UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANEAMENTO

JULIANA DELGADO TINÔCO

**Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do
processo e avaliação econômica**

VERSÃO CORRIGIDA
SÃO CARLOS/SP
2011

JULIANA DELGADO TINÔCO

**Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do
processo e avaliação econômica**

Tese apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Hidráulica e
Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Daniel
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Pereira de Brito

SÃO CARLOS/SP
2011

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

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

Tinôco, Juliana Delgado.

T591d

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do
desempenho do processo e avaliação econômica. /Juliana
Delgado Tinôco. orientador: Luiz Antonio Daniel. São
Carlos. co-orientador: Luiz Pereira de Brito, 2011.

Tese (Doutorado – Programa de Pós graduação em
Engenharia Hidráulica e Saneamento) – – Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2011.

1. Desinfecção. 2. Radiação ultravioleta. 3. Lagoas de
Estabilização. 4. Custos de implantação. 5. Manutenção.
6. Operação. I. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico e compartilho a alegria de concluir mais uma etapa importante na minha vida profissional a muitos que me incentivaram e me ajudaram, mas especialmente aos meus familiares que estiveram comigo a longas datas, são:

Aos meus dois amores, Marco Antonio Calazans Duarte e Mateo Delgado Tinôco Calazans Duarte, agradeço a Deus pelo encontro de nossas vidas;

Meu avô e segundo pai de coração, Murilo Delgado. A saudade de sua ausência é enorme, mas as lembranças presentes recordam os diversos momentos afetuosos e de participação constante em minha vida;

Minha avó, Ruth Delgado, que sempre se orgulha a cada passo vitoriosa em minha vida;

Meus Pais, Fred Ferreira Tinôco e Rosa Elisabeth Delgado Tinôco. A meu pai, agradeço pelas lições de ética e cidadania, acredito que Deus nos dará (como tem demonstrado) a oportunidade de dividirmos ainda grandes alegrias, tenho esperança de recuperação de sua saúde. A minha mãe, exemplo de luta e perseverança, agradeço por ter compartilhado do meu ideal, incentivando-me sempre.

A minha tia Cláudia e sua família Geraldo e Pedro Henrique, pela ajuda de sempre.

A minha irmã e grande amiga Patrícia, pelas alegrias e superações divididas. Aos meus sobrinhos Giovana e Guiga, pela família que somos.

AGRADECIMENTOS

Para concretização desta tese contei com a cooperação efetiva de diversas instituições, parceiros, amigos e familiares, a todos eles registro minha gratidão.

À Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, pela ótima oportunidade de realização do doutorado nesta instituição e aos professores da Pós- Graduação em Hidráulica e Saneamento que muito me ensinaram através de suas aulas e relatos de suas experiências.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela disponibilização de estrutura física e operacional para realização de análises e ensaios, através do Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental- LARHISA, Laboratório Central de Análise do Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural- NEPGN e Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais. Estendo meus agradecimentos aos professores Dr. Manoel Lucas Filho, Dr. Arthur Mattos e Dr. Djalma Ribeiro da Silva.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte- IFRN, especialmente em nome de Douglasnilson de Moraes Ferreira, Técnico do Laboratório do Núcleo de Análises de Águas, Alimentos e Efluentes

A Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte, em nome do então Diretor Presidente Clovis Veloso Freire, pelo aporte financeiro para finalização da unidade piloto de tratamento da ETE Ponta Negra, ao Engenheiro Cristalino Fernandes pela ajuda na operação inicial da unidade experimental de tratamento de esgoto e a bióloga Fátima Bezerra pela disponibilidade em ajudar-me no entendimento de alguns ensaios microbiológicos.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq, pela concessão de bolsa de doutorado (Proc. nº 8703401997-2).

Ao meu orientador, Professor Dr. Luiz Antonio Daniel, por ter acreditado na proposta desta pesquisa, pela sua disponibilidade irrestrita, sua forma construtiva de argüir as idéias por mim apresentadas, acredito que deram foco a este trabalho, facilitando o alcance de seus objetivos. Considero-o um grande mestre e exemplo da academia.

Ao meu co-orientador e amigo, Professor Dr. Luiz Pereira de Brito, pelo constante incentivo, confiança e apoio na minha vida profissional, pela prontidão em ajudar-me sempre, desde o início de minha carreira acadêmica quando orientou minha

pesquisa de mestrado. Quero expressar a minha imensa gratidão e admiração por ter compartilhado de sua sabedoria.

Ao Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte-IFRN, Dr. André Luis Calado Araújo, pela disponibilidade em escutar-me e argüir com sugestões.

Aos funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos-EESC - Universidade de São Paulo-USP, especialmente a Pavlona Bueno (Pavi) e Maria Auxiliadora (Sá), pela presteza nos trâmites regimentais inerentes à Pós-Graduação e pela solicitude de sempre.

Ao amigo e Técnico do Laboratório de Análises Físico-Químicas e Microbiológicas-LABFQM do LARHISA-UFRN, Sandro Araújo da Silva, pela prontidão a toda e qualquer solicitação de ajuda.

A Profa. Dra. Lília Maria Soares Marmorato, proprietária do Centro Cultural Brasil Estados Unidos-CCBEU, São Carlos, pela paciência e delicadeza ao incentivar-me e preparar-me para realização da prova de proficiência em inglês, Test of English as a Foreign Language- TOEFL

As bolsistas de Iniciação Científica, Fabíola da Costa Catombé Dantas, Kionara Sarabella Turíbio e Silva, Juliana Rangel Oliveira Pimentel, Kamila Silva Pereira e Vanessa Pinheiro da Silva que me acompanharam durante parte da etapa experimental da pesquisa, agradeço pela participação nas atividades de coleta e ensaios laboratoriais.

Ao Sr. Francisco de Assis Pinheiro Lima, por ter me acompanhado nas coletas com um sorriso sempre no rosto e pela solidariedade de sempre;

As amigas Sayonara de Medeiros, Andressa Dantas e Araceli Ratis, pela paciência de escutar-me sobre a pesquisa e pela disponibilidade voluntária em ajudar-me.

Ao engenheiro eletricista da CAERN, Felipe Ferreira de Oliveira, pela elaboração dos projetos elétricos das unidades de desinfecção UV.

“A beleza de ser um eterno aprendiz”(Gonzaguinha)

RESUMO

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

Este trabalho teve como objetivo o estudo de desempenho e a avaliação de custos econômicos do processo de desinfecção por radiação UV para efluente de lagoas de estabilização facultativas pós- tratado em alagado construído e para outros efluentes com características similares. O trabalho experimental consistiu de ensaios de desinfecção utilizando reator de desinfecção por radiação UV em batelada. Na pesquisa foram avaliadas as principais variáveis que interferem no rendimento e nos custos dos processos, de forma a adequar o par CT (concentração de desinfetante e tempo de contato) atendendo ao padrão ambiental microbiológico de 1.000 coliformes termotolerantes/100 mL, definido para corpos aquáticos enquadrados na classe 2 estabelecida pela Resolução 357/2005 CONAMA, uma vez que a maioria dos corpos receptores do Brasil estão enquadrados nessa classe. A avaliação econômica definiu custos unitários de implantação e de operação e manutenção do processo de desinfecção UV para um período de 20 anos, considerando valores pontuais e anuais de forma a se verificar o custo total a valor presente. Os dados obtidos indicaram que o efluente final das unidades de tratamento avaliadas apresentaram valores de turbidez, absorvância a 254 nm e ferro total superiores aos usuais recomendados para desinfecção UV, no entanto, não comprometendo a desinfecção. Por outro lado, a concentração de SS foi baixa e com diâmetro de partículas de pequenas dimensões. As várias combinações testadas (doses x altura de lâmina líquida-ALL) sugerem, para atendimento ao padrão microbiológico, doses de 8 Wh/m³ e ALL de 6 cm. A concentração remanescente dos indicadores microbiológicos testados mostrou ordem decrescente de inativação de *Clostridium perfringens* para coliformes totais e *Escherichia coli*. A análise da fotorreativação e da ausência de luz no recrescimento dos microrganismos indicadores (coliformes totais e *Escherichia coli*) foi mais perceptível na ausência de luz. Os custos de implantação das unidades de desinfecção UV projetadas nesta pesquisa foram significativamente menores que os dos modelos industriais comparados. Os custos de operação e manutenção para a desinfecção com radiação UV também foram baixos e equivalem a outros desinfetantes. Os custos médios globais obtidos variam de 14,3 a 20,5 R\$/habitante, para garantir a desinfecção do esgoto por radiação UV durante 20 anos.

Palavras chave: desinfecção, radiação ultravioleta, lagoas de estabilização, custos operacionais e de implantação.

ABSTRACT

Tinoco, J. D. **Ultraviolet radiation disinfection: study of process performance and economic evaluation**. 2011. 222 f. Thesis (Doctoral) Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

This work studied UV disinfection process performance and economic costs for facultative stabilization ponds effluent pos treated in constructed wetland and another effluents with similar characteristic. The experimental work consisted of batch disinfection tests using UV reactor, evaluating variables that may affect performance and process costs in order to adjust CT (disinfectant concentration and contact time) according to microbiological environmental standard of 1000/100 mL, set for class 2 water bodies established by 357/2005 CONAMA Resolution. Economic evaluation defined unit costs of deployment and operation and maintenance of the UV disinfection process for 20 years, considering point estimates and annual reports, in order to check total cost to present value. The final effluent from treatment units evaluated had values of turbidity, 254 nm absorbance and total iron above usual recommended for UV disinfection, however, not compromising disinfection process. On the other hand, SS concentration was low and particle size was of small diameter. Various combinations of dose x water height tested suggest, to attend microbiological standards, doses 8 wh/m³ and 6 cm water height. The remaining concentration of microbiological indicators showed descending order of inactivation from *Clostridium perfringens* to total coliforms and *Escherichia coli*. Photoreactivation and light absence regrowth of total coliforms and *Esheria coli* was more noticeable in darkness. Building costs of UV disinfection units designed were significantly lower than those of industrial models compared. Operation and maintenance costs for UV radiation disinfection were also low and equivalent with other disinfectants. Average total costs obtained vary from R\$ 14.3 to R\$ 20.5/capita, to ensure UV radiation disinfection life time of 20 years.

Keywords: disinfection, ultraviolet radiation, stabilization ponds, deployment and operational costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1– Espectro eletromagnético com destaque para as faixas de UV, em comprimento de onda (nm)	32
Figura 3. 2 - Efeito da radiação UV sobre a cadeia de DNA da bactéria, dimerizando a timina com rompimento dos encaixes dos filamentos do DNA.	47
Figura 4. 1– Esquema gráfico da planta baixa da ETE Ponta Negra, Natal/RN	73
Figura 4. 2– Vista aérea fotográfica da ETE Ponta Negra, Natal/RN	74
Figura 4. 3a – Planta baixa e corte do alagado construído	76
Figura 4. 4 – Alagado construído na fase do nivelamento da brita	78
Figura 4. 5 – Detalhe da distribuição da vazão afluente no alagado construído	79
Figura 4. 6 – Medidor de vazão tipo vertedor triangular utilizado para ajuste da vazão afluente no alagado construído	79
Figura 4. 7 – Detalhe do medidor tipo vertedor triangular com vazão regularizada	80
Figura 4. 8 – Alagado construído com cobertura vegetal	80
Figura 4. 9- Fluxograma de localização da ETE Ponta Negra e da unidade experimental de tratamento composto por um alagado construído de fluxo sub-superficial.	81
Figura 4. 10- Ilustração da selagem com vaselina dos tubos de amostras para análise de <i>Clostridium Perfringens</i>	85
Figura 4. 11– Esquema gráfico do reator de desinfecção UV	87
Figura 4. 12– Reator UV de bancada e adaptadores	88
Figura 4. 13– Ilustração do procedimento utilizado para análise da fotorreativação de CT e <i>E.coli</i> após desinfecção de esgoto com radiação UV	91
Figura 4. 14- Ilustração do procedimento utilizado para análise da recuperação no escuro de coliformes totais e <i>E.coli</i> após desinfecção de esgoto com radiação UV	92
Figura 4. 15 - Posição das lâmpadas no reator	95
Figura 5. 1 – Temperaturas -valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	107
Figura 5. 2– pH- valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	108
Figura 5. 3– Turbidez-valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	109
Figura 5. 4– SST-valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	110
Figura 5. 5–Condutividade elétrica CE - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	111
Figura 5. 6– OD - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	112
Figura 5. 7– DQO - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	114
Figura 5. 8– COT-valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	115

Figura 5. 9– Absorvância - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	116
Figura 5. 10– Ferro total - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	118
Figura 5. 11– Nitrogênio orgânico - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	119
Figura 5. 12– Amônia - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	120
Figura 5. 13– Nitrato - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	120
Figura 5. 14– Fósforo total - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	122
Figura 5. 15– Coliformes totais - valores mínimos, mediano, percentis e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	123
Figura 5. 16– <i>Escherichia Coli</i> - valores mínimos, mediano, percentis e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	124
Figura 5. 17– <i>Clostridium Perfringens</i> - valores mínimos, mediano, percentis e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído	124
Figura 5. 18– Taxa de formação de Fe^{2+} para diferentes intensidades de radiação UV	126
Figura 5. 19-Doses de radiações UV (mWs/cm^2) em função do tempo de exposição e do número de lâmpadas ligadas.	128
Figura 5. 20–Doses de radiações UV recebidas em diferentes alturas de lâminas líquidas - ensaios de desinfecção	138
Figura 5. 21-Doses de radiações UV recebidas em diferentes alturas de lâminas líquidas - ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 – Doses de radiação UV (mWs/cm ²) em função da espécie do microrganismos e log de inativação (continua)	39
Tabela 3. 2– Doses requeridas de radiação UV para inativação de vírus (enterovírus e adenovírus 2)	42
Tabela 3. 3– Doses de radiação requeridas (mWs/cm ²) para inativação de colifagos MS-2 para duas amostras de águas diferenciadas em função da concentração elevada de ferro da ETA ₂	43
Tabela 3. 4– Características das lâmpadas UV-C.....	50
Tabela 3. 5– Comparação das principais características da desinfecção com cloro e seus derivados, cloraminas e radiação UV.....	52
Tabela 3. 6– Custos de implantação e de operação para processos de desinfecção	68
Tabela 3. 7 – Estimativa média de custos de desinfecção por radiação UV	69
Tabela 3. 8– Custos per-capitas e globais do sistema integrado biológico (UASB + FBP) e de desinfecção UV	70
Tabela 4. 1- Características físicas e operacionais das lagoas de estabilização da ETE Ponta Negra, Natal/RN.	74
Tabela 4. 2 - Variáveis analisadas e metodologias analíticas utilizadas	84
Tabela 4. 3– Planejamento experimental dos ensaios de desinfecção por radiação ultravioleta.	90
Tabela 4. 4 – Planejamento experimental para ensaio de determinação da intensidade de radiação UV por actinometria.....	95
Tabela 5. 1 – Resultados da caracterização físico-química e microbiológica dos efluentes da lagoa facultativa e alagado construído.....	105
Tabela 5. 2 – Doses de radiação UV, Intensidades de radiação UV e taxa de formação de Fe ²⁺	127
Tabela 5. 3– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 2 cm.....	132
Tabela 5. 4– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 4 cm.....	133
Tabela 5. 5– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 6 cm.....	134
Tabela 5. 6– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 8 cm.....	135
Tabela 5. 7– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 10 cm.....	136
Tabela 5. 8– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos expostos a radiação UV.....	137
Tabela 5. 9–Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, <i>E. coli</i> e <i>C. perfringens</i> para ensaios com lâmina líquida de 2 cm.	144
Tabela 5. 10– Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, <i>E. coli</i> e <i>C. perfringens</i> para ensaios com lâmina líquida de 4 cm.	147

Tabela 5. 11– Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, <i>E. coli</i> e <i>C. perfringens</i> para ensaios com lâmina líquida de 6 cm.	150
Tabela 5. 12– Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, <i>E. coli</i> e <i>C. perfringens</i> para ensaios com lâmina líquida de 8 cm.	153
Tabela 5. 13– Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, <i>E. coli</i> e <i>C. perfringens</i> para ensaios com lâmina líquida de 10 cm.	156
Tabela 5. 14– Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 2 cm de altura de lâmina líquida.....	160
Tabela 5. 15– Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 4 cm de altura de lâmina líquida.....	161
Tabela 5. 16– Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 6 cm de altura de lâmina líquida.....	162
Tabela 5. 17 – Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 8 cm de altura de lâmina líquida.....	163
Tabela 5. 18 – Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 10 cm de altura de lâmina líquida.....	164
Tabela 5. 19– Custos de implantação de unidades de desinfecção UV com capacidades de tratamento de 30, 60 e 120 m ³ /h, para populações de 5.000, 10.000 e 20.000 habitantes respectivamente.....	166
Tabela 5. 20 - Custos médios de módulos de unidades de desinfecção UV, incluindo projeto, suporte e lâmpadas UV da indústria A	169
Tabela 5. 21- Custos médios para aquisição de unidades de desinfecção UV e para reposição de lâmpadas UV da indústria B	171
Tabela 5. 22– Consumo de energia elétrica (kW/ano) aplicando-se doses volumétricas de 8, 16, 24, 32 e 40 Wh/m ³	174
Tabela 5. 23– Custos anuais com energia elétrica para funcionamento contínuo de reator de desinfecção UV em diferentes regiões do Brasil e no estado do RN com aplicações diferenciadas de doses volumétricas (Dav) e de vazões.....	176
Tabela 5. 24–Custos médios com energia elétrica em R\$/m ³ e R\$/hab/ano para desinfecção de esgotos adotando-se vazões de 30, 60 e 120 m ³ /ano	178
Tabela 5. 25– Equações matemáticas para estimativa do custo de energia elétrica com a utilização de desinfecção de esgoto doméstico com radiação ultravioleta em diferentes regiões do Brasil e o estado do RN em função da dose volumétrica de radiação aplicada.	180
Tabela 5. 26– Custos médios da desinfecção UV de esgoto, em R\$/m ³ e R\$/hab/ano, com operação e manutenção em diferentes regiões do Brasil e no estado do RN adotando-se vazões de 30, 60 e 120 m ³ /ano	182

Tabela 5. 27 – Custos totais anuais da desinfecção UV para unidade de tratamento com capacidade de tratamento de 30 m ³ /h.....	185
Tabela 5. 28– Custos totais anuais da desinfecção UV para unidade de tratamento com capacidade de tratamento de 60 m ³ /h.....	185
Tabela 5. 29 – Custos totais anuais da desinfecção UV para unidade de tratamento com capacidade de tratamento de 120 m ³ /h.....	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALL	Alturas de lâminas líquidas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APHA	American Public Health Association
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
CCBEU	Centro Cultural Brasil Estados Unidos
C _{EE}	Custo com energia elétrica
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
CO	Centroeste
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COND	Condutividade elétrica
COT	Carbono orgânico total
CT	Coliformes totais
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DN	Diâmetro nominal
DNA	Ácido desoxirribonucleico
DQO	Demanda química de oxigênio
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
FAD	Flotação por ar dissolvido
FAN	Filtro anaeróbio
FB	Filtro biológico
FBP	Filtro biológico percolador
HAAS	Ácidos haloacéticos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços
IDEMA	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do RN
IFRN	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN

IWGI	International Water Guard Industries
LABFQM	Laboratório de Análises Físico-Químicas e Microbiológicas
LARHISA	Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
N	Norte
NE	Nordeste
NEPGN	Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural
NMP	Número mais provável
O & M	Operação e Manutenção
OD	Oxigênio dissolvido
PIS	Programa de Interação Social
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
PT	Fósforo Total
PVC	Poli cloreto de vinila
RN	Rio Grande do Norte
RNA	Ácido ribonucleico
S	Sul
SD	Desvio padrão
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SE	Sudeste
SINAPI	Sistema Nacioanal de Pesquisa e Custos e Índices da Construção Civil
SST	Sólidos suspensos totais
ST	Sólidos Totais
TART	Taxa acumulada de reajuste tarifária da energia elétrica
TDH	Tempo de detenção hidráulica
TFF-Fe ²⁺	Taxa de formação de ferro dissolvido
THMS	Trihalometanos
TOEFL	Test of English as a Foreign Language
TUR	Turbidez
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket
UE	Unidade experimental
UFC	Unidade formadora de colônia
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

USP	Universidade de São Paulo
UV	Radiação ultravioleta
UV-A	Radiação ultravioleta do tipo A
UV-B	Radiação ultravioleta do tipo B
UV-C	Radiação ultravioleta do tipo C
UV-V	Radiação ultravioleta a vácuo
VPL	Valor presente líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

Abs	Absorvância
$C_{12}H_8N_2H_2O$	Fenantrolina
$Ca(OCl)_2$	Hipoclorito de cálcio
Cl_2	Cloro gasoso
cm	Centímetro
cm^2	Centímetro quadrado
cm^3	Centímetro cúbico
D_r	Dose recebida
D_{av}	Dose aplicada volumétrica
$FeCl_3$	Cloreto férrico
Fe^{2+}	Ferro II
Fe^{3+}	Ferro III (não dissolvido)
$FeSO_4$	Sulfato ferroso
g	Gramas
h	Hora
H_2O	Água
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
hab	Habitante
J	Joule
Js	Joule-segundo
$K_2C_2O_4$	Oxalato de potássio
$K_3Fe(C_2O_4)_3$	Tris(<i>oxalato</i>) ferrato(<i>III</i>) de potássio
KCl	Cloreto de potássio
KW	Quilowatt
KWh	Quilowatt hora
L	Litros
Log	Unidade logarítmica
m	Metros
m^2	Metro quadrado
m^3	metro cúbico
mA	Miliampere

