com o mesmo tempo de exposição, foi detectado inativação média de  $0,93 \pm 0,22$  log. Para CT e *C. perfringens*, não foram detectados diferenças significativas entre as médias da concentração remanescente nos tempos de exposição empregados.

Bilotta e Daniel (2007) analisaram o efeito da intensidade média emitida pela fonte de 4,5 mW/cm<sup>2</sup>, utilizando reator UV semelhante ao usado neste trabalho, para efluente de reator UASB seguido de filtro biológico (coleta de amostras no final do filtro). Os autores utilizaram espessura de lâmina líquida de 3 cm e dose média de radiação UV de aproximadamente 10,78 mWs/cm<sup>2</sup>, detectaram eficiência de inativação menor que 1 log para *C. perfringens*; mostrando resultados próximos a presente pesquisa a partir do tempo de exposição de 15 segundos (dose média efetiva de  $15,12 \pm 3,8$  mWs/cm<sup>2</sup>).

Para colifagos e *C. perfringens* com o tempo de exposição de 30 segundos (dose média efetiva de  $30,48 \pm 8,2$  mWs/cm<sup>2</sup>) foi alcançado inativação de  $0,54 \pm 0,19$  e  $1,11 \pm 0,25$  log respectivamente; semelhante, em termos de doses de radiação UV, ao trabalho proposto por Gehr et al. (2003).

#### **4.3.3 Ensaio ALL6: Resultados dos ensaios de desinfecção com radiação UV e da análise de variância de um fator para os tempos de 30, 60 e 90 segundos.**

Os resultados da análise de variância de medidas repetidas e da inativação média dos microrganismos indicadores empregados no ensaio ALL6, utilizando os tempos de 30, 60 e 90 segundos de exposição para a altura de lâmina líquida de 6 cm são apresentados na figura 17.

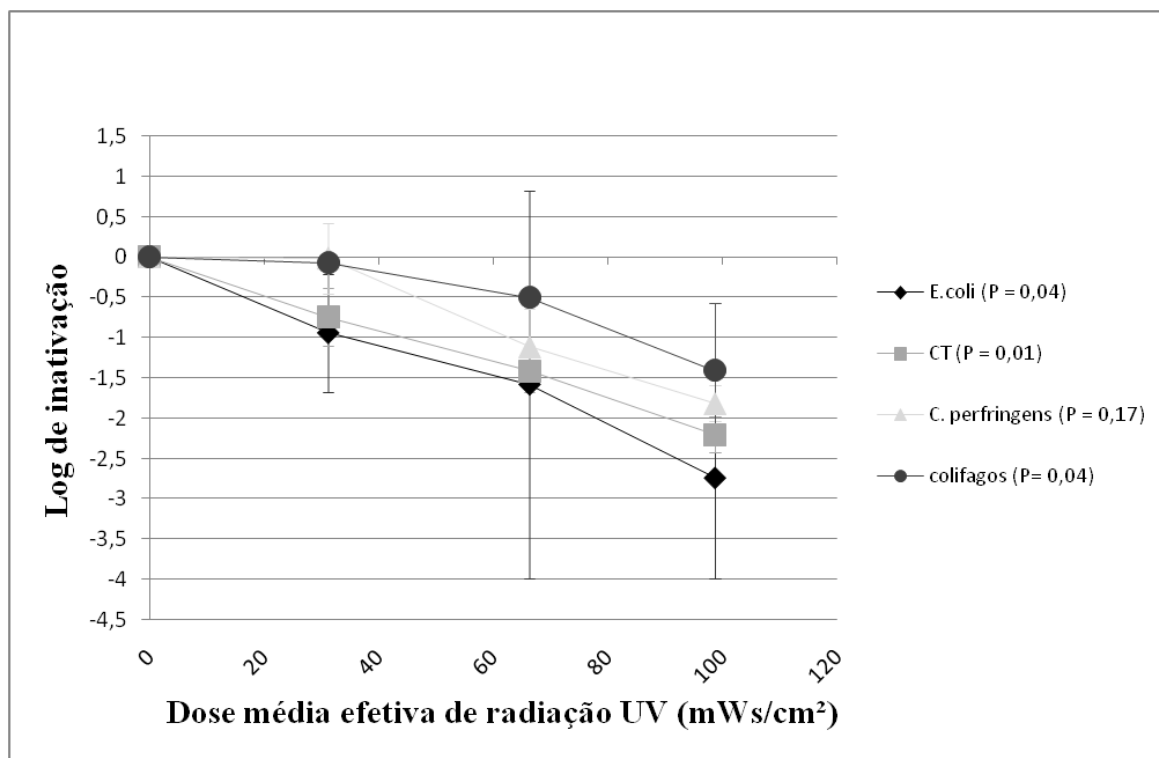


Figura 16 - Resultados dos ensaios de desinfecção UV para o ensaio ALL6 utilizando tempo de exposição de 30, 60 e 90 segundos.

De acordo com a análise de variância de medidas repetidas, observou-se, de modo geral, decréscimo significativo para os microrganismos indicadores *E. coli* ( $P=0,04$ ), CT ( $P=0,01$ ) e colifagos ( $P=0,04$ ) no decorrer do tempo de exposição. Para o microrganismo *C. perfringens* ( $P=0,17$ ) não houve inativação total significativa no decorrer do tempo de exposição, não ocorrendo diferença das médias para este microrganismo. Para todos os microrganismos indicadores o coeficiente de variação foi menor que 20%, indicando boa precisão dos dados.

Pode-se, através da figura 17, observar que os melhores resultados de desinfecção por radiação UV, para esta altura de lâmina líquida, encontram-se no tempo de exposição de 90 segundos (dose média efetiva de  $98,68 \pm 48,6$  mWs/cm<sup>2</sup>). Para *E. coli*, houve inativação média de aproximadamente a 3 log; para CT, a inativação média foi de  $2,20 \pm 0,23$  log e, para colifagos ocorreu inativação média de  $1,41 \pm 0,85$  log.