Máx	Máximo
mF	Milifarad
Min	Mínimo
min	Minuto
mJ	Milijoule
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mmHg	Milímetro de mercúrio
mol	Mol
mW	Miliwatt
mWs	Miliwatt-segundo
N	Normalidade
NaOCl	Hipoclorito de sódio
NH ₃	Nitrogênio amoniacal
nm	Nanômetros
NO ₃	Nitrato
O ₂	Oxigênio
°C	Grau Celsius
pH	Potencial hidrogenionico
Q	Vazão
R\$	Real (unidade monetária brasileira)
s	Segundos
T	Tempo de exposição a radiação UV
T	Temperatura
t ₀	Tempo de contato
US\$	Dólar (unidade monetária americana)
uT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
V	Volt
V	Volume útil
W	Watt
Wh	Watt hora
Ws	Watt segundo
μm	Micrometro

μS	MicroSiemns
%	Percentual
α	Coeficiente de absorvância do meio líquido
λ	Comprimento de onda

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	27
2.0	OBJETIVOS	30
3.0	REVISÃO DA LITERATURA	31
3.1	Aspectos teóricos sobre a natureza da luz	31
3.2	Definição da luz ultravioleta e princípios básicos da radiação UV	32
3.3	Histórico: utilização da radiação ultravioleta na desinfecção de água e esgoto	44
3.4	Desinfecção por radiação UV: mecanismo de atuação e componentes do sistema de desinfecção	47
3.5	Fatores intervenientes no processo de desinfecção por radiação UV: aspectos positivos e negativos	51
3.6	Cinética da desinfecção e hidrodinâmica dos reatores	57
3.7	Cinética da desinfecção por radiação ultravioleta	62
3.8	Aspectos econômicos da desinfecção de efluentes	65
4.0	MATERIAL E MÉTODOS	71
4.1	Etapas dos experimentos	71
4.2	Primeira etapa: ensaios de caracterização dos efluentes	72
4.2.1	Descrição das unidades de tratamento de esgoto	72
4.2.2	Seleção dos pontos de coleta	81
4.2.3	Metodologia de coleta e preservação das amostras	82
4.2.4	Período e frequência de coletas	82
4.2.5	Variáveis analisadas e métodos utilizados	83
4.3	Segunda etapa: ensaios de desinfecção UV, de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos após exposição à radiação UV	85
4.3.1	Unidade experimental de desinfecção UV	86
4.3.2	Protocolo dos ensaios de desinfecção	88
4.3.3	Fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismo após exposição à radiação UV	90
4.4	Terceira etapa: medição da intensidade de radiação das lâmpadas UV em comprimento de onda a 254 nm por actinometria e determinação da doses reais de radiação UV	92
4.4.1	Medição de intensidade de radiação de lâmpadas UV a 254 nm por actinometria	92
4.4.2	Determinação das Doses reais de radiação UV	98
4.5	Análise econômica do processo de desinfecção UV	99
4.5.1	Projetos de unidades de desinfecção	102
4.6	Análise estatística dos dados experimentais	103

5.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
5.1	Caracterização dos efluentes utilizados na pesquisa.....	104
5.1.1	Temperatura	106
5.1.2	pH.....	107
5.1.3	Turbidez.....	108
5.1.4	Sólidos totais e sólidos suspensos totais (STe SST).....	109
5.1.5	Condutividade elétrica	110
5.1.6	Oxigênio dissolvido (OD)	111
5.1.7	Demanda química de oxigênio (DQO).....	113
5.1.8	Carbono orgânico total (COT).....	114
5.1.9	Absorvância em comprimento de onda de 254 nm.....	115
5.1.10	Ferro Total.....	117
5.1.11	Nitrogênio orgânico, amônia e nitrato.....	118
5.1.12	Fósforo total	121
5.1.13	Microorganismos indicadores.....	122
5.2	Ensaio de medição da intensidade de radiação UV a 254 nm	125
5.3	Quantificações das doses reais de radiação UV	130
5.4	Ensaio de desinfecção	142
5.4.1	Ensaio com altura de lâmina líquida de 2 cm	143
5.4.2	Ensaio com altura de lâmina líquida de 4 cm	146
5.4.3	Ensaio com altura de lâmina líquida de 6 cm	149
5.4.4	Ensaio com altura de lâmina líquida de 8 cm	152
5.4.5	Ensaio com altura de lâmina líquida de 10 cm.....	155
5.5	Ensaio de fotorreativação e recuperação no escuro dos indicadores coliformes totais e <i>Escherichia coli</i>	158
5.6	Custos da desinfecção	166
6.0	CONCLUSÕES	187
7.0	RECOMENDAÇÕES	191
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192
	APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS UNIDADES DE DESINFECÇÃO UV	203
	APÊNDICE B –PLANTAS DAS UNIDADES DE DESINFECÇÃO UV (módulos e canais de desinfecção).....	205

1.0 INTRODUÇÃO

No Brasil, diversas estações de tratamento de esgotos (ETE) utilizam sistemas de lagoas de estabilização como processo de tratamento, mais especificamente as do tipo facultativas, que ultrapassam 22% do total de sistemas de tratamentos existentes no Brasil, segundo dados do IBGE (2008). Porém, as baixas eficiências verificadas na remoção de organismos patogênicos (1 ou 2 log) levam esses sistemas a produzir efluentes com concentrações de coliformes termotolerantes da ordem de 10^7 NMP/100 mL ou 10^6 NMP/100 mL, o que é insuficiente do ponto de vista sanitário para lançamento do efluente em corpos aquáticos. No Rio Grande do Norte, cerca de 90% das 78 estações de tratamento de esgoto atualmente implantadas em 51 municípios são constituídas por lagoas de estabilização e deste total, cerca de 15% (12 ETE) têm como configuração o sistema de lagoas facultativas do tipo primária (SILVA FILHO et al., 2006).

Se de um lado a legislação ambiental brasileira não faz referência quanto ao padrão de qualidade de emissão para coliformes termotolerantes e outros organismos indicadores de patogênicos, por outro, os projetos de estações de tratamento de efluentes domésticos e industriais devem levar em consideração a baixa capacidade de diluição de muitos corpos aquáticos. Na região Nordeste do Brasil, a maioria dos rios são intermitentes, sendo comum sua “perenização” pelo lançamento de efluentes líquidos, que nesta situação devem atender aos limites qualitativos para a respectiva classe de enquadramento do corpo aquático. No Brasil, pela inexistência de estudos ambientais para avaliação da capacidade suporte, os corpos receptores foram enquadrados na classe 2 mediante decretos dos governos estaduais ou por imposição da própria legislação federal (RESOLUÇÃO N°357/CONAMA, 2005).

No Rio Grande do Norte, a água possui importância relevante para o desenvolvimento econômico e social, dada a condição de semi-aridez de aproximadamente 75% do seu território (IDEMA, 2005). A gestão integrada e ambientalmente sustentável de recursos hídricos fundamenta-se em diretrizes gerais que prevêm entre outras, a maximização dos benefícios econômicos e sociais, resultantes do aproveitamento múltiplo e integrado dos recursos

hídricos; a proteção das bacias hidrográficas contra ações que possam comprometer seu uso atual e futuro; o desenvolvimento de programas permanentes de conservação e proteção das águas contra a poluição e a exploração excessiva ou não controlada e a articulação intergovernamental nos níveis federal e municipal e entre Estados vizinhos, visando à compatibilidade de planos de uso e preservação dos recursos hídricos. A prática do tratamento de efluentes sanitários e em particular a desinfecção por radiação ultravioleta, insere-se nestas diretrizes, uma vez que permite seu descarte de forma ambientalmente segura, além de propiciar, em relação ao padrão para coliformes, condições de reúso para fins urbanos e agrícola.

Na maioria das estações de tratamento de esgotos brasileiros são raras as instalações destinadas ao processo de desinfecção e, quando estas existem, comumente se utiliza a cloração. A utilização do cloro como desinfetante remonta ao início do século XX e o cloro é ainda o desinfetante químico mais empregado na atualidade, correspondendo a cerca de 80% das instalações em termos mundiais (LAPOLLI et al., 2003), pois seu elevado poder biocida, assegura uma elevada e rápida redução de agentes patogênicos na água ou no esgoto.

Entretanto, em 1974, a segurança quanto ao uso do cloro foi questionada quando se observou a formação de trihalometanos, compostos organoclorados que podem causar riscos à saúde pública (potencialmente carcinogênicos), verificada quando o cloro livre está presente e a água contém precursores, normalmente as substâncias húmicas (BAIRD, 2001). Os trihalometanos representam 30% dos possíveis subprodutos gerados pelas reações de substituição, adição e de oxidação entre alguns desinfetantes a base de cloro e as chamadas substâncias precursoras, entre elas, substâncias húmicas. (AWWA, 1964; TOMINAGA E MIDIO, 1999).

A aplicação da desinfecção por radiação UV para águas residuárias vem se consolidando ao longo do tempo, principalmente em consequência do impacto dos compostos orgânicos clorados de efluentes de esgotos em águas receptoras. Pode-se exemplificar o caso da estação de tratamento de esgotos de Waldwick em New Jersey-EUA. Em 1989, o Departamento de Proteção Ambiental de New-Jersey proibiu em forma de Lei – “Lei de prevenção de

1 Introdução

catástrofes tóxicas” –, o lançamento de efluentes contendo teor de cloro residual, nos corpos receptores. O sistema por radiação UV atingiu eficiências superiores ao sistema anterior por cloração, com concentração máxima de coliformes termotolerantes de 200NMP/100 mL (EPA,2002).

Além dos trihalometanos, existem ainda outros subprodutos da desinfecção com cloro, como ácidos haloacéticos, fenóis clorados e outros aromáticos clorados. Em relação às águas residuárias, alguns desses subprodutos podem ser bioacumulados nas cadeias tróficas, quando essas são lançadas em corpos aquáticos. Além disso, o cloro não é um oxidante suficientemente eficaz na eliminação de organismos mais resistentes, como os vírus.

O impacto ambiental do lançamento de efluentes contendo cloro livre ou combinado resultante da desinfecção com esse agente tem sido controlado por padrões ambientais. A legislação ambiental brasileira não permite a presença de cloro livre e combinado em concentrações superiores a 0,01 mg/L nos corpos de água doce de classe 2 (RESOLUÇÃO N° 357/CONAMA, 2005). Nos Estados Unidos 47% dos sistemas de tratamento de efluentes praticam a descloração com compostos químicos (AISSE et al., 2003), o que também contribui para a elevação de custos operacionais.

A utilização da radiação ultravioleta pode ser uma alternativa à cloração, devido, sobretudo, a não geração de subprodutos tóxicos e, por conseguinte, não gerar residuais prejudiciais à saúde. Além do mais, é um método efetivo na inativação de bactérias, vírus e protozoários, apresenta facilidade de operação e segurança, e exige baixo tempo de contato, o que possibilita o uso de unidades compactas.

No entanto, a desinfecção de esgoto por radiação UV é considerada aparentemente, uma técnica de custo elevado, e em consequência, sua utilização ainda tem sido pouco utilizada. O diferencial do tema de investigação estudado na presente pesquisa é a possibilidade de se elavancar o uso da desinfecção de esgoto com radiação UV como alternativa economicamente viável, com desenvolvimento de equipamentos mais baratos, desmistificando o entrave para utilização da tecnologia.

2.0 OBJETIVOS

GERAL

Estudar o desempenho e avaliar os custos econômicos do processo de desinfecção por radiação ultravioleta de esgotos domésticos tratados.

ESPECÍFICOS

- Verificar a eficiência do processo de desinfecção por radiação ultravioleta, avaliando o comportamento das principais características dos afluentes que interferem no rendimento, especificamente sólidos totais (suspensos e dissolvidos), diâmetro da partícula, turbidez e ferro total;
- Analisar variáveis e parâmetros de projeto para a desinfecção de esgoto sanitário por radiação ultravioleta, quando aplicados em efluentes de lagoas facultativas pós- tratados em alagado construído ou em outros efluentes com características similares: concentração de microrganismos, dose requerida (consumo de energia), tempo de contato e altura da lâmina líquida;
- Avaliar os custos de implantação, operação e de manutenção do processo de desinfecção por radiação ultravioleta de efluente de lagoas facultativas pós- tratados em alagado construído ou em outros efluentes com características similares, para três populações de referência;
- Avaliar a resistência de microrganismos indicadores (*Clostridium perfringens*, coliformes totais e *Escherichia coli*) à pós-desinfecção com emprego de radiação ultravioleta;
- Avaliar a possibilidade de fotorreativação e recuperação dos coliformes totais e da *Escherichia coli* após exposição à radiação ultravioleta.

3.0 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aspectos teóricos sobre a natureza da luz

Historicamente, a natureza da luz foi objeto de muita discussão. No período de 1665 a 1666 Isaac Newton formulou a teoria corpuscular da luz que explicava de forma satisfatória, para a época, a óptica geométrica (BARTHEM, 2005). Newton acreditava que um raio de luz era constituído de minúsculas partículas materiais emitidas pela fonte luminosa e que se propagava em linha reta (PIRES, 2008).

Christian Huyghens, em 1678, promoveu a teoria ondulatória para luz. Huyghens interpretava a luz em termos de ondas longitudinais, como o som, ao invés de ondas transversais, como as da superfície da água (BARTHEM, 2005).

As diferenças de conceitos levaram à análises consideráveis no século XIX. A teoria das ondas foi apoiada pelos conceitos de James Clerk Maxwell, que desenvolveu a teoria eletromagnética da luz, afirmando que a luz é composta de vetores de campos elétricos e magnéticos, ortogonais entre si e constantemente transversos à direção de propagação ondul (MASSCHELEIN, 2002).

Em 1900, Max Planck apresentou a teoria quântica. Trata-se de uma lei que descreve as propriedades dinâmicas das partículas subatômicas e as interações entre a matéria e a radiação. Segundo o cientista, a troca de energia entre corpos é dada através de emissões ou absorções de energias em pequenas unidades, chamadas quanta (PIZA, 2003). Sendo assim, a luz, bem como outras radiações eletromagnéticas, compreende um fluxo de fótons, cuja quantidade de energia é expressa, segundo Chang (1977), pela Equação 3.1.

$$E = \frac{h * C}{\lambda} \quad (3.1)$$

E: Energia associada a um determinado comprimento de onda – J,

h: constante de Planck – $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js,

C: velocidade da luz no vácuo – $3 \cdot 10^8$ m/s,

λ : comprimento de onda – m.

Ainda segundo Chang (1977), para que ocorra dissociação de uma molécula pela absorção de um fóton, é necessário que a energia do fóton exceda a energia de ligação.

3.2 Definição da luz ultravioleta e princípios básicos da radiação UV

No início do século XIX, Johannes Riteer descobriu a existência da radiação invisível, denominada de radiação ultravioleta (Laboratório de física atmosférica da Universidad Mayor de San Andrés, 2010). A radiação UV caracteriza-se como uma radiação eletromagnética com comprimento de onda menor que o da luz visível e maior que o dos raios X.

O espectro do UV é dividido em quatro faixas: UV-A, UV-B, UV-C e UV-V, os quais apresentam variações de comprimento de onda de 315 a 400 nm (UV- A), de 280 a 315 nm (UV-B), de 200 a 280 nm (UV-C) e de 100 a 200 nm (UV-V) (EPA, 1999a) (Figura 3. 1).

Figura 3. 1– Espectro eletromagnético com destaque para as faixas de UV, em comprimento de onda (nm)
Fonte: METCALF E EDDY (2003)

3 Revisão da Literatura

A ação germicida da radiação UV-A é desprezível, requerendo longos tempos de exposição para sua aplicabilidade na desinfecção. É também conhecida como luz negra, muito utilizada em fototerapia e em câmaras de bronzeamento. A radiação UV-B é a mais destrutiva forma de luz UV e está associada ao câncer de pele. A radiação UV-C é normalmente utilizada para a desinfecção de águas na emissão a 254 nm e, a radiação UV-V (vácuo) caracterizada como UV extrema ou de vácuo (DOMENECH; JARDIM; LITTER, 2001). Segundo a EPA (2006), os raios ultravioleta do vácuo são impraticáveis para aplicação de desinfecção de águas e esgoto, porque se dissipam rapidamente em meio líquido em pequenas distâncias.

A radiação UV artificial é gerada pela aplicação de uma tensão através de uma mistura de gases, resultando em uma descarga de fótons. Os comprimentos de onda específicos da luz emitida pela descarga de fótons dependem da composição química do gás e do nível de potência da lâmpada. Normalmente, as lâmpadas UV concebidas para o tratamento de águas e esgotos usam uma mistura de gás contendo vapor de mercúrio. Outros gases, como o gás xenônio, também emitem radiação na faixa germicida (EPA, 2006).

A radiação UV interage com os materiais componentes do reator e do líquido a ser tratado através dos processos de absorção, refração, reflexão e dispersão. A absorção é a transformação da radiação para outras formas de energia, quando ela atravessa uma substância e é variável com o comprimento de onda (λ) da luz (EPA, 2006).

A radiação UV não é propagada em um meio com intensidade constante e igual à que foi gerada na fonte. Utiliza-se o coeficiente de absorvância (α), calculado a partir da absorvância (Equação 3.2), para estimar a intensidade média e ou a intensidade em qualquer ponto do reator.

$$\alpha = A \cdot \ln(10) = 2,303 A \quad (3.2)$$

α :coeficiente de absorvância,

A :absorvância medida a 254 nm, trajetória de 1 cm.

Em aplicações de desinfecção com UV, a absorvância a 254nm é utilizada para medir a quantidade de luz passando através da água ou esgoto e atingindo os

microrganismos alvo. É quantificada por espectrofotometria, obtendo-se a absorvância por unidade de profundidade, geralmente a 1 cm.

Por sua vez, a refração pode ser definida como o fenômeno em que a luz é transmitida de um meio para outro com característica diferente. Nesta mudança, a frequência se mantém constante, embora sua velocidade de propagação e comprimento de onda apresente variações. A alteração de velocidade acarreta desvio da direção original. A segunda lei da refração, conhecida como lei de Snell, é utilizada para calcular o desvio dos raios de luz ao mudarem de meio.

A reflexão é a mudança na direção da propagação da luz por uma dada superfície de contato. Pode ser classificada como especular ou difusa. Reflexão especular ocorre a partir de superfícies lisas e polidas, ou ainda, quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Por outro lado, a reflexão difusa ocorre em superfícies ásperas e irradia radiação em todas as direções, com uma pequena dependência do ângulo de incidência. O tipo de reflexão e de intensidade da radiação refletida de uma superfície depende do material utilizado (EPA, 2006).

Segundo Daniel (1993), poucos materiais apresentam grande refletividade. O alumínio polido reflete em torno de 88% de radiação UV a 254 nm, seguido do óxido de magnésio, com valores entre 70 e 90%, cromo entre 40 e 45%, níquel com aproximadamente 40%, aço inoxidável entre 25 e 30%, óxido de zinco entre 5 e 10% (MASSCHELEIN, 2002), cobre com cerca de 10%, e espelho polido, com aproximadamente 7% (BLATCHLEY III¹, 1997 apud GONÇALVES, 2003).

Finalmente chama-se dispersão, a mudança na direção da propagação da luz causada pela interação com uma partícula. As partículas podem causar dispersão em todas as direções, inclusive para a fonte de luz incidente.

Além da absorvância, a transmitância também tem sido usada extensivamente na literatura para descrever o comportamento da luz UV, em termos quantitativos, expressando o percentual que passa através do material sobre uma distância específica. A transmitância é calculada segundo a Equação 3.3.

$$T = 100 \frac{I}{I_0} \quad (3.3)$$

¹ BLATCHLEY III, E.(1997). **Numerical modeling of UV intensity: application to collimated-beam reactors and continuous flow systems.** Water Research. V. 31. N. 9. P. 2205-2218.

3 Revisão da Literatura

T:transmitância medida a 254 nm, trajetória de 1 cm (%),

I:intensidade da luz transmitida na amostra (mW/cm²),

I₀:intensidade da luz incidente na amostra (mW/cm²).

A transmitância também pode ser calculada correlacionando-a à absorvância, tal que (Equação 3.4):

$$T = 100 \times 10^{-A} \quad (3.4)$$

A intensidade da radiação UV (I), expressa pela Equação 3.5, é uma variável fundamental na aplicação da desinfecção com ultravioleta e seu conceito deriva das propriedades ondulatórias da luz de James Clerk Maxwell, sendo definida como o somatório da energia incidentes em todas as direções em dado ponto no espaço. Comumente, utiliza-se como unidade de intensidade W/cm² ou W/m² (HALLIDAY E RESNICK, 1978).²

$$I = I_0 \cdot e^{(-\alpha L)} \quad (3.5)$$

A intensidade média de radiação UV incidente em uma partícula por um dado tempo de exposição é quantificada segundo a Lei de Beer-Lambert:

$$I_m = \frac{1}{t} \int_0^t I \cdot dt \quad (3.6)$$

Ou

$$I_m = \frac{I_0}{\alpha \cdot L} [1 - e^{(-\alpha L)}] \quad (3.7)$$

I_m: intensidade média de radiação UV na lâmina líquida de espessura L (mW/cm²),

L: espessura da lâmina líquida (cm),

α: coeficiente de extinção (cm⁻¹), sendo: α = 2,303.A.

A intensidade de radiação UV pode ser quantificada, entre outros, por actinometria química, radiometria, bioavaliação e modelagens matemáticas.

²1mW/cm² = 10W/m²

Segundo Braun, Maurette e Oliveiros (1991), actinometria química é uma medida da taxa de incidência de fótons em um reator fotoquímico de geometria específica e para um domínio espectral luminoso bem definido. Nesse processo, substâncias actinométricas reagem fotoquimicamente em comprimento de onda específico. Pode-se citar como exemplos, o ferrioxalato de potássio (mais comumente utilizado), oxalato de uranil e ácido cloroacético. Segundo Daniel (1993), as substâncias actinométricas devem apresentar produção máxima de fotoprodutos, estáveis e mensuráveis, quando submetidas a uma radiação específica.

A radiometria consiste na medição direta da intensidade de radiação por meio de radiômetros. A confiabilidade e precisão estão diretamente relacionadas à sensibilidade do equipamento e ao número de pontos distribuídos no reator. Segundo Severian e Roessler (1998), o limite mínimo entre o ponto de medição e a fonte de emissão deve ser de quatro centímetros para garantir validação na leitura.