Souza et al. (2012) em ensaio de desinfecção por radiação UV para efluentes de UASB seguido de lagoa facultativa (coleta de amostras) empregando altura de lâmina líquida de 8 cm mostraram que doses de radiação de 94,13 e 95,13 mWs/cm<sup>2</sup> foram capazes de inativar aproximadamente 1,8 e 3 log para *E. coli* e, 1 e 3 a 5 log para CT respectivamente. Os resultados obtidos pelos mesmos autores apresentaram oscilações em decorrer dos

parâmetros físico-químicos do efluente. Essa variabilidade também pode estar relacionada com a resistência dos microrganismos-alvos. Na presente pesquisa, em termos de dose de radiação UV, os resultados foram semelhantes ao trabalho de Souza et al. (2012).

*C. perfringens* foi o microrganismo que apresentou maior resistência à ação da radiação UV. Algumas espécies de protozoários formam cistos quando estão em condição de estresse e, segundo Burch e Thomas (1998), os cistos de protozoários possuem uma cápsula resistente, que serve de proteção aos agentes químicos e físicos, sendo esta a razão dos cistos serem mais resistentes à desinfecção por radiação UV. Segundo Chang et al. (1985) vírus e bactérias formadoras de esporos são mais resistentes ao efeito da radiação UV comparadas às bactérias do grupo coliformes. Os autores reportaram ainda que, vírus e bactérias formadoras de esporos requerem doses maiores que 4 e 9 vezes, respectivamente, para obtenção do mesmo nível de eficiência de inativação da *E. coli*.

#### **4.3.4 Comparação da eficiência de inativação para cada altura de lâmina líquida empregada com o tempo de exposição em comum de 30 segundos**

Na figura 18 são apresentadas as eficiências de inativação (%) dos microrganismos empregados na pesquisa para cada altura de lâmina líquida, com tempo de exposição em comum de 30 segundos.

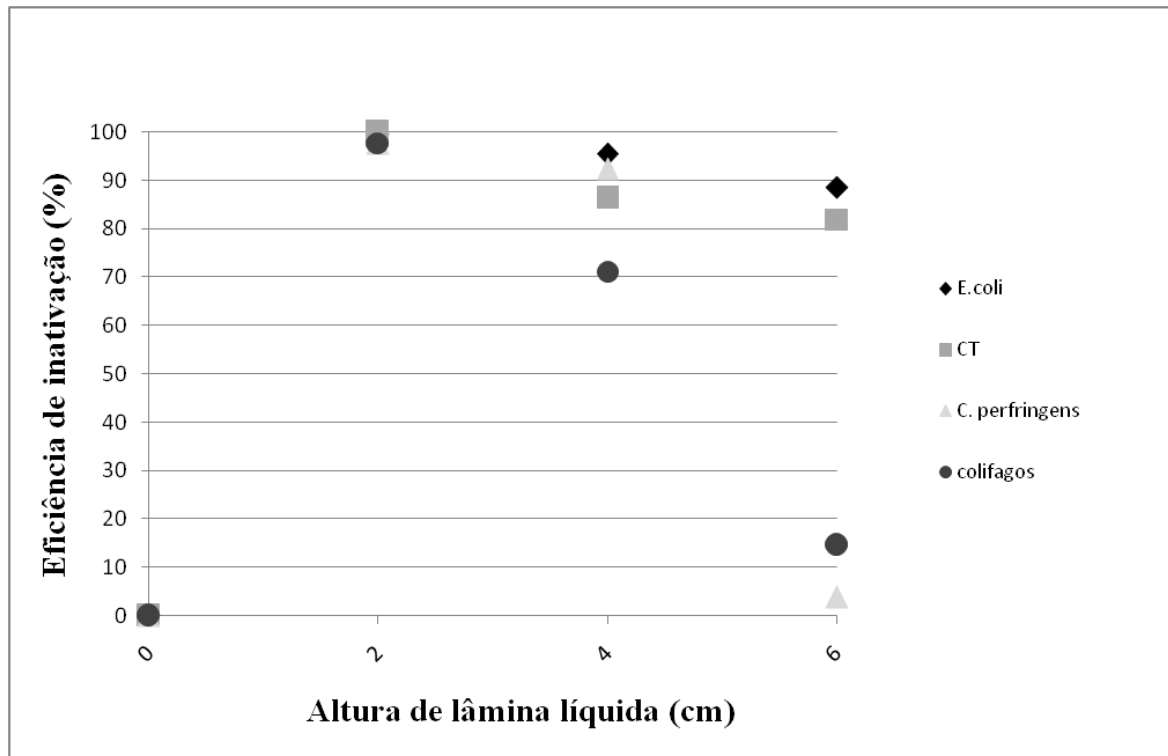


Figura 17 - Eficiência de inativação (%) de todas as alturas de lâmina líquida para o tempo de exposição em comum de 30 segundos.

Pode-se observar que, mantendo o tempo de exposição e aumentando a altura de lâmina líquida, a eficiência de desinfecção (%) decaiu, para todos os microrganismos indicadores empregados. A altura de lâmina líquida e a absorbância interferem nos valores dos cálculos de dose média efetiva de radiação UV; resultando no decaimento da dose de radiação e da eficiência média de inativação. Para 30 segundos de exposição, no ensaio ALL2, obteve-se dose média efetiva de  $68,07 \pm 19,6$  mWs/cm<sup>2</sup>; para o ensaio ALL4 e ALL6 a dose média efetiva decaiu para  $30,48 \pm 8,2$  e  $31,22 \pm 16,2$  mWs/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

Para *E. coli*, no ensaio ALL2 e com 30 segundos de exposição a eficiência média de inativação média foi de 99,49%; para o ensaio ALL4 a eficiência média de inativação decaiu para 95,42% e, para o ensaio ALL6 a eficiência foi de 88,58%. Para colifagos, no ensaio ALL2 a eficiência média foi de 97,76%, no ensaio ALL4 e ALL6 as eficiências médias foram de 71,20% e 14,68% respectivamente. Para *C. perfringens*, no ensaio ALL2 a eficiência média foi de 97,68% e para o ensaio ALL4 e ALL6 as eficiências médias de inativação foram de 92,32% e 3,92% respectivamente.

Com base nos resultados dos ensaios ALL2 e ALL6 (doses médias efetivas próximas de radiação UV), ficou claro que quanto maior a altura de lâmina líquida para um mesmo tempo de exposição, as eficiências tendem a ser menores.

Segundo Daniel (1992) mantendo o tempo de exposição e aumentando a altura de lâmina líquida, a dose média recebida será menor, deteriorando assim a eficiência da desinfecção por radiação UV. Campos e Sampaio (1985) mostraram que utilizando alturas de lâmina líquida de 2, 4, 6 e 8 cm; para profundidades maiores que 6 cm, o consumo de energia elétrica e a dose de radiação são maiores para obtenção das eficiências satisfatórias de inativação na desinfecção por radiação UV. Batista et al. (2013) estudaram cinco alturas de lâminas líquidas de efluente doméstico primário, a saber: 5, 10, 15, 20 e 25 cm, em um reator feito de alvenaria com dimensões de 1,08 m de largura por 1,18 m de comprimento e 0,40 m de profundidade, com tempo de exposição de 20 minutos e mostraram que a eficiência de inativação foi melhor para a menor altura empregada. O mesmo ocorreu esta pesquisa, sendo na menor altura de lâmina líquida empregada onde foram obtidos os melhores resultados de desinfecção.

O ensaio ALL2 foi o mais efetivo dentre os demais; deixando claro, através dos dados apresentados, que quanto maior a concentração de sólidos suspensos totais, absorvância e a altura de lâmina líquida, as doses e as eficiências de inativação dos microrganismos-alvo serão menores. Estes dados ficaram claros para o tempo de exposição de 30 segundos em todas as alturas de lâminas líquidas, em particular para os ensaios ALL2 e ALL4, onde para os mesmos tempos de exposição, as doses de radiação UV decaíram pela metade, resultando em menores eficiências. O mesmo comportamento foi observado por Tinôco (2011).

#### **4.4 Ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro**

Nas figuras 19, 20 e 21 são apresentados os resultados das médias de recuperação do mecanismo de fotorreativação e recuperação no escuro ( $\log N/N_0$ ) para os microrganismos indicadores *E. coli* e CT. Para este caso, N significa a concentração remanescente após 3 horas de exposição nos mecanismos de reparação e  $N_0$  significa concentração remanescente após cada tempo de exposição de radiação UV empregado; sendo no ensaio ALL2 e ALL4 os tempos de 15, 30 e 45 segundos e, para o ensaio ALL6 tempos de 30, 60 e 90 segundos. Nas figuras 19, 20 e 21, “F” significa fotorreativação e “RE” recuperação no escuro e, valores acima de 0 significa recuperação microbiológica.

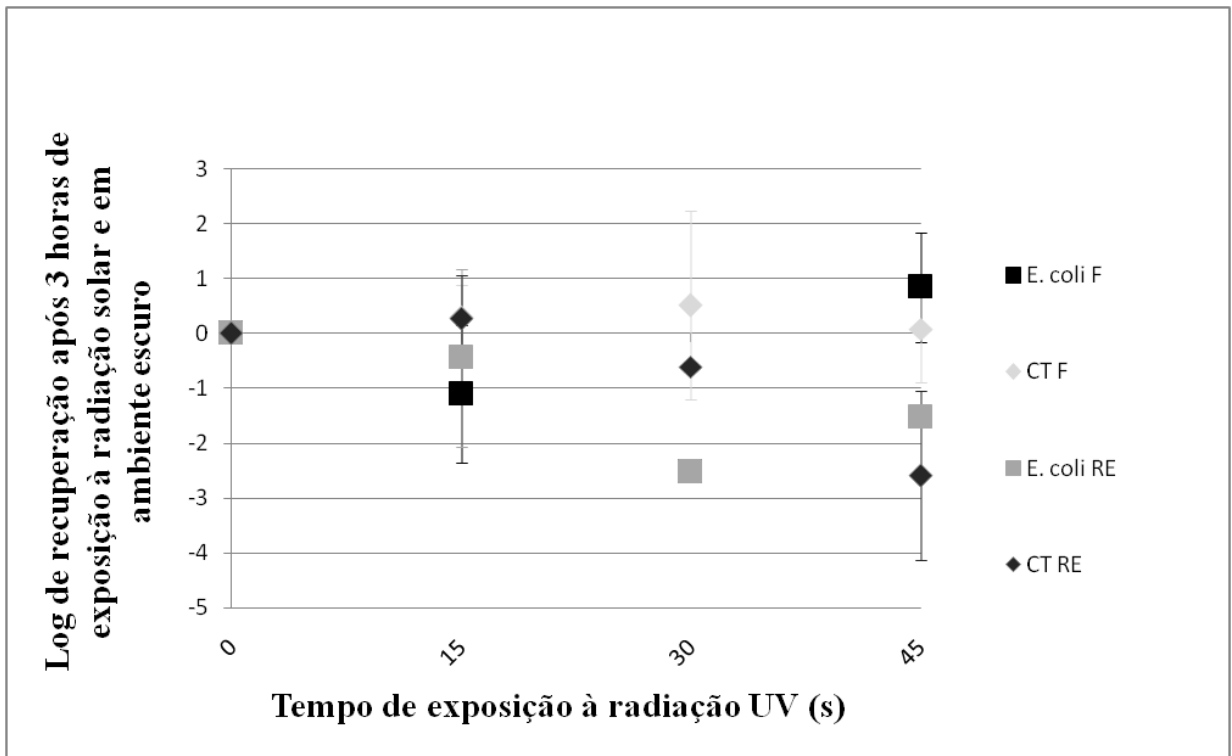


Figura 18 - Resultados da recuperação média dos ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro para o ensaio ALL2.