A bioavaliação consiste na utilização de culturas puras de organismos sensíveis a radiação UV. Para tanto, gera-se inicialmente uma curva de calibração (decaimento da concentração do indicador *versus* doses específicas de radiação UV). Em prosseguimento, são adicionados microrganismos no reator UV e, em intervalos determinados de tempo, alíquotas são retiradas para quantificação do indicador. A dose equivalente é obtida com a curva de calibração e, plotando-se graficamente dose *versus* tempo, estima-se intensidade de radiação (GONÇALVES et al., 2003).

A modelagem matemática é normalmente utilizada para estimativa da intensidade média de radiação dentro de um reator. No modelo Point Source Summation-PSS, desenvolvido em 1983 por Schible, as lâmpadas de emissão UV são simuladas como uma série de fontes de radiação colineares e a intensidade de radiação é quantificada por meio da Equação 3.8 (EPA, 1999a). Segundo Gonçalves et al. (2003), o modelo Line Source Summation-LSI utiliza a integral do método PSS para obtenção da intensidade de radiação (Equação 3.9).

$$I(R,Z) = \sum_{i=1}^n \frac{S/n}{4\pi r^2} * e^{-\alpha.L8r/R} \quad (3.8)$$

R: distância radial do eixo da lâmpada ao ponto (cm),

3 Revisão da Literatura

Z: coordenada do ponto em relação ao eixo da lâmpada (cm),

S: energia total da fonte (mW),

n: número de fontes pontuais em que a lâmpada foi dividida,

r: distância do ponto à fonte pontual (cm),

α : coeficiente de absorvância do meio líquido (cm^{-1}),

L: caminho ótico no meio líquido (cm),

c: comprimento da lâmpada.

$$I(R,Z) = \int_0^c \frac{S/c}{4\pi r^2} * e^{-\alpha.L8r/R} \quad (3.9)$$

A dose de radiação UV, outro conceito importante no estudo em questão, é definida como o produto da intensidade pelo tempo de exposição. Unidades comumente utilizadas para a dose de UV são: J/m^2 , mJ/cm^2 em Ws/cm^2 (EPA, 2006).³ Segundo Daniel et al. (2001), deve-se diferenciar a dose aplicada da dose recebida. Utiliza-se a dose aplicada quando se deseja estimar o consumo energético das lâmpadas, sendo conceituada como a energia total aplicada em uma superfície ou em dado volume (Equações 3.10 e 3.11 respectivamente).

$$Da = I_0.t \quad (3.10)$$

$$Dav = \frac{I_0.t}{L} 0,2778 \quad (3.11)$$

Da: dose aplicada (mWs/cm^2)

I_0 : intensidade média de radiação UV incidente da superfície irradiada

t: tempo de exposição à radiação UV (s);

Dav: dose aplicada volumétrica (Wh/m^3)

L: espessura da lâmina líquida (cm)

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

³ $1\text{mJ/cm}^2 = 1\text{ mW/cm}^2 = 10\text{ J/m}^2$

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

A dose recebida, ou seja, a energia total absorvida pelos microrganismos pode ser obtida por:

$$D_r = I_m * t \quad (3. 12)$$

$$Dr = \frac{I_m.t}{L} 0,2778 \quad (3. 13)$$

D_r : dose recebida (mWs/cm^2)

I_m : intensidade média de radiação UV na lâmina líquida de espessura L (mW/cm^2)

D_{rv} : dose aplicada volumétrica (Wh/m^3)

As doses de radiações UV necessárias para inativação de microrganismos são variáveis a cada tipo de organismo e espécie. As bactérias, excetuando-se as esporoladas, e os vírus, são mais sensíveis a radiação UV. Doses mais elevadas são utilizadas para inativação dos protozoários e helmintos, alguns destes, como é o caso das formas encistadas dos protozoários e os ovos de helmintos, exigem doses excessivas, acarretando em custos altos com energia elétrica. Todavia, estes poderão ser removidos em etapas anteriores à desinfecção UV.

Na Tabela 3. 1 apresentam-se doses de radiação UV usuais para inativação de bactéria, vírus, algas, protozoários, helmintos e leveduras.

3 Revisão da Literatura

Tabela 3. 1 – Doses de radiação UV (mWs/cm²) em função da espécie do microrganismos e log de inativação (continua)

Bactérias	Doses de radiação UV (mWs/cm ²)/log inativação			Vírus	Doses de radiação UV (mWs/cm ²)/log inativação		
	3 log	4 log	5 log		3 log	4 log	5 log
<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	8,5	11,3	14,2	Hepatite	8,0	10,7	13,3
<i>B. megatherium</i> sp. (esporos)	5,2	6,9	8,7	Influenza	6,6	8,8	11,0
<i>B. paratyphosus</i>	6,1	8,1	10,2	Mosaico do Tabaco	440,0	586,7	733,3
<i>Bacillus anthracis</i>	8,7	11,6	14,5	Poliovírus	24,0	28,0	35,0
<i>Bacillus megaterium</i> (esporos)	52,0	69,3	86,7	Rotavírus		32,0	40,0
<i>Bacillus megaterium</i> (vegetativo)	2,5	3,3	4,2	<i>Vibriocholerae</i>	11,5		19,2
<i>Bacillus subtilis</i> (esporos)	58,0	77,3	96,7	Protozoários			
<i>Bacillus subtilis</i> (vegetativo)	11,0	14,7	18,3				
Bacteriophage (<i>E. coli</i>)	6,6	8,8	11,0	ovos de nematoides	92	122,7	153,7
<i>Clostridium tetani</i>	22,0	29,3	36,7	<i>Paramecium</i>	200	266,7	333,3
<i>Corynebacterium diptheriae</i>	6,5	8,6	10,8	Fungos			
<i>Eberthella typhosa</i>	4,1	5,5	6,8				
<i>Escherichia coli</i>	7,0	9,3	11,7	<i>Aspergillus flavus</i>	99,0	132,0	165,0
<i>Legionella bozemanii</i>	3,5	4,7	5,8	<i>Aspergillus glaucus</i>	88,0	117,3	146,7
<i>Legionella dumoffii</i>	5,5	7,3	9,2	<i>Aspergillus niger</i>	330,0	440,0	550,0
<i>Legionella gormanii</i>	4,9	6,5	8,2	<i>Muscorracemosus A</i>	35,2	46,9	58,7
<i>Legionella micdadei</i>	3,1	4,1	5,2	<i>Muscorracemosus B</i>	35,2	46,93	58,7
<i>Legionella pneumophila</i>	3,8	5,1	6,3	<i>Oosporalactis</i>	11,0	18,3	14,7
<i>Leptospira interrogans</i>	6,0	8,0	10,0	<i>Penicillium digitatum</i>	88,0	117,3	146,7
<i>Micrococcus candidus</i>	12,3			<i>Penicillium expansum</i>	22,0	29,3	36,7
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	10,0	13,3	16,7	<i>Penicillium roquefort</i>	26,4	35,2	44,0
<i>Neisseria catarrhalis</i>	8,5	11,3	14,2	<i>Rhizopus nigricans</i>	220,0	293,3	366,7

Tabela 3. 1– Doses de radiação UV (mWs/cm²) em função da espécie do microrganismos e log de inativação (conclusão)

Bactérias	Doses de radiação UV (mWs/cm ²)/log inativação			Fungos	Doses de radiação UV (mWs/cm ²)/log inativação		
	3 log	4 log	5 log		3 log	4 log	5 log
<i>Phytomonatume faciens</i>	8,0	11,3	14,2	Algas	Doses de radiação UV (mWs/cm ²)/log remoção		
<i>Proteus vulgaris</i>	6,6	8,8	11,0		3 log	4 log	5 log
<i>Pseudomonasaeruginosa</i> (cepas ambientais)	10,5	14,0	17,5		22,0	29,33	36,7
<i>Pseudomonasaeruginosa</i> (cepas de laboratório)	3,9	5,2	6,5	Leveduras	Doses de radiação UV (mWs/cm ²)/log remoção		
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	6,6	8,8	11,0		3 log	4 log	5 log
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	6,2	8,3	10,3		17,6	23,5	29,3
<i>Salmonella</i>	10,0	13,3	16,7		13,2	17,6	22
<i>Salmonella enteritidis</i>	7,6	10,1	12,7		13,2		
<i>Salmonella paratyphi</i> (febre entérica)	6,1	8,1	10,2	Levedura do bolo	13,2	17,6	22
<i>Salmonella typhosa</i> (febre tifoide)	6,0	8,0	10,0	Levedura do pão	8,8	11,7	14,7
<i>Sarcinalutea</i>	26,4	35,2	44,0				
<i>Serratiamarcescens</i>	6,2	8,2	10,3				
<i>Shigelladysenteriae</i> (disenteria)	4,2	5,6	7,0				
<i>Shigella flexneri</i> (disenteria)	3,4	4,5	5,7				
<i>Shigella paradyenteriae</i>	3,4	4,5	5,7				
<i>Staphylococcus albus</i>	5,7	7,6	9,5				
<i>Staphylococcus aureus</i>	7,0	9,3	11,7				
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	5,8	7,7	9,7				
<i>Streptococcus faecalis</i>	10,0	13,3	16,7				
<i>Streptococcus hemolyticus</i>	5,5	7,3	9,2				
<i>Streptococcus lactis</i>	8,8	11,7	14,7				
<i>Streptococcus viridians</i>	3,8	5,1	6,3				

Fonte: INTERNATIONAL WATER GUARD INDUSTRIES- IWGI (2002)

Shin et al. (2008) avaliaram a inativação de dois morfotipos (branco, opaco e transparente-WT e branco-WO) de *Mycobacterium avium* em dois reatores UV do tipo colimador, sendo um dotado de duas lâmpadas UV de 15 W de baixa pressão e outro com uma lâmpada de 400 W de média pressão. Os resultados indicaram que doses de 6 mWs/cm² e entre 23-24 mWs/cm² foram suficientes para se obter 1 e 4 log de inativação, respectivamente, para os dois colimadores testados.

Experimento realizado por Maya et al. (2003) com desinfecção UV em esgoto secundário (lodos ativados) mostrou que uma dose de 15 mWs/cm² foi suficiente para inativação de coliformes totais até o limite de 1.000 UFC/100 mL. A eficiência de inativação de coliformes totais foi de até 5 log com dose aplicada de 60 mWs/cm². O grau de resistência de estreptococos fecais foi avaliado em comparação aos coliformes totais e na análise, ficou comprovado uma fase de latência para doses inferiores a 15 mWs/cm². Segundo os autores, possivelmente esse comportamento se deve ao pequeno tamanho desses microrganismos (1 µm). No entanto, foi possível inativar até 6 log com uma dose de 60 mWs/cm². A inativação de *Salmonella typhi* foi de até 3 log com doses de aproximadamente 30 mWs/cm². Testes de inativação de *Acanthamoeba culbertsoni* (linhagem ATCC 30171) e *Acanthamoeba* spp. confirmaram maiores dosagens necessárias para inativação desses protozoários (>173 mWs/cm²), devido, principalmente, ao encistamento do microrganismo, que o torna mais resistente. Todos os testes de desinfecção foram realizados utilizando-se um reator de feixe colimado equipado com uma lâmpada de mercúrio de baixa pressão.

Keegan et al. (2003) avaliaram a resistência do *Cryptosporidium parvum* à desinfecção por radiação UV, entre outros desinfetantes (ozônio, oxidante misto-Miox e cloro). A efetividade da desinfecção somente foi alcançada com uso de ozônio e radiação UV. Para os ensaios com radiação UV foi utilizado um gabinete de esterilização composto por duas lâmpadas UV de 15 W de baixa pressão de vapor de mercúrio. A inativação total dos oocistos de *Cryptosporidium parvum* se deu para dose de 1.000 mWs/cm², no entanto, inativações entre 1 e 2 log dos oocistos do protozoário foram alcançadas em dosagens de até 30 mWs/cm². A remoção de 3 log foi obtida quando aplicada dose de 500 mWs/cm².

Gerba, Gramos e Nwachuku (2002) compararam a variabilidade da dose de radiação UV necessária para inativação de tipos de enterovírus e adenovírus 2 contidos em água preparada. As amostras foram colocadas em placa Petri e submetidas a ensaios de desinfecção através de um colimador equipado com uma lâmpada UV de 15 W de baixa pressão de vapor de mercúrio. Os resultados obtidos indicaram doses necessárias de radiação UV para os enterovírus compatíveis com as doses recomendadas pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), a qual estabelece doses de 21 e 36 mWs/cm² para 2 e 3 log de inativação de vírus entéricos, respectivamente (EPA, 1990). O adenovírus 2 foi o que apresentou maior resistência à radiação UV e segundo os autores, esse comportamento pode ser explicado pelas diferenças genéticas, por sua estrutura ou devido a maneira pela qual o vírus foi preparado. Na Tabela 3. 2 apresenta-se síntese dos resultados desse estudo.

Tabela 3. 2– Doses requeridas de radiação UV para inativação de vírus (enterovírus e adenovírus 2)

Vírus ¹	Doses de radiação UV (mWs/cm ²) por unidades logarítmicas de remoção			
	1 log	2 log	3 log	4 log
<i>Echovirus 1</i>	8	16,5	25	33
<i>Echovirus 2</i>	7	14	20,5	28
<i>Coxsackievirus B5</i>	8	16	24,5	32,5
<i>Coxsackievirus B3</i>	8	16	24,5	32,5
Poliovirus	8	15,5	23	31
Adenovirus 2	40	78	119	160

Nota: a concentração inicial do vírus variou de 1,00x10⁶ a 2,00x10⁷

No manual de orientação sobre desinfetantes alternativos e oxidantes da EPA (1999a), são apresentados estudos de inativação de microrganismos pela desinfecção UV, como exemplificado a seguir.

Dentre eles, Sniceret al. (1996) apresentaram resultados de doses de UV necessárias para obter a mesma eficiência de inativação de bacteriófagos MS-2 (colifagos) de amostras de duas ETAs distintas (ETA₁ e ETA₂). Os resultados obtidos mostraram que possivelmente o ferro influenciou com maior absorção da radiação ou com agregação das partículas virais, acarretando doses maiores para a água da ETA₂, conforme se apresenta na Tabela 3. 3. Ainda

3 Revisão da Literatura

como comparação, os autores avaliaram a susceptibilidade dos colifagos MS-2 para vírus da hepatite A, poliovírus, e rotavírus para 10 fontes de águas subterrâneas. Os resultados indicaram que os colifagos MS-2 é de 2 a 3 vezes mais resistente à desinfecção UV do que os três vírus patogênicos humanos.

Tabela 3. 3— Doses de radiação requeridas (mWs/cm²) para inativação de colifagos MS-2 para duas amostras de águas diferenciadas em função da concentração elevada de ferro da ETA₂.

Eficiência (log) de inativação de colifagos MS-2	ETA ₁		ETA ₂	
	Concentração de ferro (mg/L)	Doses requeridas (mWs/cm ²)	Concentração de ferro (mg/L)	Doses requeridas (mWs/cm ²)
1	< 0,1	3,9	0,45 a 0,65	15,3
2		25,3		39,3
3		46,7		63,3
4		68,0		87,4
5		89,5		111,4
6		111,0		135,5

Estudo realizado por Campbell et al. (1995) com desinfecção UV dotado de lâmpadas UV de baixa pressão, mostrou eficiências de remoção de 2-3 log para *Cryptosporidium parvum*, no entanto, em doses extremamente elevadas (8.748 mWs/cm²).

Slade; Harris e Chisholm (1986) compararam a efetividade da desinfecção UV e cloração na desinfecção de água contendo vírus do solo, com dose de radiação de 25 mWs/cm² e com cloro residual de 1,25 mg/L e tempo de contato de 18 minutos, obtendo como resultado maior potencialidade da desinfecção de vírus com uso da radiação UV.

Calsonet al. (1982) obtiveram em experimentos de desinfecção de água contendo *Giardiamuris*, remoção de 1 e de 2 unidades logarítmicas, com doses de radiação UV de 82 mWs/cm² e 121 mWs/cm², respectivamente.

3.3 Histórico: utilização da radiação ultravioleta na desinfecção de água e esgoto

A ação germicida da radiação ultravioleta solar foi primeiramente relatada por Downes e Blunt em 1877 (MASSCHELEIN, 2002). Segundo Gates (1929), o desenvolvimento de lâmpadas de mercúrio como fonte artificial de radiação UV ocorreu em 1901.

A utilização da radiação UV como método de desinfecção de água e esgoto foi inicialmente introduzida nas instalações de água potável no início do século XX. A primeira aplicação em larga escala, cerca de 200 m³/dia, ocorreu em Marselha, na França, de 1906-1909, seguida de Rouen, também na França (MASSCHELEIN, 2002).

Nos Estados Unidos, a primeira instalação para água ocorreu em Henderson-Kentucky, em 1916, para uma população de aproximadamente 12.000 habitantes. Outras datam de 1923, em Berea- Ohio e em Horton- Kansas, e em 1989, Perrysburg-Ohio. Na Bélgica, a primeira unidade de UV em larga escala para tratamento de água foi instalada e operada em Spontin, para a aldeia de Sovet, em 1957 e 1958. (MASSCHELEIN 2002).

Muito embora as pesquisas de desinfecção com radiação UV terem se desenvolvido durante a primeira metade do século XX, o baixo custo da cloração limitou sua disseminação como uma tecnologia para tratamento de água potável. As primeiras aplicações de desinfecção com UV confiáveis tecnologicamente ocorreram na Suíça e na Áustria em 1955 (KRUITHOF E LEER VAN DER, 1990).

Segundo a EPA (2006), no ano de 1985 já haviam sido instaladas 500 estações de tratamento de água com radiação UV na Suíça e 600 na Áustria. Depois da descoberta da formação de subprodutos da desinfecção com cloro, a desinfecção UV tornou-se popular na Noruega e na Holanda, sendo implantados nestes países, nos anos de 1975 e 1980, respectivamente, os primeiros reatores para o tratamento de água. A partir do ano 2000, mais de 400 instalações de desinfecção UV em todo o mundo estavam tratando água potável, com vazões de até 1.000 m³/dia.

Por outro lado, os primeiros estudos sobre desinfecção de efluentes por radiação UV foram desenvolvidos no final do século XX, por Oliver e Cosgrove (1975), em escala de laboratório, os quais demonstraram a viabilidade deste processo em esgotos tratados a nível secundário. Até então, a radiação ultravioleta era utilizada somente para desinfecção de águas de abastecimento. No Brasil, as pesquisas para desinfecção de esgoto por radiação ultravioleta tiveram início em 1977, na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (CAMPOS E PIZZIRANI, 1977).

Cabe destacar ainda os estudos desenvolvidos na EESC/USP que abordam o tema da desinfecção através de UV: Sampaio (1985) estimou o cômputo de energia requerida para desinfetar um determinado volume de esgoto, preparado com água de represa e fezes de suíno, e concluiu que se consome em torno de $0,03 \text{ KWh/m}^3$ de energia para se obter eficiências de remoção de coliformes totais superior a 99,00 %. As amostras preparadas pelo autor apresentaram em média absorbância a 254 nm de 0,18 a 0,76.

Daniel (1989) verificou a aplicabilidade da radiação UV como desinfetante de efluentes de esgoto sanitário pré-decantado, obtendo resultados que indicaram que a inativação dos microrganismos indicadores segue a lei de Chick, para tempos de exposição da ordem de até 80 s e que para tempos superiores mantem-se constante a eficiência de inativação.

Daniel (1993) aprofundou os estudos ponderando o processo de fotoreativação e obtendo parâmetros cinéticos. O estudo indicou, entre outros aspectos, que mesmo em doses elevadas, a parcela de microrganismos associados aos sólidos não são inativados.

Souza (2000) abordou a desinfecção de águas com cor e turbidez elevadas comparando técnicas de processos alternativos (radiação ultravioleta e ácido peracético) ao cloro. Os dados obtidos confirmaram que a qualidade da água exerce grande influência na eficiência da desinfecção.

Bilotta (2000) investigou de modo comparativo a ação do ozônio e da radiação ultravioleta na remoção de coliformes totais e coliformes termotolerantes, quando aplicados a efluentes domésticos de tratamento anaeróbio. O estudo mostrou condições superiores da inativação de coliformes totais e coliformes fecais com a radiação UV.

Dias (2001), avaliou o desempenho por radiação ultravioleta e ozônio quando

aplicados a desinfecção de efluentes secundários. A desinfecção por UV com dosagens de radiação volumétricas aplicadas de 4, 8, 12,5 Wh/m³ (com altura de lâmina líquida de 2 cm) e 8, 25 e 50 Wh/m³ (com altura de lâmina líquida de 4 cm), mostrou-se como uma técnica mais simples e eficaz para a inativação de coliformes totais e coliformes termotolerantes, quando comparado a ozonização, utilizando-se de dosagens de 77 e 121 mgO₃/L (com tempo de contato de 20 minutos), 77 e 123 mgO₃/L (com tempo de contato de 30 minutos) e 92 mgO₃/L (com tempo de contato de 25 minutos).

Coletti (2003) estudou a inativação de microrganismos indicadores presentes em dois diferentes efluentes secundários de esgoto sanitário com radiação ultravioleta (aplicando-se doses de radiação UV que variaram de aproximadamente 1 a 100 Wh/m³) e obteve percentuais de inativação de *C. perfringens*, coliformes totais, *E. coli* e colifagos nos ensaios em batelada variando de zero a 99,882 %, 36,30 a 99,999%, 21,80 a 100,00 % e de 86,50 a 100,00 %, respectivamente.