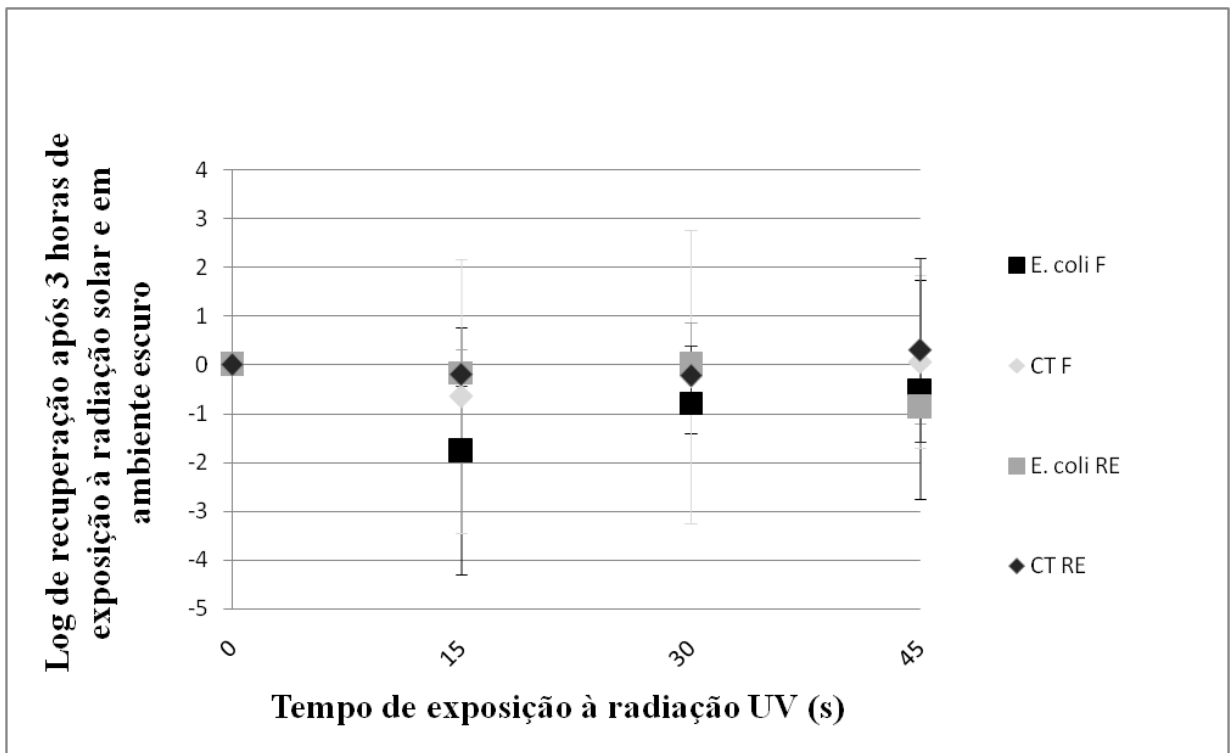


Figura 19 – Resultados da recuperação média dos ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro para o ensaio ALL4.

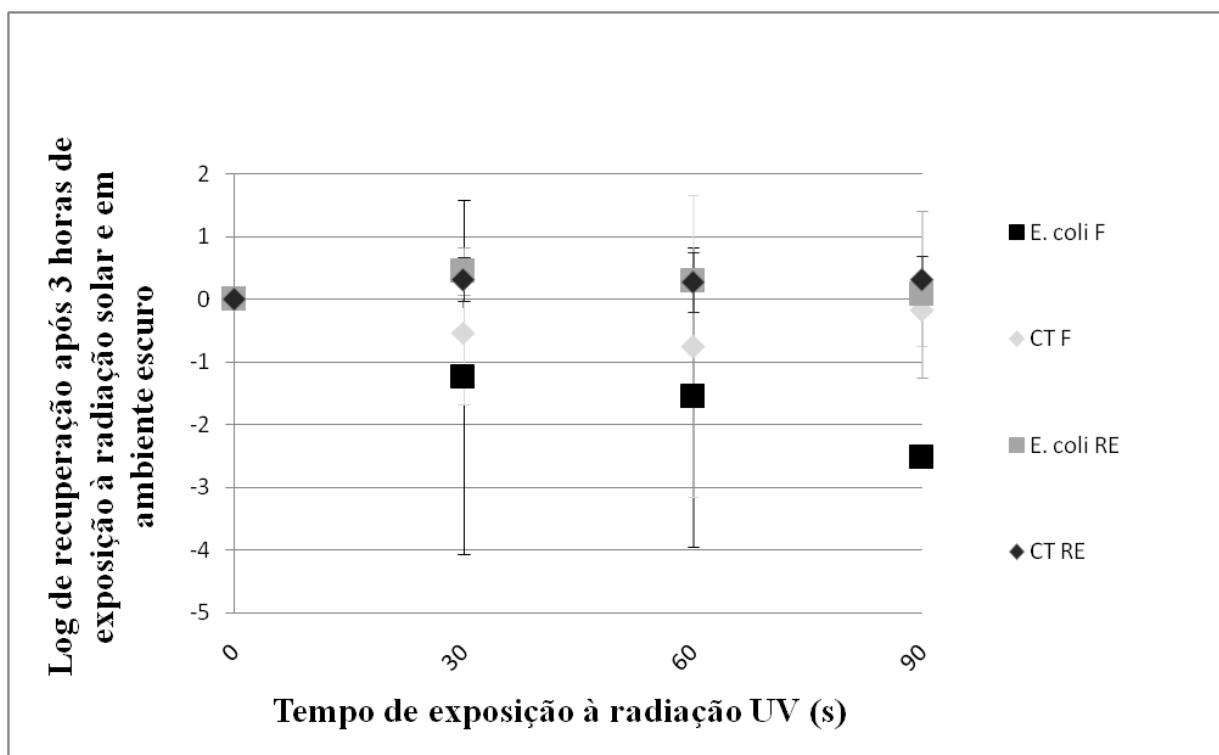


Figura 20 - Resultados da recuperação média dos ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro para o ensaio ALL6.

No ensaio ALL2 cm foi observado fotorreativação média tanto para *E. coli* quanto para CT. Para CT foi observado fotorreativação média nas alíquotas dos tempos de 15 (dose média de  $34,47 \pm 11,2$  mWs/cm<sup>2</sup>) e 30 segundos (dose média de  $68,07 \pm 19,6$  mWs/cm<sup>2</sup>); sendo recuperação média de  $0,30 \pm 0,60$  e  $0,52 \pm 1,72$  log respectivamente. Para *E. coli* foi observado fotorreativação média na alíquota do tempo de 45 segundos (dose média efetiva de  $104,89 \pm 33,6$  mWs/cm<sup>2</sup>), sendo uma recuperação média de  $0,84 \pm 1,00$  log. Em relação ao fenômeno de recuperação no escuro, no ensaio ALL2, não foi observado.

No ensaio ALL4, não foi evidenciada fotorreativação média para os dois microrganismos indicadores empregados. A recuperação no escuro para CT e *E. coli* foram inferiores a 0,5 log.

No ensaio ALL6, foi detectada apenas recuperação no escuro, sendo pouca significativa para os dois microrganismos indicadores. Para *E. coli* foi mais perceptível e a recuperação média no escuro para as alíquotas dos tempos de 30, 60 e 90 segundos (doses médias de  $31,22 \pm 16,2$ ;  $66,35 \pm 34,1$  e  $98,68 \pm 48,6$  mWs/cm<sup>2</sup>) foram de  $0,45 \pm 0,38$ ;  $0,30 \pm$



0,15;  $0,07 \pm 1,32$  log respectivamente. Para CT, com os mesmos tempos de exposição empregados, a recuperação no escuro foi  $0,32 \pm 0,34$ ;  $0,28 \pm 0,47$  e  $0,31 \pm 0,39$  log respectivamente.

Pode-se, com base nos resultados, observar que em ambos os mecanismos de recuperação microbiológica foram maiores para as doses médias efetivas menores de radiação UV empregados. O mesmo comportamento foi observado por Guo et al. (2011). Doses de radiação UV acima de  $60 \text{ mWs/cm}^2$  tornam os mecanismos de reparos insignificantes (HIJNEN, BEERENDOK E MADEMA, 2006). Nesta pesquisa, os mecanismos de reparos, mesmo insignificantes, foram mais perceptíveis abaixo desta dose.

O decréscimo da concentração dos microrganismos indicadores observados em todos os ensaios, tanto na fotorreativação quanto na recuperação no escuro, provavelmente foi resultante da morte natural das células após a desinfecção por radiação UV ou devido ao efeito da ação germicida da radiação solar.

Liltved e Landfald (2000) mostraram que a radiação solar além proporcionar reparos para os danos causados, em exposição contínua o efeito da recuperação pode se deteriorar. O ensaio ALL4 foi o que apresentou menor dose de radiação UV (influência da qualidade do efluente) comparado ao ensaio ALL2; porém, o ensaio ALL4 apresentou maior temperatura e possivelmente maior intensidade da radiação solar para a fotorreativação; revertendo o processo de recuperação para a desinfecção por radiação solar (SODIS). Os horários empregados para o estudo da possibilidade dos mecanismos de reparos estão dentro da faixa ótima para trabalhar com a desinfecção por radiação solar (das 09h00 às 15h00); pois, a radiação é máxima nos horários das 12h00 às 13h00.

Quek e Hu (2008b) em estudo do fenômeno da fotorreativação após 4 horas de exposição, utilizando lâmpadas de baixa e média pressão, simulando intensidade de radiação solar de regiões tropicais, mostraram que para as cepas da *E. coli* ATCC 15597 e ATCC 11229 a capacidade de recuperação para cada espécie de microrganismo pode diferir de maneira significativa; porém, exposição com efeito alta intensidade solar ( $>12 \text{ Klux}$  de intensidade luminosa) a inativação prevalece ao efeito de reativação, por causa da ação germicida do sol.

Segundo Lindenauer e Darby (1994) a dose de radiação UV é um fator dominante para a fotorreativação; pois quanto maior a dose, menor o número de células fotorreativantes. Nesta pesquisa, foi observado que para as doses maiores de radiação UV, a fotorreativação não foi significativa. Dificilmente na fotorreativação, a recuperação exceda a uma unidade logarítmica (DANIEL, 1993).

Sanz et al. (2007) em estudo com sete doses diferentes de radiação UV (50, 75, 100, 125, 150 e 175 mWs/cm<sup>2</sup>) nos fenômenos de recuperação para coliformes totais após a desinfecção por radiação UV e, observaram um fenômeno em que doses maiores implicam maior velocidade a fotorreativação, porém menor porcentagem de sobrevivência é encontrada comparada à doses baixas de radiação UV. Os autores mostraram também que a recuperação no escuro não foi significativa comparada à fotorreativação. Na presente pesquisa foi observado maior valores de sobrevivência na fotorreativação do que recuperação no escuro.

Lindenauer e Darby (1994) discutiram a influência das doses de radiação UV de 30 a 239 mWs/cm<sup>2</sup> sobre os mecanismos de fotorreativação e, abordaram que para a menor dose empregada, os mecanismos de recuperação foram significativos. Na presente pesquisa, as recuperações médias de fotorreativação foram mais perceptíveis para as doses menores.

Daniel (1992) mostrou que a fotorreativação ocorre principalmente para doses menores, e quanto maior a espessura de lâmina líquida para um mesmo tempo de exposição, a dose é menor. Na presente pesquisa o aumento da altura da lâmina líquida de 2 para 4 e 6 cm não interferiu na fotorreativação. Outros fatores que podem ter interferido no processo são: a intensidade de radiação solar e temperatura do efluente.

De acordo com Tosa e Hirata (1999) deve-se levar em consideração um aumento de dose de radiação UV do líquido a ser desinfetado, para seu descarte em rios ou lagos, visando uma segurança contra a fotorreativação. Segundo Daniel (1992) a dose necessária para manter níveis aceitáveis de inativação, sem considerar a fotorreativação, pode chegar ser de até 62% superior à dose necessária para apenas a inativação em níveis aceitáveis.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho foram consideradas as seguintes conclusões:

- A absorvância se relaciona com a concentração de SST e turbidez. Esses parâmetros são fundamentais e limitantes para a desinfecção por radiação UV. Para efluentes de reator anaeróbio seguido de filtro anaeróbico, a desinfecção por radiação UV mostrou-se como uma excelente alternativa, uma vez que as características físico-químicas do efluente analisados da ETE se encontraram ótimos para trabalhar com desinfecção por UV.