Silva (2007) avaliou características operacionais e resistência de microrganismos indicadores a radiação UV de esgoto doméstico após tratamento por processos sequenciais anaeróbio e aeróbio na ETE Água Vermelha, São Carlos-SP-Brasil, a qual possui capacidade de tratamento de aproximadamente 54 m³/h. Entre as conclusões obtidas, destaca-se o custo médio operacional de R\$ 0,076/m³ (R\$ 0,006/m³ com operadores e R\$ 0,07/m³ com energia) para aplicação de dose de radiação de 9,49 Wh/m³, obtendo-se eficiência de inativação de 100, 99,999 e 99,993% para colifagos, coliformes termotolerantes e coliformes totais, respectivamente.

Costa (2007) pesquisou a ecotoxicologia de tratamento secundário de esgoto sanitário após desinfecção com cloro, ácido peracético, radiação UV e ozônio em organismos testes (*Daphnia similis*, *Ceriodaphnia silvestrii*, *Chironomus xanthus*, *Danio rerio* e *Allium cepa*). Os resultados obtidos nos ensaios indicaram que todos os desinfetantes foram capazes de produzir efeitos deletérios aos organismos-teste, sendo o cloro o desinfetante mais tóxico, sendo seguido pelo ozônio, ácido peracético e radiação UV.

3.4 Desinfecção por radiação UV: mecanismo de atuação e componentes do sistema de desinfecção

A radiação UV atua por ação física, quando a radiação penetra a parede de uma célula, através da transferência de energia eletromagnética das lâmpadas de mercúrio para o material genético dos organismos (DNA e RNA). Estes sofrem alterações por fotólise, perdendo a habilidade de reprodução da célula (EPA, 1999b). Na Figura 3. 2 ilustra-se efeito da radiação UV sobre a cadeia de DNA da bactéria, dimerizando a timina com rompimento dos encaixes dos filamentos do DNA.

Figura 3. 2 - Efeito da radiação UV sobre a cadeia de DNA da bactéria, dimerizando a timina com rompimento dos encaixes dos filamentos do DNA.

O ácido nucléico é a molécula responsável por definir as funções metabólicas e reprodução de todas as formas de vida. As duas formas mais comuns de ácidos nucléicos são ácido desoxirribonucléico (DNA) e o ácido ribonucléico (RNA). O DNA é a molécula que armazena a informação genética e consiste de duas cadeias de nucleotídeos unidas pela interação das bases complementares, denominadas de bases emparelhadas, que são: Adenina e Guanina (Purinas) e Citosina e Timina (Pirimidinas) (EPA, 2006). Essas bases emparelhadas são ligadas por pontes de hidrogênio fazendo com que as duas fitas do DNA permaneçam unidas, dando origem a dupla hélice (GONÇALVES et al., 2003).

O RNA é responsável pela formação de enzimas específicas e de proteínas estruturais. A composição do RNA é muito parecida com o DNA, contudo apresenta algumas diferenças. As bases purinas são as mesmas contidas no DNA, mas as pirimidinas são uracil e citosina (EPA, 2006).

A absorção de radiação UV pelo DNA e RNA tende a ser máxima próximo de 260 nm e um mínimo a 230 nm. Todas as purinas e pirimidinas absorvem a luz UV, no entanto, maior absorção é observada nas pirimidinas (JAGGER, 1967).

O principal dano causado pela radiação ocorre quando a energia absorvida pelo microrganismo quebra as ligações não saturadas do DNA, ocasionando a dimerização. Os dímeros formados podem ser: timina-timina, timina-citosina e citosina-citosina. As moléculas pirimídicas formadas alteram a estrutura helicoidal do DNA, dificultando a replicação do ácido nucléico. Mesmo assim, se houver replicação do ácido nucléico, a nova célula formada será mutante descendente, sem capacidade de replicação. Segundo Adler (1996), microrganismos com o DNA rico em timina tendem a ser mais sensíveis à desinfecção UV.

Com relação aos componentes de um sistema de desinfecção por radiação UV, dentre os principais itens estão os reatores, que normalmente são do tipo canal aberto ou fechado, as lâmpadas, principalmente de arco de mercúrio, o quadro de comando e controle elétrico e acessórios, como sensores para medição da radiação UV e sistemas automáticos de limpeza das lâmpadas (EPA, 1999b; EPA, 2006).

Nos reatores de canal fechado, o líquido escoar com pressão, ou seja, em conduto forçado. Segundo a EPA (2006), esse modelo é o mais adotado para instalações de água potável, enquanto que o de canal aberto, comumente é aplicado em instalações de águas residuárias.

As lâmpadas de arco de mercúrio consistem em um bulbo hermético de sílica ou quartzo (ambos transmissores de radiação UV), com as extremidades dotadas de eletrodos de tungstênio, com uma mistura de terra alcalina, que facilita a formação do arco dentro da lâmpada. No interior do tubo, é introduzida uma pequena quantidade de mercúrio e gás inerte (normalmente argônio). A diferença de potencial entre os eletrodos produz a excitação dos átomos de mercúrio que, ao retornarem ao estado de menor energia, emitem radiação UV

(DANIEL et al., 2001).

O espectro de emissão depende fortemente da pressão dos gases no interior do bulbo havendo, por este motivo, a distinção entre lâmpadas de baixa, média e alta pressão. As fontes de média e alta pressão apresentam espectro de emissão caracterizado por linhas mais largas na região do UV e também na região do visível (CAVICCHIOLI E GUTZ, 2003). A principal fonte artificial geradora de irradiação UV são as lâmpadas de arco de mercúrio de baixa pressão e de baixa ou alta intensidade e de média pressão de alta intensidade (EPA, 1999b). O termo "pressão" refere-se à pressão dos gases no interior da lâmpada, enquanto que intensidade significa à produção de energia.

As lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade são as mais utilizadas na desinfecção de água para consumo humano e de esgoto sanitário. Essas lâmpadas emitem de 85 a 90% da sua energia no comprimento de onda de 254 nm (SOUZA, SARTORI E DANIEL, 2000). Podem ser consideradas monocromáticas, operam a uma temperatura ótima de 40 °C e com uma pressão interna de 0,007 mmHg. A mistura mercúrio-argônio é usada para gerar radiação no comprimento de onda UV-C. A durabilidade deste tipo de lâmpada é na ordem de 3.000 a 13.000 h, em função principalmente, do número de ciclos a que estão submetidos. (METCALF E EDDY, 2003). Os tubos de quartzo apresentam vida útil entre 4 e 8 anos.

As lâmpadas de baixa pressão e alta intensidade são semelhantes às de baixa pressão e baixa intensidade, excetuando-se a substituição da mistura de mercúrio com argônio por mercúrio com índio, o que as tornam, quando comparadas com a de baixa pressão e baixa intensidade, mais eficientes e mais resistentes, em função de manter-se com um nível constante de mercúrio na forma de vapor (a capacidade de radiação UV é de 2 a 4 vezes maior). Este tipo de lâmpada opera com pressão interna de 0,001 a 0,01 mmHg (METCALF E EDDY, 2003).

As lâmpadas de média pressão e alta intensidade (policromáticas) são geralmente usadas para grandes instalações. Têm cerca de 50 a 100 vezes a intensidade da radiação UV germicida das lâmpadas de baixa pressão e, em consequência disso, possuem maior capacidade de penetração. No entanto, essas lâmpadas operam em temperaturas elevadas (600 a 800°C), com um maior consumo de energia. A pressão interna varia entre 100 a 10.000 mmHg

(EPA, 1999b; METCALF E EDDY, 2003).

Metcalf e Eddy (2003) compilaram as principais características das lâmpadas UV-C utilizadas na desinfecção de água e esgoto, as quais estão apresentadas na Tabela 3. 4.

Tabela 3. 4– Características das lâmpadas UV-C

Item	Und	Tipo de lâmpada		
		Baixa pressão baixa intensidade	Baixa pressão alta intensidade	Média pressão alta intensidade
Potência consumida	W	70-100	200	-
	KW	-	1,2 ⁽¹⁾	2-5
Corrente elétrica	mA	350-550	Variável	Variável
Tensão	V	220	Variável	Variável
Eficiência	%	30-40	25-35	10-12 ⁽²⁾
Emissão da lâmpada a 254 nm	W	25-27	60-400	
Temperatura	°C	35-45	90-150	600-800
Pressão	mmHg	0,007	0,001-0,01	
Comprimento	m	0,75-1,5	Variável	Variável
Diâmetro	mm	15-20	Variável	Variável

Nota: ¹Lâmpada com emissão muito alta; ²Emissão na faixa germicida (~250-260)

Fonte: METCALF E EDDY (2003)

Segundo os fabricantes, o desempenho das lâmpadas UV-C são influenciados por diversos fatores, dentre os quais se destacam: temperatura de operação, tempo de operação, que diretamente influencia o desgaste dos eletrodos, e flutuações de voltagem. A intensidade de radiação UV é muito instável para as primeiras 100 horas de uso. Normalmente, a intensidade de radiação diminui gradualmente em função do tempo de uso.

Sant' Ana et al. (2003) avaliaram a variação da emissão de radiação UV em função do tempo de uso de três diferentes lâmpadas comerciais UV de baixa pressão de vapor de mercúrio. Os testes foram realizados em batelada, utilizando-se nove colimadores. As lâmpadas foram mantidas em constante funcionamento, com medições diárias de intensidades. Os dados obtidos mostraram que duas marcas testadas apresentaram, durante o período de partida, potências de UV superiores ao esperado, com decaimento da emissão de energia em função do tempo de uso. Uma terceira marca analisada apresentou-se constantemente com valor de emissão de radiação superior ao

valor fornecido pelo fabricante.

3.5 Fatores intervenientes no processo de desinfecção por radiação UV: aspectos positivos e negativos

Segundo a EPA (1999b), entre as vantagens da desinfecção por radiação UV citam-se:

- por ser um processo físico, a desinfecção por radiação UV dispensa a manipulação, transporte e armazenamento de produtos químicos tóxicos, perigosos ou corrosivos;
- a desinfecção por radiação UV é eficaz na inativação de microrganismos como vírus, esporos e cistos de protozoários, estes considerados resistentes a alguns desinfetantes;
- não há efeito residual danoso ao homem, animal ou vida aquática;
- a desinfecção por radiação UV é de fácil operação e requer menores tempos de contato, quando comparada a outros desinfetantes, geralmente da ordem de segundos com lâmpadas de baixa pressão;
- o reator de desinfecção por radiação UV requer menor área do que outros métodos de desinfecção.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Na Tabela 3. 5 apresenta-se comparação das principais características da desinfecção de esgoto com radiação UV, cloro e seus derivados e cloraminas.

Tabela 3. 5– Comparação das principais características da desinfecção com cloro e seus derivados, cloraminas e radiação UV.

Efeitos/ características	UV	Cl ₂	NaOCl	Ca(OCl) ₂	Cloraminas
Bactéria	Muito bom	Bom	Bom	Bom	Ruim
Vírus	Razoável	Bom	Bom	Bom	Ruim
Cistos	Nenhum efeito	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim
Geração de subprodutos	Não	Sim (THMS e HAAS)	Sim (THMS e HAAS)	Sim (THMS e HAAS)	Sim ¹ (THMS)
Residual	Não forma residual (Bom)	Forma residual (ruim)	Forma residual (ruim)	Forma residual (ruim)	Forma residual (ruim)
Preocupação quanto a segurança	Baixa	Alta	Baixa ² a média	Baixa	Médio
Complexidade de operação e manutenção	Miníma	Miníma	Miníma	Moderado ³	Miníma
Indicado na aplicabilidade de vazões	Pequenas e média	Todas	Todas	Pequenas e médias	Todas
Custos	Moderado	Baixo a moderado ⁴	Baixo a moderado ⁴	Baixo a moderado ⁴	Baixo

Nota:¹Formação de THMS é inferior a Cl₂, ²baixa para utilização no local, ³Manipulação na forma sólida Ca(OCl)₂ é mais trabalhoso do que na forma líquida NaOCl, ⁴se precisar de descloração o custo se eleva.

Fonte: Adaptado de METCALF E EDDY (2003)

No entanto, a eficácia da desinfecção por radiação UV depende principalmente das características qualitativas do efluente, em particular da concentração de sólidos suspensos, da intensidade de radiação de UV, do tempo de exposição dos microrganismos à radiação, da configuração do reator (distribuição espacial da radiação UV) e consequente comportamento hidrodinâmico nas diferentes condições operacionais (EPA, 1999b).

A efetividade de inativação depende da sensibilidade de cada tipo de microrganismo à radiação UV e pode ser calculada utilizando-se da Equação 3.14.

$$Eficiência_{\log} = \log_{10} \frac{N_0}{N} \quad (3.14)$$

N_0 = número inicial de microrganismos

N = número de microrganismos remanescente após desinfecção

Segundo recomendações da EPA (1999b), a concentração de sólidos suspensos totais não deve exceder a 30 mg/L para que a radiação emitida atinja o microrganismo. Pesquisas desenvolvidas no PROSAB mostraram boa inativação de coliformes termotolerantes por radiação UV em efluentes com 20 mg/L, 30 mg/L e 40 mg/L de SST (CHERNICHARO et al., 2001). Outro aspecto importante é o tamanho das partículas: quanto maior o diâmetro médio do sólido, menor a eficiência do processo de desinfecção com radiação UV (DANIEL, 1993).

A dureza da água afeta a solubilidade de metais que podem absorver a luz UV e pode causar problemas para manter as lâmpadas limpas e funcionais, devido a incrustações formadas pela precipitação de carbonatos nos tubos de quartzo. (EPA, 1986).

Substâncias húmicas e ferro podem elevar a absorbância de radiação UV. Se grande parte da DBO for húmica ou de compostos não saturados, a transmissão de UV pode ser reduzida. O pH do efluente pode também afetar a solubilidade de metais e carbonatos (EPA, 1999b).

Segundo a EPA (1999b), existem três áreas críticas a serem consideradas em um projeto de desinfecção por radiação UV: a primeira se refere à potência da lâmpada que é determinada pelo fabricante, a segunda refere-se à concepção a ser adotada, se o sistema é com lâmpadas imersas ou emersas, e qual procedimento de operação e manutenção. A terceira refere-se às propriedades hidráulicas do reator. Idealmente, um sistema de desinfecção por radiação UV deve ter um fluxo uniforme, com movimento axial suficiente para otimizar a exposição do microrganismo à radiação UV e o reator deve ser projetado hidraulicamente de forma a evitar zonas mortas e curto-circuitos.

Deve-se também considerar que os microrganismos na ausência ou presença de luz visível conseguem reparar e reverter os efeitos da radiação UV e influenciar negativamente na eficiência da desinfecção.

Os microrganismos possuem a capacidade, quando expostos a uma dose subletal de radiação UV, de reparar os danos causados na estrutura do seu ácido desoxirribonucleico- DNA e voltar ao estado ativo em que a reprodução é novamente possível (EPA, 1986). A importância biológica do reparo no DNA é indicada pela grande variedade de mecanismos de reparo, mesmo em organismos simples como *Escherichia coli*. Esses sistemas incluem enzimas que reverterem as modificações químicas das bases de nucleotídeos, bem como sistemas multienzimáticos mais complicados que dependem da redundância inerente da informação em DNA de fita dupla para restaurar a molécula danificada (VOET, D; VOET, J; PRATT, 2008).

Os mecanismos principais de recuperação dos microrganismos irradiados com radiação ultravioleta incluem os processos enzimáticos da fotorreativação e da recuperação no escuro. Fotorreativação é a reversão direta de dímeros de timina pela enzima fotoliasena presença de luz visível e a reparação no escuro se refere à capacidade da maioria das células para reparar os danos induzidos ao seu DNA pela ação de várias enzimas com nenhuma exigência de luz (LOCAS; DEMERS; PAYMENTO, 2008).

Bjorn e McKenzie (2008) assinalam que os efeitos fisiológicos da fotorreativação foram observados por Haussedr e Oehmck desde 1933, muito antes da descoberta da função do DNA.

Tosa e Hirata (1999) avaliaram a susceptibilidade de duas cepas da *Escherichia coli*, enteroemorrágica 0157:H7 e 026, à fotorreativação a luz visível com lâmpada fluorescente. Amostras contendo as suspensões bacterianas foram submetidas à desinfecção com uma lâmpada de 25 W suspensa a 60 cm acima da superfície líquida. Os ensaios foram realizados com agitação magnética e com lâminas de 6,6 cm de profundidade. A irradiação visível foi aplicada nas mesmas condições, porém com uma lâmpada de 15 W, suspensa a 15 cm acima da superfície líquida. Amostras foram analisadas entre 0 e 3 horas com intervalos de aproximadamente 20 minutos. As conclusões obtidas neste estudo demonstraram que a fotorreativação foi observada somente na cepa da *Escherichia coli* enteroemorrágica 026 e que a dose exigida para 90% de inativação foi aumentada em 2,2 vezes, em relação aos resultados sem a fotorreativação.

Yoon et al. (2007), utilizando os indicadores coliformes totais, coliformes fecais e *Escherichia coli*, estudaram a potencialidade de reparo dos microrganismos após a desinfecção por radiação UV de efluente doméstico secundário. O experimento foi testado por um período de um ano com variação da dose de UV (6 e 16 mWs/cm²). Uma lâmpada fluorescente de 36 W foi utilizada para avaliar os efeitos da fotorreativação. Igualmente, amostras foram expostas à radiação solar. Para a investigação do reparo no escuro, alíquotas foram mantidas na escuridão a 22 e 15 °C. Os tempos de exposição variaram de 1, 2, 3, 4, 8, e 12 h. A fotorreativação e o reparo no escuro foram confirmados para a menor dose. Após as 12 horas de irradiação UV, o percentual de microrganismos reparados foi de 5 % pela lâmpada fluorescente e de 1 % pela ausência de luz. Os microrganismos reparados pela irradiação solar foram diminuindo a níveis não detectados após 4 h de exposição.

Zimmer, Slawson e Huck (2003) investigaram o potencial de reativação do *Cryptosporidium parvum* após exposição a baixas doses de radiação UV (1 e 3 mWs/cm²). Segundo os autores, nenhuma evidência de reparo foi observada após uma solução contendo oocistos de protozoário ser exposta à radiação UV com lâmpadas de baixa e média pressão e posteriormente incubados a 5 e 25 °C em condições de claro e escuro até 120 h. Este resultado levou os autores a concluírem que o processo de reativação de microrganismos poderia ser desconsiderado no tratamento de água potável pelo fato de que as doses usualmente utilizadas são bem maiores, na ordem de 16 a 40 mWs/cm².

Quek e Jiangyong Hu (2008) avaliaram a habilidade de várias cepas de *Escherichia coli* (tipo selvagem, UV-resistente e antibiótico-resistente) em executar fotorreativação e reparos no escuro após 4 horas de incubação pós-irradiação UV com lâmpadas de baixa e de média pressão. A análise dos resultados revelou que a capacidade de reparação de diferentes cepas de *E. coli* podem diferir significativamente. Para lâmpadas de baixa pressão a fotorreativação variou de 10 a 85 % e o reparo no escuro variou de 13 a 28 %. Para lâmpadas de média pressão percentagens ligeiramente inferiores foram observados. Cepas de *E. coli* ATCC 15597 e ATCC 11229 foram as que apresentaram-se mais propícias ao processo de fotorreativação e recuperação no escuro respectivamente, estes resultados foram confirmados quando comparados com uma *E. coli* patogênica 0157:H7. Segundo os autores, estas

cepas poderiam servir como indicadores conservadores para estudos futuros de reparo de microrganismo após exposição à radiação UV.

As lâmpadas de média pressão, tipo “policromática” produzem raios UV cobrindo uma larga faixa de comprimentos de onda, que causam danos, muitas vezes irreparáveis segundo Sanz et al. (2007), não só ao DNA celular, mas em outras moléculas, tais como enzimas. Por outro lado, as lâmpadas de baixa pressão “monocromáticas” emitem um pico único de radiação UV que só afeta o DNA. Assim, a reativação de microrganismo é mais difícil com lâmpadas de média pressão.

Locas; Demers e Paymento (2008) avaliaram, entre outros fatores e condições, o processo de fotorreativação de microrganismo em duas unidades de desinfecção de efluente doméstico da Província de Quebec, no Canadá. O estudo avaliou os níveis de recrescimento de *Escherichia coli* e enterococos decorridos 6 horas da desinfecção com radiação UV com lâmpadas de baixa e de média pressão. Para avaliar o efeito da reativação, as amostras foram coletadas nas duas estações, guardadas em temperatura ambiente (entre 23 a 26 °C) e refrigeradas a 4 °C e, posteriormente, expostas a luz visível com intensidades de 6, 12, 18 e 24 mJ/cm². Os resultados indicaram que a fotorreativação da *Escherichia coli* aumentou com as maiores intensidades e que este aumento foi significativamente maior nas maiores temperaturas. O nível de fotorreativação de *Escherichia coli* também foi maior após a desinfecção com lâmpadas de baixa pressão. Enterococos, no entanto, não foram fotorreativados sob qualquer condição dos ensaios.

Lee et al. (2009) avaliaram, entre outros processos, a fotorreativação e o reparo no escuro da *Escherichia coli* por luz ultravioleta de alta potência pulsada. A fonte de energia pulsante foi operada a 2.400 V, com 200 Ws de energia armazenada em um capacitor de 100 mF. Uma alíquota d'água contendo células de *Escherichia coli* em concentrações em torno de 10⁷ UFC/mL foi irradiada durante 3 s com a fonte de luz UV pulsante posicionada a uma distância de 30 cm da superfície superior da amostra. Após irradiação, uma fração foi armazenada em uma câmara escura e a outra sob uma lâmpada fluorescente de 40 W, posicionada horizontalmente a 20 cm acima da superfície do líquido. A população celular foi monitorada como uma

função do tempo de incubação por 10 horas a 20 °C. Durante a exposição à luz visível, a população de células foi diminuindo com o tempo de exposição e nenhum sinal de fotorreativação foi observado por 10 h. Uma redução adicional de cerca de 1log (90%) também foi obtida durante um período de 8 h após a inativação com dosagem de 9,0 mWs/cm². O mecanismo de reparo no escuro não foi significativo. Segundo os autores, especula-se que uma gama de comprimentos de onda, incluindo raios UV-C, gerado por pulsos de irradiação de lâmpada de xenônio, induz danos mais letais ou irreversíveis aos sistemas de reparação microbiana, exercendo assim os efeitos supressivos sobre os processos de reativação.