- As doses médias efetivas sofrem interferência das características do efluente; entretanto, atingiram-se eficiências satisfatórias de inativação, para os microrganismos indicadores *E. coli*, CT e colifagos. Observou-se sensibilidade desses microrganismos indicadores no decorrer do tempo de exposição (devido ao aumento das doses médias efetivas de radiação UV), comprovada significativamente através da análise de variância de medidas repetidas. Já para *C. perfringens*, não foram observadas diferenças significativas entre as médias conforme o aumento do tempo de exposição em todas as alturas de lâminas líquidas empregadas, mostrando que, de fato, este microrganismo indicador apresenta grande resistência à radiação UV.

- O fator tempo de exposição empregado foi significativo para *E. coli* e colifagos em todos os ensaios, mostrando que houve diferenças entre as médias da concentração remanescente destes microrganismos. Para CT, este fator foi significativo para as alturas de lâmina líquida de 2 e 6 cm, enquanto que para *C. perfringens*, este fator não foi significativo.

- De maneira geral os elevados percentuais de redução dos microrganismos indicadores empregados indicaram a viabilidade da desinfecção UV.

- Mantendo o tempo de exposição e aumentando a altura de lâmina líquida, as eficiências de inativação dos microrganismos indicadores *E. coli*, CT, colifagos e *C. perfringens* diminuíram.

- Outro fator que interfere na eficiência de desinfecção empregando radiação UV são os mecanismos de recuperação microbiológica. Nesse estudo, os mecanismos de recuperação microbiológica foram pouco significativos para os microrganismos indicadores empregados; porém, deve-se levar em consideração a recuperação microbiológica, pois tanto a recuperação quanto a resistência à desinfecção, variam entre as espécies e até mesmo dentro da mesma espécie.

- Considerando-se que a desinfecção de efluentes é uma importante barreira sanitária, uma vez que os usos múltiplos da água são comumente previstos, e que os mecanismos de recuperação microbiana possuem a capacidade de alterar a qualidade das águas já desinfetadas; torna-se de suma importância considerações sobre a resistência dos microrganismos indicadores, como *C. perfringens* (indicador de protozoários); necessitando de doses maiores de radiação UV para uma total inativação.

Com a realização deste trabalho, recomenda-se:

- Buscar alternativas, como por exemplo, aproveitamento do uso do efeito germicida da radiação solar (SODIS), pode contribuir de maneira efetiva e econômica com a desinfecção com lâmpadas UV (redução do tempo de exposição para alcançar doses médias efetivas de radiação UV).

- Realizar ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro em cada hora de exposição à radiação solar (ou artificial) em cada hora de exposição e em tempos maiores que 3 horas.

-Empregar maiores tempo de exposição (doses médias efetivas de radiação UV) para obtenção de melhores resultados de eficiência de inativação, principalmente para *C. perfringens*.

## 6 REFERÊNCIAS

ADLER, H. I. **The genetic control of radiation sensitivity in microorganisms.** Advances Radiation Biology v.2. Nova York, 1966, p. 167-191.

ANJOS, A. **Análise de variância.** Notas de aula, capítulo 7. Curitiba, 2009. Disponível em: < <http://www.est.ufpr.br/ce003/material/cap7.pdf> >.

APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 20 ed. Washington, 1999, 2670 p.

ASSUNÇÃO, J. V.; PESQUERO, C. R. Dioxinas e furanos: origens e riscos. **Revista de Saúde Pública.** São Paulo, v. 33, n.5, p. 523-30, out. 1999.

BAIRD, C.; CANN, M. **Environmental Chemistry.** 4 ed. Nova York: W. H. Freeman and Company, 2008, 831 p.

BATISTA, R. O.; SANTOS, E. B. S.; SILVA, J. B. A.; COSTA, M. S.; SANTOS, D. B. Efeito da radiação ultravioleta artificial na desinfecção de microrganismos em lâminas de esgoto doméstico. **Enciclopédia Biosfera.** Goiânia, v. 9, n. 16, p. 122-134, nov. 2013.

BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. Ozônio e radiação UV na inativação de indicadores patogênicos em esgoto sanitário: análise comparativa. **Minerva,** v.3, n.2, p. 199-207. 2007.

BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. Utilização de lâmpadas germicidas na desinfecção de esgoto sanitário. **Ambi-Água,** Taubaté, v. 7, n.1, p. 120-129, 2012.

BOLTON, J. R. Light compendium: ultraviolet principles and applications. **Inter-American Photochemical Newsletter.** Canada, v. 22, n. 2, nov. 1999.

BOLTON, J. R.; LINDEN, K. G. Standardization of methods for fluence (UV dose) determination in bench-scale UV experiments. **Journal of Environmental Engineering.** v. 129, n. 3, mar. 2003.

BURCH, J. D.; THOMAS, K. E. Water disinfection for developing countries and potencial for solar thermal pasteurization. **Solar Energy**. Grã-Bretanha, v. 64, p. 87-97, fev. 1998.

CAMPOS, J. R.; PIZZIRANI, J. A. Desinfecção com radiação ultravioleta. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA. 1977. **Anais...** Belo Horizonte, 1977.

CAMPOS, J. R.; SAMPAIO, A. O. Desinfecção de esgotos sanitários com utilização de radiação ultravioleta. **Revisa Dae**, São Paulo, v. 45, n. 140, p.101-108, mar. 1985.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Determinação de colifagos em amostras de água: método de ensaio**. L5/225. São Paulo, 1990. 24 p.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. ***Clostridium perfringens*: determinação em amostras de água pela técnica de tubos múltiplos**. Método de ensaio L5/213. São Paulo, 1993. 25 p.

CHANG, R. **Physical chemistry with applications to biological systems**. 2 ed. Nova York: Macmillan Publising Co. Inc., 1977. 456 p.

CHANG J. C. H.; OSSOFF, S. F.; LOBE, D. C.; DORFMAN, M. H.; DUMAIS, C. M.; QUALLS, R. G.; JOHNSON, J. D. UV inactivation of pathogenic and indicator microorganisms. **Applied Environmental Microbiology**, v. 49, n. 6, p. 1361-1365, 1985.

CHERNICHARO, C. A. L.; DANIEL, L. A.; SENS, M.; FILHO, B. C. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de desinfecção**. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.) Pós-tratamento de efluentes anaeróbios. PROSAB/FINEP. Belo Horizonte. Cap. 7. 2001, p. 377-453.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 430/2011**. 2011.