3.6 Cinética da desinfecção e hidrodinâmica dos reatores

O dimensionamento e projeto de um sistema de desinfecção requer o conhecimento da taxa de inativação do microrganismo a eliminar ou indicador de sua presença no meio pelo desinfetante escolhido. Neste contexto, o efeito da concentração do desinfetante na cinética do processo possibilitará definir a combinação mais eficiente do tempo de contato (volume do reator para uma determinada vazão) e a dosagem do desinfetante a empregar.

Chick, em 1908, enunciou o principal conceito da cinética de desinfecção, ao identificar a semelhança existente entre a desinfecção química com as reações químicas entre duas substâncias, sendo reagentes na primeira o microrganismo e o desinfetante, caracterizadas por uma lei de cinética, como as reações químicas (AWWA, 1995), dada por:

$$r = -k * N_0 \quad (3.15)$$

r: taxa de inativação (número de organismos/volume*tempo);

N₀: concentração inicial de organismos viáveis

A forma derivativa da Equação 3.15 é a seguinte:

$$\frac{dN}{dt} = -K * N_0 \quad (3. 16)$$

dN/dt : taxa de inativação da população de organismos;

k : constante de inativação de organismos;

N : número de organismos remanescentes em um determinado tempo, t .

N_0 = número inicial de microrganismos

A solução da integral da Equação 3.15 segue cinética de 1ª ordem e tem a seguinte forma, considerando os limites, $t= 0$, $N= N_0$ e t, N :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-k*t} \quad (3. 17)$$

Percebe-se que o modelo assume que a eficiência independe da concentração do desinfetante, sendo variável apenas com o tempo de contato. Entretanto, várias pesquisas utilizando diversos produtos desinfetantes demonstraram que existem divergências entre dados de remoção observados e aqueles calculados segundo o modelo de Chick. Muitos fatores podem ser enumerados para explicar esses desvios, como redução da concentração do desinfetante durante o tempo de contato, diferentes resistências individuais entre microrganismos em distintos estágios de ciclo vital, formação de colônias ou agrupamentos de microrganismos e proteção de microrganismos pelos sólidos suspensos existentes na água (EPA, 1986).

Watson, também em 1908, realizou diversos experimentos com concentrações variáveis de desinfetante e demonstrou que existe uma relação logarítmica entre a concentração e a velocidade média de inativação e propôs a seguinte equação para relacionar a constante de inativação de Chick com a concentração de desinfetante (WEF, 1996a):

$$K = K' * C^n \quad (3. 18)$$

k' : constante de inativação corrigida (assumida que é independente de C e de N);

3 Revisão da Literatura

C:concentração de desinfetante;

n:coeficiente de diluição.

Combinando as Equações 3.16 e 3.18, tem-se o modelo de Chick-Watson:

$$\frac{dN}{dt} = -K * C^n * N_o \quad (3. 19)$$

Integrando a Equação 3.19 para os limites $t= 0, N= N_0$ e t, N e ainda admitindo C constante no tempo, tem-se:

$$\frac{N}{N_o} = e^{-k*C_n*t} \quad (3. 20)$$

Experiências desenvolvidas em regime de batelada têm demonstrado que a inativação de microrganismos não segue o modelo exponencial de decaimento como previu Chick, mesmo quando a concentração é mantida constante. Desta forma, vários estudos foram realizados objetivando aprimorar a lei de Chick e o modelo de Chick-Watson, destacando-se dentre esses a modelação matemática proposta em 1972 por Hom, que desenvolveu uma relação empírica “flexível” (WEF, 1996a), baseada nas equações definidas pelos pesquisadores citados e que considera a concentração e o tempo, como variáveis da taxa de decaimento:

$$\frac{dN}{dt} = -k'' * C^n * t^{m-1} * N \quad (3. 21)$$

m: constante empírica.

Integrando a Equação 3.21 para os limites $t= 0, N= N_0$ e t, N e ainda admitindo C constante no tempo, tem-se:

$$\frac{N}{N_o} = e^{K_H*C^n*t^m} \quad (3. 22)$$

$K_H = k''/m$ = constante de inativação de Hom

Com relação aos aspectos hidrodinâmicos, as características do escoamento de uma unidade de tratamento afetam consideravelmente a eficiência de conversão (produção ou remoção), através de uma reação química ou bioquímica, paralelamente a outras variáveis envolvidas, como temperatura, pH, concentração de reagentes e produtos e velocidade da reação (DANIELet al., 2001).

Consideram-se dois limites teóricos e opostos de fluxo em reatores: o escoamento de pistão e a mistura completa. Em condições de escala real, os regimes de escoamento normalmente estão situados entre esses dois extremos, sendo denominados de escoamento não-ideal com dispersão.

No escoamento de pistão, cada partícula do líquido permanece no reator pelo mesmo tempo, podendo ocorrer mistura localizada ou transversal, mas nunca no sentido longitudinal ou axial à direção do escoamento. Todas as partículas permanecem no reator por um tempo igual ao tempo de detenção hidráulica-TDH, ou tempo de contato, t_0 .

Na condição de fluxo em mistura completa, cada elemento infinitesimal de fluido que entra no reator é imediatamente misturado em toda a massa líquida contida no volume do mesmo.

O regime de fluxo não-ideal ou disperso resulta de combinações complexas dos dois modelos teóricos, devido a diversos fenômenos hidráulicos como correntes de densidade, recirculação, zonas de fluxo nulo (zonas “mortas”) e curto-circuitos. Os dois últimos resultam em expressiva perda de eficiência e devem ser evitados quando da elaboração do projeto ou corrigidos quando detectados em sistema em operação. Nessa condição, o tempo de detenção hidráulica passa a ser um conceito abstrato, podendo ser medido como o tempo médio em que o fluido, escoando a uma vazão Q , permanece no reator de volume útil, V . Para manter os elementos de fluido no reator com volume V , pode ser considerado um sistema equivalente, constituído por n câmaras de mistura completa em série, cada uma delas com volume V/n , procurando-se otimizá-lo ao aproximá-las de um reator com fluxo de pistão.

Dessa forma, o comportamento hidráulico (distribuição dos diferentes tempos de detenção dos elementos de fluido no reator) de uma unidade de tratamento

de água ou efluente pode ser avaliado pela execução de estudos usando traçadores e através de modelação matemática apoiada em análises estatísticas, de modo a determinar as zonas de escoamento nulo, as frações de escoamento com mistura completa e com predominância de fluxo em pistão (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

Levando em consideração que a substância ou matéria que entra no reator não é inerte, isto é, sofre transformações devido às reações que ocorrem com velocidade conhecida, pode-se calcular a eficiência do processo de conversão para cada situação de escoamento.

Em reator de pistão, considerando a cinética de 1ª ordem, a transformação de determinada dosagem ou concentração aplicada, em função da constante de reação e do tempo de contato pode ser avaliada conforme Equação 3.23, a qual é válida também para reatores estáticos com mistura completa.

$$\frac{C}{C_0} = e^{-K \cdot t_0} \quad (3.23)$$

Considerando o fluxo ideal de mistura completa e para reator de uma única câmara, tem-se a Equação 3.24.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + k \cdot t_0} \quad (3.24)$$

Para n reatores de volume V/n, em série, a eficiência pode ser estimada mediante a Equação 3.25.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k \cdot V}{n \cdot Q}\right)^n} \quad (3.25)$$

Para o regime não-ideal com fluxo de dispersão longitudinal, Wehner & Wilhen (1956) *apud* Daniel *et al.* (2001), resolveram a equação para conversão (Equação 3.26).

$$\frac{C}{C_0} = \frac{4 * a * e^{\left(\frac{v * L}{2 * D}\right)}}{(1 + a)^2 * e^{\left(\frac{a * v * L}{2 * D}\right)} - (1 - a)^2 * e^{\left(-\frac{a * v * L}{2 * D}\right)}} \quad (3. 26)$$

$$a = \left(1 + 4 * K * t_o \frac{D}{v * L}\right)^{1/2} \quad (3. 27)$$

D: coeficiente de dispersão ($L^2.T^{-1}$) obtido em ensaio com traçador;

v: velocidade de escoamento da água no reator ($L.T^{-1}$);

L: comprimento do reator ou distância percorrida pela água (L)

O coeficiente de dispersão (D) pode ser obtido através das Equações 3.28 e 3.29, propostas por Yanez em 1993.

$$D = d * v * L \quad (3. 28)$$

$$d = \frac{x}{-0,261 + 0,254x + 1,014x^2} \quad (3. 29)$$

D: coeficiente de dispersão ($L^2.T^{-1}$) obtido em ensaio com traçador;

d: número de dispersão

v: velocidade de escoamento da água no reator ($L.T^{-1}$);

L: comprimento do reator ou distância percorrida pela água (L)

X: relação comprimento/largura

3.7 Cinética da desinfecção por radiação ultravioleta

Segundo a EPA (1986), a cinética da desinfecção UV baseada na Lei de Chick considera que a taxa de inativação de microrganismos é de primeira ordem em relação à fração sobrevivente e à intensidade de radiação UV, ou seja:

$$\frac{dN}{dt} = -k * I * N \quad (3.30)$$

Ou ainda, integrando a Equação 3.30

$$\frac{N}{N_o} = e^{-k * I * T} \quad (3.31)$$

N: número de microrganismo efluente (organismos/100 mL);

N_o: número de microrganismo afluente (organismos/100 mL);

K: coeficiente de inativação pela radiação UV (mW⁻¹s⁻¹cm²);

I: intensidade de radiação UV (mWcm⁻²);

T: tempo de exposição a radiação UV (s)

Daniel (1993), citando vários autores, enfatiza que a Equação 3.31 só se aplica nas situações em que a absorção da radiação UV pelo meio em suspensão é desprezível, a população de microrganismos for homogênea, quando uma única lesão for suficiente para inativar o microrganismo, quando o regime de escoamento for pistão ou ainda quando a câmara de desinfecção operar por batelada. Esta equação tem como pressuposto que a intensidade desta radiação é constante em toda a extensão da lâmina líquida e que o número de lesões produzidas no volume a ser desinfetado é diretamente proporcional à dose aplicada e a distribuição da radiação se processa de forma aleatória.

Dificilmente, tais condições são satisfeitas, a matéria em suspensão impede a penetração da radiação UV reduzindo a eficiência de inativação do microrganismo, existem desvios no tipo de escoamento que foge ao pistão ideal e as espécies de microrganismos encontradas no esgoto são distintas e não homogêneas. Para tanto, outros modelos empíricos foram desenvolvidos.

Segundo a EPA (1986), pode-se por meio da Equação 3.30 avaliar a influência dos sólidos em suspensão total e com ajuste desta equação, através de regressão múltipla pelo método dos mínimos quadrados, se obtêm a concentração de microrganismos no efluente associado aos sólidos em suspensão. Cabe ressaltar que o valor de N_p dar-se-á em amostras expostas a elevadas doses de radiação.

$$N = N_D \cdot e^{-k \cdot dose} + N_P \quad (3.32)$$

$$N_P = a \cdot (SST)^b \quad (3.33)$$

N: número de microrganismo efluente (organismos/100 mL);

N_D : número de microrganismo disperso no afluente (organismos/100 mL);

N_P : número de microrganismo associado aos sólidos em suspensão (organismos/100 mL);

K: coeficiente de inativação pela radiação UV ($\text{mW}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^2$);

SST: sólidos suspensos totais (mg.L^{-1});

a e b: coeficientes empíricos obtidos por regressão múltipla pelo método dos mínimos quadrados

Emericket al. (2000), desenvolveram outra equação (Equação 3.34) que também possibilita avaliar a concentração de microrganismos no efluente, considerando a influência dos SST.

$$N = N_D \cdot e^{-K \cdot dose} + \frac{N_P}{K \cdot dose} (1 - e^{-K \cdot dose}) \quad (3.34)$$

N: número de microrganismo efluente (organismos/100 mL);

N_D : número de microrganismo disperso no afluente (organismos/100 mL);

N_P : número de microrganismo associado aos sólidos em suspensão (organismos/100 mL);

N_0 : número de microrganismo no afluente ($N_0 = N_D + N_P$)

K: coeficiente de inativação pela radiação UV ($\text{mW}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^2$);

Outro modelo cinético (Equação 3.35) pode ser representado pela adequação do modelo de Hom, em que são considerados os efeitos da dose de radiação ultravioleta e do tempo de exposição.

$$\frac{dN}{dt} = -k^1(I_m * t)^n * t^m * N \quad (3.35)$$

Ou, integrando-se a Equação 3.35 obtém-se:

$$\ln \frac{N}{N_o} = -\frac{k^1 I_m^n * T^{m+n+1}}{m+n+1} \quad (3.36)$$

K', m e N: constantes empíricas obtidas por regressão múltipla pelo método dos mínimos quadrados:

$$m+n+1 = M \quad (3.37)$$

$$\frac{k^1}{m+n+1} = K \quad (3.38)$$

Outros modelos para análise da cinética de inativação estão disponíveis nas literaturas de referência; como em WEF (1996b), DANIEL (1989), DANIEL (1993) entre outros.

3.8 Aspectos econômicos da desinfecção de efluentes

Entre outros aspectos, o custo de uma unidade de tratamento é um fator de seleção ou limitante na adoção de uma técnica disponível, no caso específico deste estudo, na desinfecção de esgotos domésticos. No entanto, de forma geral, a literatura nacional não dispõe de muitas informações precisas, estando ainda incipiente no desenvolvimento de pesquisas que abordem os aspectos econômicos relevantes dos processos de desinfecção de esgotos existentes.

De acordo com Jordão e Pessoa (2005), existe ainda grande desuniformidade de custos encontrados nos projetos nacionais de estações de tratamentos de esgotos, devido não somente a fatores externos ao processo de tratamento, como também de natureza econômica como inflação, moeda nacional e custos

financeiros. Segundo os autores, não se recomenda utilizar integralmente as curvas de custo produzidas em outros países. A transposição desses valores elaborados fora do país para as condições brasileiras deve ser feita levando-se em consideração a diversidade de valores de mão de obra, materiais e equipamentos, entre outros.

Para análise econômica e financeira devem-se computar os custos fixos de investimentos com materiais, peças hidráulicas, montagens de equipamentos e obras civis ainda os custos variáveis das despesas de operação e manutenção, incidentes ao longo do alcance dos projetos.

Segundo Gomes (2009), os gastos fixos devem ser amortizados anualmente e as despesas de exploração devem ser no mesmo tempo, convertidas em valores fixos atualizados. Desta forma, pode-se comparar várias alternativas de projeto e selecionar a de maior viabilidade econômico-financeira, ou seja, a de menor custo total.

A conversão financeira de um custo fixo em amortizações anuais uniformes de capitais dar-se-á a partir do valor presente- VP pelo fator de recuperação de capital-FRC, na qual está fundamentada numa equação aritmética financeira:

$$FRC = \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.39)$$

i: taxa de anual, decimal;

n: número de anos equivalente à vida útil das instalações ou ao alcance do projeto.

Netshidaulu et al. (2008) compararam os custos da desinfecção de esgoto utilizando cloro líquido e radiação ultravioleta, tomando-se como base de cálculo dosagens de 4 mg/L de cloro e 129 mWs/cm², respectivamente, para inativação total de *Escherichia coli*. Os resultados obtidos indicaram custos totais (implantação + operação) de US\$3,36/hab com cloração e US\$5,12 /hab com radiação UV. Cabe ressaltar que a dose de radiação UV utilizada no estudo foi muito elevada aos padrões conhecidos para desinfecção UV, o que provavelmente, contribuiu para aumento dos custos de operação do sistema.

3 Revisão da Literatura

Leverenz, Darby e Tchobanoglous (2006), avaliaram entre outros, os custos da desinfecção de esgotos (tratados em tanque séptico seguido por sistema de filtração biológica com meio sintético) com sistemas de cloração através de hipoclorito de cálcio e com radiação ultravioleta, nos quais, apresentavam capacidade máxima de tratamento de 1,9 m³/dia e de 16,3 m³/dia, respectivamente. Os experimentos foram realizados na estação de tratamento de esgotos da Universidade da Califórnia - Davis. Como resultado, os autores obtiveram que o custo para implantação do sistema de cloração variava em torno de US\$ 400,00-600,00, o custo anual para reposição das pastilhas de cloro era de US\$ 100,00 e, se utilizado a descloração, o custo aumentaria anualmente em aproximadamente US\$ 110,00; em relação aos custos com o sistema UV, para aquisição e implantação do equipamento, o valor médio foi de US\$ 750,00-1.000,00 com um custo anual sobressalente de US\$ 40-80 para reposição de lâmpadas.

Estudos desenvolvidos por Aisse et al.(2003),no âmbito do PROSAB com desinfecção de esgotopor cloração com hipoclorito de sódio, com dosagens de 6 e 13 mg/L, mostraram que os custos da descloração com bissulfito de sódio na proporção de 1:1 sobrepõem aos da cloração. Para populações de 500 e 2.000 habitantes, o custo da cloração foi de R\$ 0,042/m³ e R\$ 0,045/m³ para a descloração. As eficiências obtidas na remoção de coliformes termotoletantes variaram de 3 a 6 log. Na Tabela 3. 6apresenta-se compilação de custos de implantação e operação de unidades de desinfecção de esgotos por cloração e por radiação UV de algumas ETEs do estado do Paraná.

Tabela 3. 6– Custos de implantação e de operação para processos de desinfecção

Tipo desinfecção	Origem do efluente	População atendida (habitantes)	Vazão (L/s)	Custo unitário de Implantação (R\$/hab)	Custo de implantação (R\$)	Custo de operação (R\$/m ³)
Cloro gasoso	UASB+FB	71.000	137	3,80	270.000,00	0,012
	UASB+FB	124.000	310	4,83	600.000,00	0,024
Hipoclorito de sódio	UASB+FAN	41.380	88	5,55	230.000,00	0,078
	UASB+lagoa	14.425	40	14,56	210.000,00	0,089
Dióxido de cloro	UASB+FAD	5.844	10	46,83	273.674,00	0,108
Radiação UV	UASB+FB	5.844	10	21,98	128.433,00	0,034

Fonte: JORDÃO E ALEM SOBRINHO (2003)

De Oliveira e Alem Sobrinho (2007), avaliaram entre outros, os custos de implantação e operação de unidades de desinfecção por gás cloro e radiação UV nas seguintes condições: para o cloro foi utilizado uma dosagem de 3,5 mg/L para um tempo de contato de 30 minutos, com 99,99% de eficiência de inativação decoliformes totais e termotolerantes. Para a desinfecção com UV, foi adotada dosagem de 50 mJ/cm², o que acarretou uma inativação mínima e máxima de 99,5% e 99,9%, respectivamente, para os mesmos indicadores citados. Os dados obtidos indicaram custo total (incluindo: energia elétrica, investimentos, manutenção e produtos químicos) de 0,015 R\$/m³ para desinfecção com Cl₂ e de 0,036 R\$/m³ com radiação UV.

O custo de um sistema de desinfecção por UV pode variar em função de algumas características, tais quais se destacam: modelo de reator adotado que se for do tipo comercial, pode diferenciar em função do fabricante; lâmpadas utilizadas, área para instalação; capacidade de tratamento e características do efluente a ser desinfetado. Os custos de operação e manutenção incluem o consumo de energia, produtos químicos utilizados para limpeza das lâmpadas, reparos em equipamentos que, segundo a EPA (2002), representam 2,5% do custo total do equipamento, substituição de lâmpadas e reatores e pessoal.

As lâmpadas de média pressão custam de quatro a cinco vezes mais do que as lâmpadas de baixa pressão. No entanto, deve-se sempre avaliar a relação custo-benefício das duas alternativas para tomada de decisão de projetos. Na Tabela 3. 7 apresenta-se composição de custos de desinfecção UV

3 Revisão da Literatura

incluindo o canal de desinfecção, lâmpadas UV com invólucro de quartzo e reatores para quatro vazões de referência. Nos dois últimos custos estão embutidos preço da entrega dos equipamentos na cidade sede da empresa referenciada.

Tabela 3. 7 – Estimativa média de custos de desinfecção por radiação UV

Vazão de tratamento (m ³ /dia)	Custo (US\$)
19	2.500
95	3.750
49	4.000
98	4.700

Fonte: Adaptado EPA (1999b)

Alves et al.(2004) avaliaram os custos de implantação (para uma população média de 500 habitantes) de um sistema de tratamento de esgotos domésticos, composto por um reator UASB, seguido de um filtro biológico percolador-FBP e uma unidade de desinfecção de radiação UV.É importante ressaltar que o esgoto afluyente a unidade de desinfecção apresentou valores médios de DQO de 80 mg/L, DBO de 27 mg/L e SST de 17 mg/L.A unidade de desinfecção era do tipo tubular, construída em alumínio (DN200). No interior da tubulação foram instaladas quatro lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa pressão com potência unitária nominal de 30 W. Na Tabela 3. 8 apresentam-se os custos globais e per capitapara implantação dos sistemas. Em relação às unidades biológicas, os valores apresentados referem-se ao somatório das duas unidades. Os autores avaliaram também o consumo de energia elétrica do fotorreator UV com funcionamento contínuo, TDH de 30 s e considerando uma tarifa média de R\$ 0,15/KWh. Ao final o custo anual com energia é de R\$ 0,63/habitante.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 3. 8– Custos per-capitas e globais do sistema integrado biológico (UASB + FBP) e de desinfecção UV

Unidades de tratamento	Valores em (R\$)		Valores em (US\$) Cotação média do dólar: R\$ 2,90	
	Per-capita (R\$/hab)	R\$	Per-capita (US\$/hab)	US\$
Biológica (UASB + FBP)	100,00	50.000	34,50	17.250,00
Desinfecção	15,00	7.530,00	5,20	2.600,00

Gadgil et al. (1998) avaliaram o custo da desinfecção de água potável através da radiação UV para comunidades pequenas (1.000 habitantes). O reator utilizado foi fabricado em aço inoxidável com custo estimado de fabricação de US\$ 600,00. O equipamento continha uma lâmpada de 40 W de baixa pressão de mercúrio emersa ao fluxo, vazão de 15L/min e tempo de contato de 12 segundos. O reator foi testado em laboratórios independentes em vários países e os resultados indicaram viabilidade técnica e econômica, ou seja, os exames laboratoriais confirmaram que a unidade de desinfecção era capaz de inativar bactérias e vírus por um custo baixo (US\$0,14/pessoa).