COUTO, M. F.; PETERNELLI, L. A.; BARBOSA, M. H. P. Classificação dos coeficientes de variação para a cultura da cana de açúcar. **Ciência Rural**, v. 43, nº 6, jun. 2003.

DANIEL, L. A. **Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta: fotorreativação e obtenção de parâmetros cinéticos**. 1993. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

DANIEL, L. A.; CAMPOS, J. R. Fundamentos e aspectos de projeto de sistemas de desinfecção de esgoto sanitário com radiação ultravioleta. **Revista Dae-Sabesp**, São Paulo, n. 163, p. 5-11, jan./fev. 1992.

DANIEL, L. A. (Coord.) **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES. PROSAB. São Paulo. 149 p. 2001.

DAVIS, C. **Statistical Methods for the Analysis of Repeated Measurements**. Nova York: Springer-Verlag Inc. 2002, 442 p.

DIGGLE, P. J. An approach to the analysis of repeated measurements. **Biometrics**, v. 44, nº 4, p. 959-971, Dez. 1988.

EARTH TECH (CANADÁ) INC. **Chlorine and alternative disinfectants guidance manual**. Manitoba Water Stewardship – Office of Drinking Water. Canadá. 2005, 117 p.

EDSTROM INDUSTRIES INC. **Ultraviolet disinfection**. 2003. Disponível em: < <http://www.water-research.net/Waterlibrary/privatewell/UVradiation.pdf> >. Acesso em: 09/08/2014.

EPA. U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Alternative disinfectants and oxidants guidance manual**. (EPA 815-R-99014). 1999a, 346 p.

EPA. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Wastewater technology fact sheet – Ultraviolet disinfection**. (EPA 832-F-99-064). Washington, DC. 1999b, 7 p.

EPA. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule.** (EPA 815-R-06-007). Washington, DC. 2006. 436 p.

GEHR, R. et al. Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. **Water Research**, v. 37, p. 4573-4586, jun. 2003.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental.** 15 ed. Piracicaba: Esalq, 2009. 477 p.

GONÇALVES, R. F.; FILHO, B. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; LAPOLLI, F. R.; AISSE, M. M.; PIVELI, R. P. **Desinfecção por radiação ultravioleta.** In GONÇALVES, R. F. (Coord.): Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES. PROSAB, Edital 3. Rio de Janeiro. 2003, p. 209-275.

GURGEL, F. L.; FERREIRA, D. F.; SOARES, A. C. S. **O coeficiente de variação como critério de avaliação em experimentos de milho e feijão.** Boletim de pesquisa e desenvolvimento 85. Belém: Embrapa, Fev. 2013. 120 p.

GUO, MT.; HUANG, JJ.; LIU, WJ. Growth and repair potential of three species of bacteria in reclaimed wastewater after UV disinfection. **Biomedical and Environmental Sciences.** China, v. 24, n. 4, p. 400-407, jan. 2011.

HALLMICH, C.; GEHR, R. Effect of pre- and post-UV disinfection conditions on photoreactivation of fecal coliforms in wastewater effluents. **Water Research.** Canadá, v. 44, p. 2885-2893, fev. 2010.

HIJNEN, W. A.M; BEERENDONK, E.F.; MEDEMA, G.J. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review. **Water Research.** Holanda, v. 40, p. 3-22, 2006.



IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2008. Rio de Janeiro, 2010, v. 1, n. 1, 219 p.

JAGGER, J. **Introduction to reseach in ultraviolet photobiology**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc. ADLER, H. I. The genetic control of radiation sensitivity in microorganisms. *Advances Radiation Biology* v.2. Nova York, 1966, p. 167-191.

JUNG, Y. J; OH, S. B.; KANG, J. -W. Synergistic effect of sequential or combined use of ozone and UV radiation for the disinfection of *Bacillus subtilis* spores. **Water Research**. Republica da Coreia, v. 42, p. 1613-1621, 2006.

JUNGFER, C.; SCHWARTZ, T.; OBST, U. UV-induced dark repair mechanisms in bacteria associated with drinking water. **Water Research**. Alemanha, v. 47, p. 188-196, 2007.

KOIVUNEN, J.; HEINONEN-TANSKI, H. Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatments. **Water Research**. Finlândia, v. 39, p. 1519-1526, mar. 2005.

KOLLER, L. R. **Ultraviolet radiation**. Nova York: John Wiley & Sons Inc. 1952. 142 p.

LAZAROVA, V.; SAVOYE, P.; JANEX, M. L.; BLATCHLEY III, E. R.; POMMEPUY, M. Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 5, p. 203-213, 1999.

LEVINE, D. M.; STEPHEN, D. F.; KREHBIEL, T. C.; BERENSON, M. L. **Estatística: Teoria e Aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2012.

LIBERTI, L.; NOTARNICOLA M.; PETRUZZELI, D. Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. UV disinfection: parasite removal and by-product formation. **Desalination**, v. 152, p. 315-324, abr. 2002.

LINDENAUER, K. G.; DARBY, J. L. Ultraviolet disinfection of wastewater: Effect of dose on subsequent photoreactivation. **Water Research**. Califórnia, EUA, v. 28, n. 4, p. 805-817, 1994.

LILTVED, H.; LANDFALD, B. Effects of high intensity light on ultraviolet-irradiated and non-irradiated fish pathogenic bacteria. **Water Research**, v. 34, n. 2, p. 481-486, 2000.

LOBO, M. G. **Avaliação da desinfecção de água por reator utilizando radiação ultravioleta**. 2008. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da região de Joinville, Joinville, 2008.

MAIA, J. A. R.; GARGANTA, R. M.; SEABRA, A.; LOPES, V. P.; PRISTA, A.; FREITAS, D. Uma nota didáctica breve no uso esclarecido de procedimentos estatísticos em análise de dados repetidos no tempo. Um estudo guiado para investigadores das Ciências do Desporto. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, v. 4, nº 3, p. 115-133, 2004.