4.0 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Etapas dos experimentos

O trabalho experimental desta pesquisa foi dividido em três etapas: na primeira foram realizados ensaios de caracterização de amostras dos efluentes de uma lagoa facultativa primária proveniente da ETE Ponta Negra (Natal-RN) e de um sistema pilotode tratamento de esgoto composto por um alagado construído. Na segunda etapa, iniciaram-se os testes de desinfecção com radiação UV e avaliaram-se os processos de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos após exposição à radiação UV enaterceira etapa, em paralelo aos ensaios de desinfecção, foram feitos ensaios de medição de intensidade de radiação de lâmpadas UV.

As análises e ensaios de bancada foram desenvolvidos em três laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande do Norte- UFRN (Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental- LARHISA, Laboratório Central de Análise do Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural- NEPGN e Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais) e no Núcleo de Análises de Águas, Alimentos e Efluentes do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte-IFRN.

Em etapa subsequente aos ensaios, foi realizado estudo da relação custo-benefício do sistema de desinfecção proposto através da estimativa dos custos unitários de implantação e manutenção e o custo de operação para três vazões de referência.

4.2 Primeira etapa: ensaios de caracterização dos efluentes

4.2.1 Descrição das unidades de tratamento de esgoto

ETE Ponta Negra

A ETE Ponta Negra, situada em Natal/RN ($5^{\circ}47'42''$ de latitude sul e $35^{\circ}12'34''$ de longitude oeste), é composta por uma unidade de tratamento preliminar constituída de grades de barras e por duas caixas de remoção de areia de canal longo operando alternadamente, além de uma calha Parshall para medição de vazão. Também compõem o sistema um conjunto de três lagoas de estabilização dispostas em série (uma facultativa e duas de maturação). O efluente tratado é infiltrado diretamente no solo. A ETE foi projetada para atender população de 33.514 habitantes, com vazão média afluente de 95 L/s no final de plano (ENGESOFT, 1998). O sistema encontra-se em operação desde o ano 2000, sendo alimentado com água residuária bruta tipicamente doméstica, proveniente de três bacias de esgotamento sanitário. Nas Figuras 4.1 e 4.2 apresentam-se esquema gráfico da planta baixa e vista aérea fotográfica da ETE Ponta Negra, respectivamente. As características físicas e operacionais da ETE encontram-se descritas na Tabela 4. 1.

Figura 4. 1– Esquema gráfico da planta baixa da ETE Ponta Negra, Natal/RN.
Fonte: TINÔCO (2003)

Figura 4. 2– Vista aérea fotográfica da ETE Ponta Negra, Natal/RN.

Fonte: TINÔCO (2003)

Tabela 4. 1- Características físicas e operacionais das lagoas de estabilização da ETE Ponta Negra, Natal/RN.

Reator	Área a meia profundidade (m ²)	Profundidade (m)	Tempo de detenção hidráulica (dia)	Volume (m ³)	Área do fundo (m ²)
Lagoa Facultativa	51.707,31	2,00	12,60	103.414,63	49.665,00
Lagoa de Maturação I	27.360,00	1,50	5,00	41.040,00	26.427,00
Lagoa de Maturação II	27.360,00	1,50	5,00	41.040,00	26.483,00
Total	106.427,30	-	22,60	185.494,83	102.575,00

Fonte: TINÔCO (2003)

Uma parcela da vazão da lagoa facultativa foi direcionada (tubulação em conduto forçado por gravidade) à unidade experimental (UE) de tratamento composto por um alagado construído de fluxo subsuperficial horizontal.

Alagado Construído

A seleção para pós-tratamento de efluente de lagoa facultativa em alagado construído surgiu como alternativa, para verificar sob condições reais, a melhoria das características físico-químicas do esgoto a ser desinfetado. No entanto, o presente estudo se aplica a qualquer efluente com características similares.

O alagado construído projetado é do tipo fluxosubsuperficial horizontal. A unidade tem paredes laterais construídas em alvenaria de tijolo maciço de 25 x 12 x 0,5 m (comprimento, largura e profundidade) e base em concreto magro com declividade de 1% no sentido longitudinal ao fluxo. Utiliza como material de enchimento (leito) brita de 19 mm. Nas Figuras 4.4a, 4.4b e 4.5 apresentam-se planta com detalhes do alagado construído e fotografia em fase anterior ao plantio, ou seja, na ocasião do nivelamento da brita, respectivamente.

Figura 4. 3a – Planta baixa e corte do alagado construído

Figura 4. 3b – Detalhe e corte do alagado construído

Figura 4. 4 – Alagado construído na fase do nivelamento da brita

O alagado construído foi alimentado com vazão de 30 m³/dia, ou 1,25 m³/h de esgoto doméstico tratado proveniente da lagoa facultativa primária da ETE Ponta Negra. De acordo com as características dimensionais e hidráulicas o tempo de detenção hidráulico teórico sem a brita é de 5 dias. A vazão afluyente foi distribuída por um tubo de PVC de 100 mm, perfurado a cada 15 cm, com orifícios de 6 mm de diâmetro, disposto em sentido transversal ao fluxo de forma a equalizar a vazão ao longo da tubulação (Figura 4. 5). A vazão foi ajustada utilizando-se um medidor tipo vertedor triangular inserido na tubulação de entrada do alagado construído (Figuras 4.7e 4.8).

4 Material e Métodos

Figura 4. 5 – Detalhe da distribuição da vazão afluyente no alagado construído

Figura 4. 6 – Medidor de vazão tipo vertedor triangular utilizado para ajuste da vazão afluyente no alagado construído

Figura 4. 7 – Detalhe do medidor tipo vertedor triangular com vazão regularizada

A cultura utilizada como cobertura vegetal do alagado construído foi o *Pennisetum purpureum*, popularmente conhecido como capim elefante. O plantio foi realizado com distribuição homogênea, com espaçamento de 50 cm entre cada muda (Figura 4. 8). A exemplo do efluente da ETE Ponta Negra, o efluente tratado foi infiltrado diretamente no solo.

Figura 4. 8 – Alagado construído com cobertura vegetal

4 Material e Métodos

Após consolidação do plantio, uma amostra vertical do leito foi retirada e colocada em um recipiente de volume conhecido para obtenção do valor mais aproximado do índice de vazios (I_v) do sistema (leito + planta). Para o cálculo prático, adicionou-se um volume de água ao recipiente e mediram-se os volumes absorvido pela planta e residual de água no recipiente. Com o volume residual e por regra de três simples, obteve-se o percentual de I_v do sistema, o qual foi adotado para estimar o tempo de detenção real que é de 2,8 dias.

4.2.2 Seleção dos pontos de coleta

Foram definidos dois pontos de coleta. Uma amostra era coletada na última caixa de passagem da lagoa facultativa primária e a segunda amostra na caixa de passagem na saída do alagado construído, que dá acesso ao sistema de infiltração direta no solo. Na Figura 4. 9 apresenta-se fluxograma de localização da ETE Ponta Negra e da UE com localização dos pontos de coleta.

Figura 4. 9- Fluxograma de localização da ETE Ponta Negra e da unidade experimental de tratamento composto por um alagado construído de fluxo sub-superficial.

4.2.3 Metodologia de coleta e preservação das amostras

Os procedimentos de coleta, preservação e armazenamento das amostras foram realizados conforme procedimentos descritos no APHA et al. (1999).

Para as amostras das análises biológicas de coliformes totais, *Escherichia coli* e *Clostridium perfringens* utilizaram-se frascos de polietileno estéreis, de boca larga, com capacidade de 250 mL. Para a esterilização, os frascos eram levemente tampados, protegidas as bocas com papel alumínio e submetidos à autoclavagem por 15 minutos a 121°C. Na ocasião da coleta, os frascos eram preenchidos até 2/3 de sua capacidade. Imediatamente após a coleta, eram preservados com gelo em caixas térmicas e transportados para o LARHISA.

Para as análises físico-químicas, as amostras foram coletadas mediante enchimento de garrafas plásticas de 2 L de volume, enchendo-as totalmente, lavadas previamente com solução de ácido clorídrico a 10%, enxaguadas com água e posteriormente com água destilada, não havendo necessidade de preservação imediata. Os recipientes também foram transportados para o LARHISA, para os primeiros procedimentos.

4.2.4 Período e frequência de coletas

O período total de amostragem compreendeu de maio de 2008 a janeiro de 2010, com frequência quinzenal, totalizando 41 coletas para o efluente da lagoa facultativa e 31 coletas para o efluente do alagado construído. Cabe destacar que somente a partir de março de 2009 o alagado construído funcionou com o *Pennisetum purpureum* e, por conseguinte, foram obtidos somente 31 dados referentes a este período.

4.2.5 Variáveis analisadas e métodos utilizados

As variáveis físico-químicas e microbiológicas selecionadas com suas respectivas metodologias analíticas estão sintetizadas na Tabela 4. 2.

O método para determinação do *Clostridium perfringens* –L5/213 (1993) preconizado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do estado de São Paulo-CETESB-SP utiliza jarra de anaerobiose para incubação da bactéria. Este equipamento foi substituído por uma selagem com vaselina, usualmente utilizada nos laboratórios do Departamento de Hidráulica e Engenharia Sanitária da EESC-USP. Na Figura 4. 10 apresenta-se ilustração da selagem de vaselina nas etapas presuntivas e confirmativas da metodologia.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 4. 2 - Variáveis analisadas e metodologias analíticas utilizadas

Variável de controle	Metodologia analítica	Referência
Absorvância (254 nm)	Espectrofotometria UV	APHA et al. (1999)
Carbono orgânico total - COT) (mg/L)	Combustão em alta temperatura e análise do gás por radiação IV	APHA et al. (1999)
<i>Clostridium perfringens</i> (NMP/100 mL)	Técnica do número mais provável de colônias	CETESB L5/213 (1993)
Coliformes totais/ <i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)	Membrana filtrante	APHA et al. (1999)
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Potenciometria com eletrodo combinado	APHA et al. (1999)
Diâmetro das partículas (μm)	Difração Fraunhofer/granulômetro por difração a laser -	CILAS (2008)
DQO (mg/L)	Titulometria de refluxo fechado	APHA et al. (1999)
Ferro total (mg/L) (mg/L)	Absorção atômica	APHA et al. (1999)
Fósforo Total - PT (mg/L)	Espectrofotometria com cloreto estanhoso em amostra pré-digerida	APHA et al. (1999)
Nitrato- NO_3 (mg/L)	Espectrofotometria com salicilato de sódio	RODIER (1981)
Amônia- NH_3 (mg/L)	Macro-Kjedhal	APHA et al. (1999)
Nitrogênio orgânico - (mg/L)	Macro-Kjedhal	APHA et al. (1999)
Oxigênio dissolvido - OD (mg/L)	Potenciometria com eletrodo combinado	APHA et al. (1999)
pH	Potenciometria com eletrodo combinado	APHA et al. (1999)
Sólidos Totais - ST (mg/L)	Gravimetria	APHA et al. (1999)
Sólidos suspensos totais - SST (mg/L)	Gravimetria	APHA et al. (1999)
Sólidos totais dissolvidos- STD (mg/L)	Potenciometria com eletrodo combinado	APHA et al. (1999)
Temperatura-T ($^{\circ}\text{C}$)	Termometria com filamento de mercúrio	APHA et al. (1999)
Turbidez (uT)	Nefelometria	APHA et al. (1999)

Figura 4. 10- Ilustração da selagem com vaselina dos tubos de amostras para análise de *Clostridium Perfringens*

4.3 Segunda etapa: ensaios de desinfecção UV, de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos após exposição à radiação UV

Foi inicialmente previsto, como etapa preliminar aos ensaios de desinfecção e de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos após exposição à radiação UV, a medição da intensidade de radiação UV emitida pelas lâmpadas utilizadas no reator de bancada.

O conhecimento prévio da Intensidade possibilita determinar o tempo de exposição necessário para uma determinada dose de radiação. No entanto, devido a dificuldades laboratoriais, essa etapa só foi realizada posteriormente, sem prejuízos para a pesquisa.

Para tanto, foram estimadas cinco doses de radiação volumétrica (20, 40, 60, 80 e 100 mWs/cm³) e partindo-se de uma intensidade de 1,05 mW/cm²/lâmpada, baseada no estudo de Daniel (1993) em condições similares a presente pesquisa, foram calculados os tempos necessários de exposição. Os tempos de contato foram calculados conforme a Equação 4.1.

$$t = \frac{D \cdot L}{I_m} \quad (4.1)$$

t : tempo de exposição (s)

D : dose de radiação UV de comprimento de onda de 254 nm (mWs/cm³)

L : espessura da lâmina líquida (cm)

I_m : intensidade média de radiação UV na lâmina líquida de espessura L (mW/cm²)

4.3.1 Unidade experimental de desinfecção UV

A unidade de desinfecção piloto de radiação UV, com funcionamento em batelada, foi a mesma utilizada em outros experimentos desenvolvidos na Escola de Engenharia de São Carlos-USP. A câmara de desinfecção é constituída de uma caixa retangular em aço inox medindo 44,8 cm de comprimento, 40,2 cm de largura e 10 cm de altura e um refletor removível de alumínio polido medindo 44,4 cm de comprimento, 39,6 cm de largura e 10,0 cm de altura, ambos com 1,5 mm de espessura. O volume útil é de 1,8 L para cada centímetro de espessura de lâmina líquida. Como fonte de radiação foram utilizadas 6 lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio, com potência nominal de 15 W por lâmpada, distribuídas paralelamente no sentido do comprimento do reator.

Para que fosse possível variar a espessura da lâmina líquida mantendo constante a altura entre a superfície do líquido e geratriz inferior das lâmpadas foram construídos quatro adaptadores em aço galvanizado medindo 44,8 cm de comprimento e 40,2 cm de largura, com alturas de 2, 4, 6 e 8 cm. Na caixa inferior foi montada uma cinta, também em aço galvanizado, com abertura que permitiu o encaixe dos adaptadores. As alturas de lâminas líquidas-ALL testadas foram de 2, 4, 6, 8 e 10 cm. Para primeira ALL não foi necessário utilizar nenhum adaptador, pois 2 cm é a altura inicial de referência. Nos demais ensaios, para cada ALL testada, foram adicionados adaptadores a base

4 Material e Métodos

do reator. Para alturas de lâminas líquidas de 4, 6, 8 e 10 cm utilizaram-se adaptadores de 2, 4, 6 e 8 cm, respectivamente.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se esquema gráfico da unidade piloto de desinfecção e ilustrações fotográficas, respectivamente.

Figura 4. 11– Esquema gráfico do reator de desinfecção UV

Figura 4. 12– Reator UV de bancada e adaptadores

4.3.2 Protocolo dos ensaios de desinfecção

A tecnologia da desinfecção UV foi utilizada no efluente final do alagado construído. As coletas foram realizadas de abril de 2009 a janeiro de 2010, geralmente entre 8 e 9 horas, com frequência quinzenal, e *in loco* eram medidos temperatura, pH, sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica. As amostras eram encaminhadas ao Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental- LARHISA da UFRN e submetidas a ensaios de

4 Material e Métodos

desinfecção UV por batelada. A metodologia de coleta e preservação das amostras foi a mesma descrita no item 4.2.3.

Inicialmente o reator era ligado por 15 minutos para aquecimento das lâmpadas (em todos os ensaios foram ligadas simultaneamente as seis lâmpadas). Em cada ensaio o reator era preenchido com esgoto, variando-se altura da lâmina líquida (2, 4, 6, 8 e 10 cm) e tempos de contato.

Em cada ensaio era coletada uma amostra do efluente do alagado construído não desinfetado e avaliados os seguintes parâmetros: coliformes totais; *Escherichia coli*; *Clostridium perfringens*; absorvância a 254 nm; carbono orgânico total; sólidos totais; sólidos suspensos e ferro total e cinco amostras distintas do efluente desinfetado (amostras oriundas de diferentes dosagens de radiação aplicadas) e analisados os indicadores microbiológicos.

Para cada cinco alturas de lâmina líquida foram realizadas três campanhas amostrais para cinco dosagens de referência, o que totaliza 90 amostras (75 desinfetadas e 15 amostras sem desinfecção). Os exames microbiológicos foram realizados com diluições que variaram de 2 a 4, dependendo das características do efluente não desinfetado. Na Tabela 4. 3 apresenta-se resumo do planejamento experimental.

Cabe ressaltar que, como nos ensaios foram utilizados simultaneamente seis lâmpadas, a intensidade média de radiação na superfície foi de $6,3 \text{ mW/cm}^2$, representando a intensidade de uma lâmpada versus o número de lâmpadas, ou seja, $I_m = 1,05 \text{ mW/cm}^2 \times 6 \text{ lâmpadas} = 6,3 \text{ mW/cm}^2$.

Tabela 4. 3– Planejamento experimental dos ensaios de desinfecção por radiação ultravioleta.

Intensidade média de radiação na superfície (mW/cm ²)	Espessura da lâmina líquida (cm)	Dose aplicada estimada (mWs/cm ³)	Tempo de exposição calculado (s)
6,3	2	20	6
6,3	2	40	13
6,3	2	60	19
6,3	2	80	25
6,3	2	100	32
6,3	4	20	13
6,3	4	40	25
6,3	4	60	38
6,3	4	80	51
6,3	4	100	63
6,3	6	20	19
6,3	6	40	38
6,3	6	60	57
6,3	6	80	76
6,3	6	100	95
6,3	8	20	25
6,3	8	40	51
6,3	8	60	76
6,3	8	80	102
6,3	8	100	127
6,3	10	20	32
6,3	10	40	63
6,3	10	60	95
6,3	10	80	127
6,3	10	100	159

Posteriormente, foi realizado ensaio de medição de intensidade de radiação pelo método de actinometria e corrigidas as doses reais de radiação.

4.3.3 Fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismo após exposição à radiação UV

Adotou-se o mesmo planejamento experimental já descrito na Tabela 4. 3 para a avaliação da fotorreativação e recuperação de microrganismo no escuro após exposição à radiação UV. Este procedimento foi realizado para os indicadores

4 Material e Métodos

coliformes totais e *Escherichia coli*. As coletas foram realizadas semanalmente, totalizando cinco campanhas, as quais foram realizadas em janeiro de 2010. A metodologia de coleta e preservação das amostras foi a mesma descrita no item 4.2.3.

Para verificação da possibilidade do processo de fotorreativação, uma alíquota de aproximadamente 1 cm de altura de lâmina foi exposta em Becker de vidro de 250 mL, parcialmente tampado com vidro de relógio recoberto com polí cloreto de vinila- PVC com pequenos furos para passagem de ar e expostas ao sol por um período de três horas (Figura 4. 13). As amostras ficaram expostas entre meio dia e três horas da tarde.

Figura 4. 13– Ilustração do procedimento utilizado para análise da fotorreativação de CT e *E.coli* após desinfecção de esgoto com radiação UV

Para análise de recuperação no escuro dos coliformes totais e *E.coli*, uma alíquota de aproximadamente 4 cm de altura de lâmina foi colocada em tubos plásticos, fechados com tampas perfuradas para passagem de ar e vedados com papel alumínio também perfurados para passagem de ar, e colocados em ambiente escuro por três horas (Figura 4. 14)

Figura 4. 14- Ilustração do procedimento utilizado para análise da recuperação no escuro de coliformes totais e *E.coli* após desinfecção de esgoto com radiação UV

O mesmo procedimento foi adotado para as amostras que não foram desinfetadas. Antes e após cada ensaio eram realizados análises dos indicadores microbiológicos selecionados.

4.4 Terceira etapa: medição da intensidade de radiação das lâmpadas UV em comprimento de onda a 254 nm por actinometria e determinação da doses reais de radiação UV

4.4.1 Medição de intensidade de radiação de lâmpadas UV a 254 nm por actinometria

1ª etapa - construção da curva de calibração de Fe^{2+} pelo método da ortofenantrolina de APHA (1999)

Soluções necessárias:

- ✓ Fe^{2+} a $0,4 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$: esta solução foi obtida a partir da diluição de uma solução padronizada de FeSO_4 a $0,1 \text{ mol/L}$. Cabe destacar que essas duas soluções foram preparadas no dia em que foi realizado o ensaio;

4 Material e Métodos

- ✓ 1,10-fenantrolina monoidrato a 0,1 % em água ($C_{12}H_8N_2H_2O$): esta segunda solução foi preparada dissolvendo-se 1,0 g de fenantrolina em 1,0 L de água;
- ✓ solução tampão: em uma balão volumétrico de 1 L misturou-se 600 mL de acetato de sódio a 1,0 N mais 360 mL de H_2SO_4 a 1,0 N e completou-se o volume com água destilada.

Construção da curva:

Volumes de 1,25; 2,5; 3,75; 5,0; 6,25; 7,5; 8,75; 10; 11,25 e 12, 5 mL de solução de Fe^{2+} a $0,4 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ foram adicionados a balões volumétricos de 50 mL, completando-se até 25 mL com H_2SO_4 a 0,1 N e por fim, finalizando o volume de 50 mL com a solução tampão. O mesmo procedimento foi feito para a amostra branca (sem adição da solução de Fe^{2+} a $0,4 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$). As soluções foram homogeneizadas a cada adição de um reagente. A solução final permaneceu em repouso por meia hora para desenvolvimento de cor. A absorvância foi medida no comprimento de onda de 510 nm, com cubeta de quartzo de 1,0 cm de trajetória e em espectrofotômetro ultravioleta/visível SHIMADZU modelo UV-1800. O trabalho foi realizado na ausência de iluminação direta.

2ª etapa - procedimento para formação do cristal ferrioxalato de potássio

Em ambiente escuro e sob agitação, o cristal ferrioxalato de potássio foi preparado a partir da mistura de 3 volumes de oxalato de potássio 1,5 molar com 1 volume de cloreto férrico 1,5 mol/L. Esta solução foi deixada em repouso por 24 horas com posterior evaporação do sobrenadante (em estufa a 60 ± 5 °C) até aproximadamente $\frac{1}{4}$ do volume inicial. Descartou-se o sobrenadante residual e os cristais foram dissolvidos em água destilada. A recristalização foi repetida 3 vezes. Os cristais foram secados a vácuo. A reação de formação do cristal é representada conforme Equação 4.2.

O volume final para cristalização foi de 1 L de oxalato de potássio a 1,5 mol/L mais 333,33 mL de cloreto férrico. Essa mistura foi agitada por 30 minutos com rotação de 10 RPM.

3ª etapa - preparo da solução do ferrioxalato de potássio a 0,006 mol/L

Em um balão volumétrico de 2000 mL foram adicionados 5,894 g de cristais de ferrioxalato de potássio, 1600 mL de água destilada, 200 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 1,0 N e completado o volume final de 2000 mL com água destilada. Esta solução foi preparada em 6 balões volumétricos, totalizando um volume final de 12 L. Todo procedimento foi realizado em ambiente escuro.

4ª etapa - procedimento do ensaio actinométrico

A solução do actinômetro foi irradiada conforme planejamento experimental descrito na Tabela 4. 4. Primeiramente as seis lâmpadas do reator foram ligadas por 15 minutos para pré-aquecimento. Transferiu-se a solução actinométrica para o reator mantendo-se uma lâmina líquida de 1,0 cm, o que corresponde a um volume médio de 1,8 L por cada ensaio. O líquido foi mantido sob agitação por meio de agitador de placa. Em cada etapa, uma amostra era coletada antes da irradiação e depois de cada tempo de exposição para determinação da concentração de Fe^{2+} . Na Figura 4. 15 apresenta-se a posição das lâmpadas no refletor.

4 Material e Métodos

Tabela 4. 4 – Planejamento experimental para ensaio de determinação da intensidade de radiação UV por actinometria

Etapas	Número de lâmpadas	Posição da lâmpada	Tempos de exposição (minuto)		
I	1	3	18,0	24,0	30,0
II	2	2 e 4	9,0	12,0	15,0
III	3	1, 3 e 5	6,0	8,0	10,0
IV	4	1, 3, 4 e 6	4,5	6,0	7,5
V	5	1, 2, 3, 5 e 6	3,6	4,8	6,0
VI	6	1,2,3,4,5, e 6	3,0	4,0	5,0

Figura 4. 15: Posição das lâmpadas no reator

5ª etapa - determinação da concentração de Fe^{2+}

A concentração de Fe^{2+} foi determinada segundo as recomendações do método da Fenantrolina de APHA (1999). Adicionou-se em um balão volumétrico de 50 mL, 0,5 mL de solução irradiada, 5,0 mL de solução 1,10-fenantrolina monoidratada a 0,1% em água, 0,25 mL da solução tampão e por fim, completou-se o volume de 50 mL com água destilada. O mesmo procedimento foi feito para a amostra sem irradiação (branco). A solução foi homogeneizada e posteriormente repousada por 30 minutos para desenvolvimento de cor e medição da absorvância em comprimento de onda

de 510 nm. Para medição da absorvância foi utilizado espectrofotômetro ultravioleta/visível SHIMADZU modelo UV-1800e a leitura realizada com cubeta de quartzo de trajetória de 1,0 cm. A concentração e a taxa de formação de ferro foram calculadas segundo as Equações 4.3 e 4.4, respectivamente.

$$C_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{C_m * V_{bv}}{V_a} \quad (4.3)$$

$C_{\text{Fe}^{2+}}$: concentração de Fe^{2+} na solução de ferrioxalato de potássio irradiada com UV (mg/L);

C_m : concentração de Fe^{2+} obtida pela curva de calibração de determinação de Fe^{2+} (mg/L);

V_{bv} : volume do balão volumétrico (mL);

V_a : volume da alíquota tomada (mL).

$$\text{TFF} = \frac{[C_{\text{Fe}^{2+}}]}{T_{\text{exp}}} * V_r \quad (4.4)$$

TFF: taxa de formação de ferro (mol/min);

$C_{\text{Fe}^{2+}}$: concentração de Fe^{2+} na solução de ferrioxalato de potássio irradiada com UV (mol/L);

T_{exp} : tempo de exposição (min);

V_r : volume do reator (L).

A dose e a intensidade de radiação UV na superfície irradiada foram calculadas utilizando-se as Equações 4.5 e 4.6, respectivamente.

$$D = \frac{[\text{Fe}^{2+}]_d - [\text{Fe}^{2+}]_a}{\phi_{\text{Fe}}} * 4,719 * 10^5 \quad (4.5)$$

D: dose de radiação UV de comprimento de onda de 254 nm (mWs/cm³);

$[\text{Fe}^{2+}]_d$: concentração molar de Fe^{2+} depois da irradiação (mol/L);

$[\text{Fe}^{2+}]_a$: concentração molar de Fe^{2+} antes da irradiação (mol/L);

4 Material e Métodos

ϕ_{Fe} : rendimento quântico de produção de Fe^{2+} no comprimento de onda de 254 nm (1,26 íon grama/Einstein);

$4,719 \times 10^5$: fator de conversão de Einstein de fótons de comprimento de onda de 254 nm para mJ e de íon grama/L para íon grama/cm³.

$$I_m = \frac{D * L}{t} \quad (4.6)$$

I_m : intensidade média de radiação UV incidente na lâmina líquida de espessura L (mW/cm²);

D : dose de radiação UV de comprimento de onda de 254 nm (mWs/cm³);

L : espessura da lâmina líquida (cm);

t : tempo de exposição (s).

Cabe ressaltar que o rendimento quântico de produção de ferro no comprimento de onda de 254 de 1,26 íon grama/Einstein é um valor de referência bibliográfica e que após obtenção do cálculo da dose, o mesmo poderá ser averiguado com base nas equações 4.7 a 4.12.

$$E_{\text{fóton}} = h * f \quad (4.7)$$

$E_{\text{fóton}}$: energia de um fóton (J)

h : constante de Plank ($6,10 \times 10^{-34}$ J.s);

f : frequência da onda (1/s = Hz)

$$f = \frac{C}{\lambda} \quad (4.8)$$

C : velocidade da radiação eletromagnética no vácuo;

λ : comprimento de onda

$$E_{\text{m fótons}} = E * A \quad (4.9)$$

$E_{\text{m fótons}}$: energia de um mol de fótons (J) = 1 Einstein;

A: número de Avogrado ($6,023 \cdot 10^{23}$ fotons/Einstein)

$$E_{\text{abs}} = D \cdot V \quad (4.10)$$

Eabs: energia absorvida no ensaio;

D: Dose de radiação (mWs/cm³ ou mj/cm³);

V: volume irradiado

$$N_{\text{m fotons abs}} = \frac{E_{\text{abs}}}{E_{\text{m fotons}}} \quad (4.11)$$

N_{m fotons abs}: número de mol de fotons absorvidos (mol/fotons)

$$\phi = \frac{C_{\text{m}} \cdot \text{Fe}^{2+}}{N_{\text{m fotons abs}}} \quad (4.12)$$

φ: rendimento quântico (mol Fe²⁺/Einstein);

C_m Fe²⁺: concentração molar de Fe²⁺ no volume irradiado

4.4.2 Determinação das Doses reais de radiação UV

Após determinação da Intensidade média de radiação UV (I_0) incidente na superfície irradiada do reator foram calculadas, para as variações de absorvância das amostras, tempos de contato e alturas de lâminas líquidas testadas, as doses reais de radiação UV aplicadas e recebidas nos ensaios de desinfecção UV e de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos expostos a radiação UV. As doses foram calculadas conforme Equações 4.13 a 4.16.

$$Da = I_0 \cdot t \quad (4.13)$$

$$D_{av} = \frac{I_0 * t}{L} 0,2778 \quad (4. 14)$$

Da: dose aplicada (mWs/cm²)

I₀: intensidade média de radiação UV incidente da superfície irradiada (mW/cm²)

t: tempo de exposição à radiação UV (s);

D_{av}: dose aplicada volumétrica (Wh/m³);

L: espessura da lâmina líquida (cm);

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

$$D_r = I_m * t \quad (4. 15)$$

$$D_r = \frac{I_m * t}{L} 0,2778 \quad (4. 16)$$

D_r: dose recebida (mWs/cm²)

I_m: intensidade média de radiação UV na lâmina líquida de espessura L (Mw/cm²)

D_{rv}: dose recebida volumétrica (Wh/m³)

4.5 Análise econômica do processo de desinfecção UV

Os custos considerados nesta pesquisa relacionam-se aos dispêndios de implantação, operação e manutenção de sistemas de desinfecção de esgoto através do processo da radiação UV. Os custos de operação e manutenção são compostos prioritariamente pelas despesas com energia elétrica e reposição das lâmpadas UV, respectivamente, sendo, portanto, os componentes considerados neste estudo. Cabe ressaltar que os custos decorrentes de salários e encargos de operadores não foram considerados,

sendo os mesmos, computados no custo total da ETE e comuns a qualquer tecnologia de desinfecção adotada.

Para subsidiar a análise econômica do custo de implantação (material e serviços), projetaram-se, com base nos resultados obtidos nos ensaios de bancada, unidades de desinfecção por radiação UV para atender municípios com populações de 5.000, 10.000 e 20.000 habitantes, o que representa vazões de 30, 60 e 120 m³/h, respectivamente.

A escolha das populações para os projetos baseou-se na representatividade de números de municípios do Rio Grande do Norte, do Nordeste e do Brasil com até 5.000, 10.000 e 20.000 habitantes. Segundo dados do IBGE (2000), no Estado do RN 85,55% dos municípios estão inseridos dentro da faixa populacional referida, que em relação ao nordeste corresponde a 69,22% e ao Brasil 71,16%.

Os custos de implantação dos referidos projetos foram comparados aos de reatores industriais com as mesmas capacidades de tratamento. As unidades de tratamentos comerciais foram projetadas, pela empresa, para a desinfecção de esgoto doméstico com as mesmas características físico-químicas e microbiológicas do esgoto estudado, tais quais: absorvância a 254 nm, turbidez, DBO e concentração de sólidos (totais e suspensos), ferro total e *Escherichia coli*.

Os custos de operação foram quantificados, avaliando-se para uma mesma intensidade de radiação UV, as possíveis variações operacionais, ou seja, avaliou-se dose de radiação, tempo de contato ideal, número de lâmpadas e altura de lâmina líquida.

Para quantificação do consumo de energia, foi calculado primeiramente, para as cinco doses volumétricas avaliadas (8,16, 24, 32 e 40 Wh/m³), o número de lâmpadas necessárias para as três vazões citadas. Adotou-se como fonte de radiação UV lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio com 30 W de potência nominal. Foi considerada ainda uma perda de 35% de radiação no refletor de alumínio e 30% pelo envelhecimento da lâmpada.

O número de lâmpadas foi estimado de acordo com a Equação 4.17.

$$n = \frac{QD}{P} \quad (4.17)$$

n: número de lâmpadas

Q: vazão (m³/h)

D: potência aplicada (Wh/m³) ou dose volumétrica média

P: potência disponível de cada lâmpada (W)

E na sequência, calculou-se o consumo de energia, através da Equação 4.18.

$$Ce = P * t \quad (4.18)$$

Ce: consumo de energia (KW/dia)

P: potência disponível de cada lâmpada (KW)

T: tempo de exposição (dia)

Cabe ressaltar que, em virtude da grande variabilidade da tarifa de energia elétrica aplicada nos estados brasileiros, os custos de operação foram diferenciados por regiões, acrescentando-se ainda o valor do estado do Rio Grande do Norte. Na composição do custo estão inseridas alíquotas médias de impostos federais e estaduais aplicados ao consumidor final, a saber: Programa de Interação Social- PIS, Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social- COFINS e Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços- ICMS e, desconto atribuído a serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário.

Foram elaboradas curvas que relacionam o custo de operação em R\$/m³ e em R\$/hab/ano, à dose de radiação UV aplicada nas diferentes regiões do Brasil e no estado do RN.

Adotou-se ainda reposição das lâmpadas a cada um ano, conforme recomendações do fabricante.

Os custos foram quantificados a valores atuais e a valores presentes. Os custos atuais foram estimados com base em preços de mercado e do Sistema Nacional de Pesquisa e Custos e Índices da Construção Civil-SINAPI. Os custos totais dos investimentos a valores presentes foram quantificados através do método do valor presente líquido (VPL), conforme Equação 4.19. Neste

método, obtém-se o valor presente dos gastos anuais de operação e de manutenção que somados ao custo de implantação, determina o valor total presente. Adotou-se taxa de juros anual de 11% considerando o alcance dos projetos para 20 anos.

$$p_2 = A \frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n} \quad (4.19)$$

p_2 = custo total a valor presente (R\$)

A: custo de implantação no 1º ano, (R\$)

i: taxa de juros anual (%)

n: alcance do projeto

4.5.1 Projetos de unidades de desinfecção

Para o dimensionamento das unidades de desinfecção UV foram considerados dados obtidos nos ensaios de batelada realizados em laboratório. Para tanto, selecionou-se a melhor combinação entre as alternativas testadas (altura de lâmina d'água x doses volumétricas utilizadas). Os parâmetros médios adotados foram:

- altura de lâmina líquida: 6 cm,
- dose volumétrica aplicada: 8 Wh/m³
- absorvância máxima: 0,4
- vazões máximas diárias de 30, 60 e 120 m³/h,
- concentração máxima de *E. coli* no afluente: 1,00 x10⁵ UFC/100mL
- concentração máxima de *E. coli* no efluente: 1,00 x 10³ UFC/100mL

Da mesma forma, adotou-se como fonte de radiação UV, lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio com 30 W de potência nominal e perdas de 35%

de radiação no refletor de alumínio e de 30% pelo envelhecimento da lâmpada. O número de lâmpadas foi estimado de acordo com a Equação 4.17.

4.6 Análise estatística dos dados experimentais

Os dados numéricos obtidos nesta pesquisa foram representados pelos principais parâmetros da estatística descritiva. A média aritmética foi utilizada como estimativa da tendência central, excetuando-se para análise de coliformes totais, *Escherichia coli* e *Clostridium perfringens*. Adotou-se neste caso, a média geométrica em virtude desses microrganismos apresentarem crescimento geométrico e, por conseguinte, o resultado é menos influenciado pelos valores extremos de uma série. A mediana foi calculada para indicar o valor central do conjunto de dados. Apresentaram-se os intervalos mínimos e máximos para demonstrar a dispersão ocorrida.

Para cada ensaio, foi realizada análise descritiva das relações existentes entre turbidez; absorvância a 254 nm; concentração de sólidos; diâmetro médio de partículas em 90% da amostra; ferro total e altura de lâmina líquida em relação à eficiência do processo de desinfecção UV. A não utilização de modelos estatísticos deveu-se à significativa variação das características físico-químicas e microbiológicas do esgoto, o que impossibilitou a interpretação dos dados de forma conjunta.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, estão apresentados e discutidos, primeiramente, os resultados de caracterização do sistema de tratamento de esgoto constituído por lagoa facultativa e alagado construído, este utilizado para condicionamento do efluente visando à desinfecção com radiação UV. Na sequência, são expostos os resultados: a) dos ensaios de medição da intensidade de radiação UV a 254 nm; b) da quantificação das doses reais de radiação UV utilizadas nos ensaios de desinfecção, e fotorreativação e recuperação de microrganismos após exposição à radiação UV; c) dos ensaios de desinfecção; d) dos ensaios de fotorreativação e recuperação de microrganismos após exposição à radiação UV; e) e, por último, foco principal deste estudo, análise econômica do processo de desinfecção por radiação UV.

5.1 Caracterização dos efluentes utilizados na pesquisa

Os dados amostrais obtidos no monitoramento da lagoa facultativa da ETE Ponta Negra, bem como na unidade experimental de tratamento de esgoto por alagado construído foram submetidos à análise estatística descritiva, gerando um resumo sobre a tendência predominante e a variabilidade destes dados. Na Tabela 5. 1 apresentam-se os resultados médios obtidos durante o período de amostragem da pesquisa.

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 1 – Resultados da caracterização físico-química e microbiológica dos efluentes da lagoa facultativa e alagado construído

Amostra	Resumo estatístico	VARIÁVEIS																	
		MEDIDOS DIRETO NO LOCAL					ST (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (mg/L)	COT (mg/L)	Nitrogênio orgânico (mg/L)	NH ₃ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PT (mg/L)	C. total (UFC/100 mL)	E. coli (UFC/100mL)	Clostridium Perfringens (NMP/100 mL)	Ferro (mg/L)	Abs (254nm)
		T (°C)	TUR (uT)	pH	OD (mg/L)	COND (µS/cm)													
Lagoa Facultativa	N	30	28	30	21	29	27	13	26	19	14	11	11	22	23	21	6	11	16
	Média	27,3	477	7,3	6,37	360	918	175	448	109	2,58	17,46	1,32	11,09	2,31x10 ⁶	1,92 x10 ⁶	1,31 x10 ⁵	0,67	0,95
	SD	1,52	100	0,4	2,82	48	814	97	223	15	2,39	2,48	0,53	2,87	2,12 x10 ⁶	1,77 x10 ⁶	6,17 x10 ⁵	0,20	0,04
	Min	23,3	298	6,6	2,07	285	330	22	95	81	0,00	13,72	0,38	3,15	5,70 x10 ⁵	4,00 x10 ⁵	4,00 x10 ⁴	0,45	0,90
	Max	30,5	603	8,1	14,86	484	3.727	343	872	130	9,24	21,28	1,96	15,38	7,60x10 ⁶	5,80 x10 ⁶	1,60 x10 ⁶	1,03	1,00
	Mediana	27,4	488	7,3	5,97	360	597	185	448	114	2,10	17,36	1,46	11,63	2,60 x10 ⁶	2,00 x10 ⁶	1,10 x10 ⁵	0,60	0,99
Alagado construído	N	25	23	27	13	27	23	26	5	9	16	16	4	6	27	26	23	19	18
	Média	27,4	53	6,2	3,26	405	298	28	141	20	0,91	18,17	0,34	10,33	7,24 x10 ⁴	2,56 x10 ⁴	1,40 x10 ⁶	1,14	0,52
	SD	1,46	20	0,5	1,08	119	115	34	119	6	1,24	3,85	0,21	3,12	8,10 x10 ⁴	3,61 x10 ⁴	5,68 x10 ⁶	0,59	0,21
	Min	24,0	22	5,5	1,72	242	46	6	54	12	0,28	11,76	0,07	7,89	1,00 x10 ¹	8,00 x10 ¹	2,00 x10 ²	0,16	0,07
	Max	30,0	83	7,9	5,23	626	546	185	345	29	3,92	25,48	0,58	15,92	3,00 x10 ⁵	1,40 x10 ⁵	2,70 x10 ⁷	2,32	0,80
	Mediana	27,0	50	6,1	3,44	404	297	18	120	16	0,42	18,48	0,36	8,94	4,00 x10 ⁴	1,00 x10 ⁴	2,60 x10 ³	1,08	0,55

Nota: T: temperatura; TUR: turbidez; OD: oxigênio dissolvido; COND: condutividade elétrica; ST: sólidos totais; SST: sólidos suspensos totais; DQO: demanda bioquímica de oxigênio; COT: carbono orgânico total; NH₃: nitrogênio amoniacal; NO₃: nitrato; PT: fósforo total e ABS: absorvância em comprimento de onda de 254 nm.

5.1.1 Temperatura

A temperatura média obtida no efluente da lagoa facultativa foi de 27,3 °C. Os valores variaram de um mínimo de 23,3 °C a um máximo de 30,5 °C, refletindo as diferentes estações climáticas da região nordeste (períodos secos e chuvosos). Temperaturas elevadas favorecem a eficiência do processo de depuração nas lagoas, uma vez que aumenta as velocidades de fotossíntese e de metabolismo dos organismos. No efluente do alagado construído, a temperatura média obtida foi de 27,4°C, com mínima de 24,0 °C e máxima de 30 °C.

A amplitude entre o valor mínimo e máximo obtido (7,2 °C para a lagoa facultativa e 6,0 °C alagado construído) também foram influenciados pelo horário de coleta, geralmente entre 8:00 e 11:00 horas.

Na Figura 5. 1 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de temperaturas obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 1 – Temperaturas -valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.2 pH

A análise dos dados apresentados na Tabela 5. 1 permite afirmar que os valores de pH da lagoa facultativa estão dentro da faixa esperada. Os valores de pH variaram entre condição próxima a neutro (6,6) e alcalino (8,1). Devido estarem relacionados com a temperatura do meio líquido, estes dados também estão associados com o horário das coletas. Como se sabe, neste tipo de sistema o pH é variável ao longo do dia e da profundidade da lâmina líquida. Valores mais baixos de pH são provenientes das coletas realizadas no início da manhã quando existe maior disponibilidade de dióxido de carbono- CO_2 natural da atividade de respiração noturna. Os maiores valores correlacionam-se com o consumo de dióxido de carbono e produção de oxigênio pela atividade fotossintética ao longo do dia. O pH médio no efluente do alagado construído apresentou características de meio levemente ácido

(6,2), com variações entre 5,5 a 7,9.