MAMANE, H.; LINDEN, K. G. Impact of particle aggregated microbes on UV disinfection. I: evaluation of spore-clay aggregates and suspended spores. **Journal of Environmental Engineering**. v. 132, n. 6, p. 596-606. Jun. 2006.

MEMÓRIA, J. M. P. **Breve história da estatística**. 1 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 112 p.

METCALF E EDDY, INC. **Wastewater engineering – treatment and reuse**. 4 ed. Nova York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

MEYER, S. T. O uso do cloro na desinfecção de águas, a formação de Triahalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. **Cadernos de saúde pública**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 99-110, jan./mar. 1994.

MOROWITZ, H. J. Absorption effects in volume irradiation of microorganisms. **Science**. v. 111, mar. 1950.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5 ed. Nova York: John Wiley and Sons, 2001. 699 p.

NADDEO, V. Wastewater disinfection by combination of ultrasound and ultraviolet irradiation. **Journal of Hazardous Materials**. Itália, v. 168, p. 925-929, mar. 2009.

NATURALTEC. **Tratamento de água e efluentes - Desinfecção Ultravioleta**. 2014. Disponível em: < <http://www.naturaltec.com.br/Desinfeccao-Ultravioleta.html> >. Acesso em: 12/08/2014.

NORMANDO, D.; TJÄDERHANE, L.; QUINTÃO, C. C. A. A escolha do teste estatístico – um tutorial em forma de apresentação em PowerPoint. **Dental Press Journal of Orthodontics**, v. 15, nº 1, p. 101-106, Jan./Fev. 2010.

OLIVEIRA, A. F. G. Testes estatísticos para comparação de médias. **Revista Eletrônica Nutritime**, v.5, nº6, p.777-788, Nov./Dez. 2008.

PASSANTINO, L.; MALLEY JR. J.; KNUDSON, M.; WARD, R.; KIN, J. Effect of low turbidity and algae on UV disinfection performance. **Journal of the American Water Works Association**. Nova York, v. 40, p. 3-22, 2004.

QUEK, P. H.; HU, J. Indicators for photoreactivation and dark repair studies following ultraviolet disinfection. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**. Singapura, v. 35, p. 533-541, jan. 2008a.

QUEK, P. H.; HU, J. Influence of photoreactivating light intensity and incubation temperature on photoreactivation of *Escherichia coli* following LP and MP UV disinfection. **Journal of Applied Microbiology**. Singapura, v. 105, p. 124-133, 2008b.

RODRIGUEZ, R. A.; BOUNTY, S.; BECK, S.; CHAN, C. Photoreactivation of bacteriophages after UV disinfection: role of genome structure and impacts of UV source. **Water Research**. EUA, v. 55, p. 143-149, fev. 2014.

RYER, A. **Light Measurement Handbook**. EUA: International Light, Inc. 1997, 64 p.

SANTANA, D. G.; RANAL, M. A. Análise estatística na germinação. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.12, p. 205-237, 2000.

SANZ, E. N.; DÁVILA, I. S.; BALAO, J. A. A.; ALONSO, J. M. Q. Modelling of reactivation after UV disinfection: Effect of UV-C dose on subsequent photoreactivation and dark repair. **Water Research**. Espanha, v. 41, n. 14, p. 3141-3151, mai. 2007.

SEVERIN, B. F.; ROESSLER, P. F. Resolving UV photometer outputs with modeled intensity profiles. **Water Research**. EUA, v. 32, n. 5, p. 1718-1724, 1998.

SHANG, C. Repression of photoreactivation and dark repair of coliform bacteria by TiO<sub>2</sub>-modified UV-C disinfection. **Catalysis B: Environmental**. Hong Kong, v. 89, p. 536-542, Fev. 2009.

SILVA, J. C. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; VON SPERLING, M.; ALVES, C. V. P.; ZERBINI, A. M.; GODINHO, V. M.; LAUFFER, J. **Desenvolvimento e avaliação de um fotorreator simplificado de radiação UV para inativação de coliformes e ovos de helmintos em esgotos tratados**. In: Cherchinaro (Org.). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbicos. v. 2. Belo Horizonte, PROSAB, p. 229-240, 2001.

SPELLMAN, F. R. **Spellman's standard handbook for wastewater operators**. 2 ed. Nova York: Taylor e Francis Group LLC, CRC Press. 2011. 1200 p.

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

SOUZA, J. B. **Desinfecção de águas com cor e turbidez elevadas: comparação técnica de processos alternativos ao cloro empregando radiação ultravioleta e ácido peracético**. 2000. 148 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SOUZA, J. B.; VIDAL, C. M. S.; CAVALLINI, G. S.; QUARTAROLI, L.; MARCON, L. R. C. Avaliação do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de esgoto sanitário. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 117-126, jul./dez. 2012.

TINÔCO, J. D. **Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica**. 2011, 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

TEMPLETON, M. R.; HOFMANN, R.; ANDREWS, R.C. UV inactivation of humic-coated bacteriophages MS2 and T4 in water. **Journal of Environmental Engineering Science**. Canadá, v.5, nov. 2006.

TOMINAGA, M. Y.; MIDIO, A. F. Exposição humana a trihalometanos presentes em água tratada. **Revista de Saúde Pública**. São Paulo, v. 33, n.4, p. 413-21, ago. 1999.

TOSA, K.; HIRATA, T. Photoreactivations of enterohemorrhagic *Escherichia coli* following UV disinfection. **Water Research**, v. 33, n. 2, p. 361-366, 1999.

USEPA. **Drinking Water Regulations and Health Advisories**. (EPA 822-B-96-002), October. 1996.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. 1 v. DESA. UFMG. 2005. 452 p.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Diarrhoeal disease**. Fact sheet N°330. Abr. 2013. Disponível em: < <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs330/en/> >. Acesso em: 08/08/2014.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Enterohaemorrhagic *Escherichia coli* (EHEC). Fact sheet N° 125. Dez. 2011. Disponível em: < <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs125/en/#> >. Acesso em: 08/08/2014.

WRIGHT, H. B.; CAIRNS, W. L. Ultraviolet light. **Trojan Technologies Inc**. Canadá, 1998.

ZAR, J. H. **Biostatistical analysis**. 4 ed. Nova Jersey: Prentice-Hall, Upper Saddle River. 1999.