Na Figura 5. 2 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de pH obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 2- pH- valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.3 Turbidez

A turbidez não é um parâmetro usual de controle operacional nas estações de tratamento de esgoto, no entanto, é empregada para avaliação no desempenho da desinfecção por radiação UV. Os sólidos em suspensão absorvem ou dispersam a radiação UV e podem servir de proteção para microrganismos patogênicos. Em 28 amostras, a turbidez no efluente da lagoa facultativa variou entre 298 a 603 uT. O efluente do alagado construído (23 amostras) apresentou valores entre 22 a 83 uT. Muito embora tenha-se obtido elevada eficiência na remoção da turbidez entre as duas unidades de tratamento (a

eficiência média foi de aproximadamente 88,8%), a turbidez remanescente no alagado construído (média de 53 uT) é considerada inadequada ($\leq 5\text{uT}$), segundo fabricantes de reatores UV, para indicação do processo de desinfecção por radiação UV. Na Figura 5. 3 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de turbidez obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 3— Turbidez-valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.4 Sólidos totais e sólidos suspensos totais (STe SST)

Como já explicitado no item anterior, os sólidos influenciam negativamente na eficácia da radiação UV. De acordo com dados da literatura, a concentração média de sólidos SST deve ser baixa (menor que 30 mg/L) para que se obtenha melhor penetração da radiação no meio.

Como já esperado em relação aos sólidos, os dados de caracterização apresentaram grande variabilidade (com significativa dispersão) e evidenciaram elevada concentração de sólidos totais nos dois efluentes, ou seja, os STda

lagoa facultativa variaram entre 330 a 3.727 mg/L (média de 918 mg/L e SD de 814 mg/L). O alagado construído não proporcionou eficiência satisfatória na remoção de ST (eficiências médias aproximadas de 67 %), com concentrações mínimas e máximas de 46 e 546 mg/L, respectivamente.

Em relação aos sólidos suspensos, o efluente da lagoa facultativa apresentou valores mínimo, médio e máximo de 22, 175 e 343 mg/L, respectivamente, diminuindo no alagado construído para 6, 28 e 185 mg/L, respectivamente. A remoção média de SST foi de aproximadamente 85% no alagado construído condicionando o efluente final a limites médios satisfatórios à desinfecção pelo processo de radiação UV.

Na Figura 5. 4 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de SST obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 4– SST-valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.5 Condutividade elétrica

As duas unidades avaliadas (lagoa facultativa e alagado construído)

apresentam elevados valores de condutividade elétrica, com leituras de 360 a 405 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. As altas condutividades elétricas estão associadas à grande concentração de sólidos dissolvidos totais-SDT, principalmente no efluente da lagoa facultativa, com 743 mg/L, caracterizando-se como esgoto forte segundo Jordão e Pessoa (2005). O efluente do alagado construído apresentou em média SDT de 270 mg/L. Na Figura 5. 5 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de condutividade elétrica obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 5—Condutividade elétrica CE - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.6 Oxigênio dissolvido (OD)

Efluentes de lagoas facultativas podem apresentar concentrações de OD elevadas em decorrência principalmente da produção de O_2 pelas algas e, em sua minoria, pela difusão de O_2 da atmosfera na lagoa. Assim como o pH, o OD varia com a profundidade da lâmina líquida e ao longo do dia. A ação dos ventos dá-se predominantemente na camada superficial da lagoa o que

favorece a transferência de O_2 . As algas, como produtoras de O_2 , localizam-se preferencialmente nas camadas superiores para que possam absorver a energia da luz solar e convertê-la em energia química. Em 21 amostras analisados a média de OD foi de 6,37 mg/L, com variações significativas entre 2,07 e 14,86 mg/L.

Em relação ao efluente do alagado construído de escoamento subsuperficial, obteve-se concentrações de oxigênio dissolvido que propiciam degradação de matéria orgânica por via aeróbia. A concentração média obtida foi de 3,26mg/L, com valores mínimos e máximos de 1,72 e 5,23 mg/L, respectivamente.

Na Figura 5. 6 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de OD obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 6– OD - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.7 Demanda química de oxigênio (DQO)

A média obtida para a DQO no efluente da lagoa facultativa foi elevada (448 mg/L) quando comparada a valores típicos deste sistema, comumente a DQO de lagoas facultativas situa-se entre 120 e 200 mg/L (Von Sperling, 2005). No entanto, o valor encontrado, assemelha-se com os estudos de Araújo et al. (2003) que apresentaram resultados de monitoramento (nove meses) em seis lagoas facultativas primárias localizadas na área metropolitana de Natal-RN, sendo uma delas, a mesma utilizada nesta pesquisa. Os resultados médios obtidos no efluente foram de 405 mg/L (para a lagoa facultativa da ETE Ponta Negra) e variando entre 199 a 510 mg/L para as demais lagoas. Meneses (2006), estudando a biodegradabilidade da matéria orgânica no efluente do sistema de lagoas de estabilização da ETE Ponta Negra em Natal-RN, encontrou valor médio de DQO de 425 mg/L com variações entre 371 a 483 mg/L.

A DQO no efluente do alagado construído variou entre 54 e 345 mg/L, com valor médio de 141 mg/L. Em relação à remoção de carga orgânica nesta unidade, os resultados indicam baixa eficiência, com percentual médio de 68,5 %.

Deve-se considerar que os valores elevados de DQO podem ter sido influenciados pela possível presença de cloretos nos efluentes (comum em cidades litorâneas), gerando uma demanda de oxigênio que pode ter causado interferência no resultado final. Outro aspecto importante é que, segundo estudo de Santos (2010), há perda de eficiência em sistemas de tratamento de esgotos pela presença de cloretos.

Na Figura 5. 7 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de DQO obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 7– DQO - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.8 Carbono orgânico total (COT)

As concentrações mínimas, médias e máximas de COT no efluente da lagoa facultativa foram de 81, 109 e 130 mg/L, respectivamente. No efluente do alagado construído os valores mínimos, médio e máximos foram de 12, 20 e 29 mg/L, respectivamente. Conceitualmente, esperava-se que os alagados construídos removessem satisfatoriamente a matéria orgânica carbonácea presente, o que se confirmou, pois diferentemente da DQO, as remoções de matéria orgânica medida como COT foram mais significativas nas duas unidades avaliadas (lagoa facultativa e alagado construído). A eficiência média de remoção carbonácea foi de aproximadamente 76 e 86% nas duas unidades, respectivamente. Na Figura 5. 8 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de COT obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 8— COT-valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

A relação COT/DQO para a lagoa facultativa e alagado construído foi de 0,24 e 0,14, respectivamente. A diminuição na relação COT/DQO entre as duas unidades indica aumento na remoção da fração orgânica carbonácea no alagado construído.

5.1.9 Absorvância em comprimento de onda de 254 nm

A absorvância de uma amostra de esgoto é um parâmetro particularmente importante quando da decisão de se utilizar a desinfecção pelo processo de radiação UV. A absorvância está diretamente relacionada com as concentrações de sólidos suspensos, de compostos de ferro e de substâncias húmicas.

A absorvância medida no efluente da lagoa facultativa variou entre 0,90 e 1,00, com média de 0,95. Estes valores são elevados e ultrapassam aos valores

típicos de esgoto primário (0,5 a 0,9). Em relação ao efluente do alagado construído, diferentemente da lagoa facultativa, a absorvância apresentou maior variabilidade (desvios padrões de 0,2). O valor médio no efluente do alagado construído foi de aproximadamente 0,52. Absorvância de 0,52 enquadra-se, segundo dados apresentados por Jordão e Pessoa (2005), como valor típico limite de efluente secundário filtrado (0,25 a 0,50), como é o caso de um alagado construído.

O alagado construído contribuiu para melhoria da qualidade do efluente a ser desinfetado, uma vez que nesta unidade foram removidas algumas substâncias de elevado potencial de absorção de radiação UV, o que propicia redução da dose de radiação UV a ser aplicada. No entanto, os valores obtidos ainda são elevados para desinfecção do esgoto com radiação UV. Na Figura 5. 9 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de absorvância obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 9— Absorvância - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.10 Ferro Total

De acordo com recomendações da NatutaITec (2010) e outros representantes de equipamentos de desinfecção UV, o teor máximo de ferro total na amostra a ser desinfetada deve ser de 0,3 mg/L. No entanto, conforme orientações da EPA (1999a), somente o ferro dissolvido (Fe^{2+}) apresenta elevado potencial de absorção de radiação UV. Quanto maior sua concentração na amostra, maior será a dose de radiação UV para a desinfecção. A concentração máxima de ferro dissolvido adotada pela EPA (1999a) é de 0,1 mg/L.

As concentrações de ferro total foram elevadas e crescentes nos efluentes das unidades de tratamento pesquisadas. Os valores médios obtidos foram de 0,67 e 1,14 mg/L para a lagoa facultativa e alagado construído, respectivamente. O incremento de aproximadamente 70% de ferro total na concentração efluente deve-se provavelmente ao acúmulo de ferro precipitado decorrente da não metabolização total do ferro afluente pela cobertura vegetal e ainda pela solubilização do ferro e liberação pelos flocos formados.

Outro aspecto a ser considerado é que, segundo Blake et al. (1987), os metais são mais eficientemente removidos por substratos orgânicos. No entanto, a baixa eficiência de remoção de ferro total não compromete a qualidade do efluente para lançamento em corpos aquáticos que é de até 15 mg/L de Ferro dissolvido, conforme diretrizes da Resolução nº 430/2011 -CONAMA.

Na Figura 5. 10 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de ferro total obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 10– Ferro total - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.11 Nitrogênio orgânico, amônia e nitrato

Em média, as concentrações do efluente da lagoa facultativa foram de 2,58 mg/L de nitrogênio orgânico, 17,46 mg/L de NH_3 e 1,32 mg/L de NO_3^- . Como já esperado, a amônia na lagoa facultativa é predominante e, segundo Von Sperling (2005), as lagoas facultativas em geral apresentam concentrações NH_4^+ maiores que 15 mg/L.

No efluente do alagado construído as concentrações médias de nitrogênio orgânico, amônia e nitrato foram de 0,91, 18,17 e de 0,34 mg/L, respectivamente. De acordo com esses dados, pode-se perceber um aumento não significativo da amônia. Quanto à eficiência de remoção de nitrato pelo alagado construído, esta se deu satisfatoriamente (90,34%) com concentração no efluente final baixa (0,34 mg/L).

5 Resultados e Discussões

Nas Figuras 5.11 a 5.13 apresentam-se gráficos com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de nitrogênio orgânico, amônia e nitrato, respectivamente obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 11– Nitrogênio orgânico - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

Figura 5. 12– Amônia - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

Figura 5. 13– Nitrato - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.12 Fósforo total

A concentração média de fósforo total no efluente da lagoa facultativa foi de 11,09 mg/L, com variações entre 3,15 e 15,38 mg/L. No efluente do alagado construído, o valor médio obtido para este parâmetro foi de 10,33 mg/L, o que representa baixa eficiência de remoção. No entanto, este resultado corrobora com os estudos de Drizo et al. (1997), Stottmeister et al. (2003) e Neralla et al. (2000), entre outros, que mostram uma baixa assimilação do fósforo pelo vegetal quando comparada com a concentração usual deste nutriente nos esgotos domésticos. Problemas operacionais advindo da facilidade de acesso de terceiros à ETE que, de forma clandestina, realizavam cortes irregulares na cobertura vegetal do alagado construído, causando consequentemente à necessidade de replantio, também contribuiu para o baixo rendimento na remoção de nutrientes no sistema. A decomposição de parte do vegetal não retirado no alagado pode ainda ter contribuído para a manutenção de concentração elevada do fósforo no meio. Na Figura 5. 14 apresenta-se gráfico com valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos de fósforo total obtidos nas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 14– Fósforo total - valores mínimos, médios, médios $\pm$ desvio padrão e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.1.13 Microrganismos indicadores

As concentrações de microrganismos obtidas para coliformes totais, *Escherichia Coli* e *Clostridium perfringens* apresentaram valores médios no efluente da lagoa facultativa de $2,31 \times 10^6$ e $1,92 \times 10^6$ UFC/100 mL e $1,31 \times 10^5$ NMP/100 mL, respectivamente.

O tratamento por alagado construído revelou eficiência de remoção de aproximadamente 2 log para os indicadores coliformes totais, *Escherichia Coli*, com concentração média residual de $7,24 \times 10^4$ e $2,56 \times 10^4$ UFC/100 mL, respectivamente.

Quanto ao *Clostridium Perfringens*, este indicador no alagado construído, apresentou concentração média no efluente maior que no afluente em duas amostras analisadas. No entanto, este resultado deve-se provavelmente a influência dos sólidos suspensos totais que possivelmente retiveram maior

5 Resultados e Discussões

quantidade de microrganismos, ou ainda devido à contaminação das amostras. Nas Figuras 5.15 a 5.17 apresentam-se gráficos com valores mínimos, medianos, percentis e máximos de coliformes totais, *Escherichia Coli* e *Clostridium perfringens*, respectivamente obtidos nas duas unidades de tratamento analisadas.

Figura 5. 15– Coliformes totais - valores mínimos, mediano, percentis e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

Figura 5. 16– *Escherichia Coli* - valores mínimos, mediano, percentis e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

Figura 5. 17– *Clostridium Perfringens* - valores mínimos, mediano, percentis e máximos obtidos nos efluentes da lagoa facultativa e do alagado construído

5.2 Ensaios de medição da intensidade de radiação UV a 254 nm

A intensidade de radiação ultravioleta em comprimento de onda de 254 nm no interior do reator foi medida por actinometria com ferrioxalato de potássio obtendo-se como resposta a intensidade média de radiação para diferentes combinações de tempos de exposição da solução irradiada e número de lâmpadas ligadas.

Na Tabela 5. 2 apresentam-se para as combinações de números de lâmpadas acionadas e tempos de contatos utilizados, resultados da taxa de formação de ferro dissolvido (TFF-Fe²⁺), dose de radiação UV (D) e intensidades médias de radiação UV a 254 nm (I_0) e rendimento quântico, o qual, foi estimado a partir da quantificação da dose de radiação UV. Os valores foram obtidos utilizando as equações 4.4 a 4.12, respectivamente.

Taxa de formação de Fe²⁺:

A taxa de formação de Fe²⁺ apresentou correlação linear com I_0 (intensidade média de radiação na superfície da solução actinométrica, excluindo-se para análise os resultados para as combinações de 5 lâmpadas com tempo de contato de 6 minutos e 6 lâmpadas e tempo de contato de 4 minutos em função de inconsistências dos dados. Este comportamento pode ser visualizado na Figura 5. 18. A razão entre a taxa de formação de Fe²⁺/intensidade de radiação manteve-se constante em todas as combinações testadas, com valor de 0,00028 (mol/min)/(mW/cm²).

Figura 5. 18– Taxa de formação de Fe^{2+} para diferentes intensidades de radiação UV

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 2 – Doses de radiação UV, Intensidades de radiação UV e taxa de formação de Fe²⁺

Número do ensaio	Número da lâmpada	Número de lâmpadas acionadas	Tempos de exposição (min)	Intensidade de radiação na superfície (mW/cm ²)	Intensidade de radiação na superfície (mW/cm ²)/ lâmpada	Dose (mWs/cm ³)	Taxa de formação de Fe ²⁺ , (mol/min)	φ- Rendimento quântico (mol Fe ²⁺ /Einstein)
1.1	3		18	1,08	1,08	1.169	0,00030	1,36
1.2	3	1	24	1,01	1,01	1.456	0,00028	1,60
1.3	3		30	1,12	1,12	2.019	0,00032	1,42
2.1	2 e 4		9	2,34	1,17	1.264	0,00066	1,80
2.2	2 e 4	2	12	2,57	1,29	1.852	0,00072	1,50
2.3	2 e 4		15	2,52	1,26	2.271	0,00071	1,42
3.1	1, 3 e 5		6	5,01	1,67	1.804	0,00141	1,51
3.2	1, 3 e 5	3	8	4,59	1,53	2.205	0,00129	1,57
3.3	1, 3 e 5		10	4,26	1,42	2.559	0,00120	1,60
4.1	1, 3, 4, e 6		4,5	7,99	2,00	2.157	0,00225	1,73
4.2	1, 3, 4, e 6	4	6	7,62	1,91	2.745	0,00215	1,59
4.3	1, 3, 4, e 6		7,5	7,20	1,80	3.242	0,00203	-
5.1	1, 2, 3, 5 e 6		3,6	13,70	2,74	2.960	0,00386	1,38
5.2	1, 2, 3, 5 e 6	5	4,8	12,03	2,41	3.464	0,00339	-
5.3	1, 2, 3, 5 e 6		6	-	-	-	-	-
6.1	1, 2, 3, 4, 5, 6		3	18,01	3,00	3.242	0,00507	0,86
6.2	1, 2, 3, 4, 5, 6	6	4	-	-	-	-	-
6.3	1, 2, 3, 4, 5, 6		5	32,86	5,48	9.857	0,00926	0,51

Nota: - Valores incoerentes e excluídos

Doses de radiação UV:

Era de se esperar que, pela lei da fotoquímica, o produto da reação se mantivesse inalterado se mantida a constante da dose (intensidade x tempo de exposição). No entanto, percebem-se em alguns casos, (Tabela 5. 2) maiores doses para tempos de exposições menores. Este comportamento pode estar associado ao aumento excessivo na temperatura ótima de trabalho da lâmpada (em torno de 40°C), o que pode ter ocasionado perda de intensidade. Na Figura 5. 19 apresenta-se para cada grupo de número de lâmpadas ligadas, as doses de radiação UV (mWs/cm^2) em função do tempo de exposição.

Figura 5. 19-Doses de radiações UV (mWs/cm^2) em função do tempo de exposição e do número de lâmpadas ligadas.

Intensidades máximas das lâmpadas em função dos dados do fabricante:

De acordo com informações do fabricante, a potência efetiva máxima de uma lâmpada UV de 15 W é de 4,7 W. Por conseguinte, e sabendo que a área do reator de bancada sujeita a irradiação é de $1.800,96 \text{ cm}^2$, a intensidade máxima de radiação UV prevista é de $2,6 \text{ mW}/\text{cm}^2/\text{lâmpada}$ ou $15,6 \text{ mW}/\text{cm}^2$ para o conjunto de seis lâmpadas. Cabe ressaltar que a intensidade é energia total/área de irradiação.

Intensidades medidas por actinometria:

Ponderando-se os erros experimentais e, comparando-se as intensidades máximas das lâmpadas previstas pelo fabricante com os dados de intensidades obtidos nos ensaios por actinometria, tem-se:

Com exceção dos ensaios 5.1 (2,74 mW/cm²), 6.1 (3,00 mW/cm²) e 6.3 (5,48 mW/cm²), todos os ensaios de actinometria validados (não excluídos da Tabela 5.2) apresentaram intensidades de radiações UV/lâmpada inferiores ao máximo valor previsto pelo fabricante das lâmpadas UV, que foi de 2,6 mW/cm². No entanto, de forma geral, as intensidades medidas situaram-se bem abaixo do valor máximo estimado, provavelmente devido a perdas pelo refletor (35%) e pelo envelhecimento das lâmpadas utilizadas (30%). Percentualmente, a perda de emissão foi de 57 a 61%, de 51 a 55%, de 36 a 45%, de 23 a 31% para 1, 2, 3 e 4 lâmpadas ligadas, respectivamente. Para o conjunto de 5 lâmpadas, os valores foram próximos aos estimados, com exceção do ensaio de número 5.3 (valor não coerente e excluído). Os ensaios com 6 lâmpadas ligadas apresentaram intensidades médias elevadas e superiores ao valor máximo estimado (15 % no ensaio 6.1 e 111% no ensaio 6.3). Assim como no ensaio 5.3, o ensaio 6.2 apresentou valor conflitante e foi considerado inválido.

Pesquisa desenvolvida por Daniel (1993) em ensaios com de tempos de exposições semelhantes, porém, com reator UV dotado de seis lâmpadas de 30 W/lâmpada de baixa pressão, quantificou por meio de ensaio actinométrico, intensidade média de radiação por lâmpada ainda menor (1,05 mW/cm²), resultado este válido somente para intensidade em que o rendimento quântico foi constante. Coletti (2003), seguindo o mesmo procedimento de ensaio adotado por Daniel (1993) e com uso de lâmpada de 15 W de potência, obteve resultado de intensidade média de radiação UV/lâmpada de 1,03 mW/cm². Ressalta-se, restringindo-se na análise as combinações de 6 lâmpadas, que as intensidades medidas por cada número de lâmpadas ligadas apresentaram pequenas flutuações, com desvio mínimo padrão (SD) de 0,05 para o grupo de uma lâmpada acionada e desvio máximo padrão de 1,18 para o grupo de cinco lâmpadas ligadas, afirmando a coerência dos dados. Cabe destacar os demais valores encontrados para SD: 0,12 para 2 lâmpadas, 0,37 para 3 lâmpadas, 0,39 para 4 lâmpadas e 10,5 para 6 lâmpadas.

Como já esperado, a intensidade de radiação elevou-se com acréscimo no número de lâmpadas acionadas. No entanto, apesar de não existir influência do tempo de exposição na intensidade de radiação, as intensidades de radiações foram menores para maiores tempos de exposição, provavelmente esta relação pode estar associada com maior perda de energia pelo aquecimento das lâmpadas acima do ideal (40°C). Esta variabilidade não é verificada de forma proporcional, já que existe a interferência conjunta de duas variáveis (quantidade de lâmpadas e tempo de exposição).

5.3 Quantificações das doses reais de radiação UV

As doses de radiação UV reais (aplicadas e recebidas) no esgoto tratado utilizado nos experimentos de desinfecção e de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos após radiação UV, foram quantificadas com base nas equações 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, e estão apresentadas nas Tabelas 5.3 a 5.8 para cada grupo analisado (altura de lâmina líquida e tempo de exposição).

Para base de cálculo utilizou-se a intensidade média de uma lâmpada medida por actinometria (1,54 mW/cm²) nos ensaios de 1 a 4 lâmpadas ligadas. Como todos os ensaios foram realizados com 6 lâmpadas ligadas simultaneamente, o I_0 estimado foi de 9,24 mW/cm². Adotou-se para quantificação de I_m , absorvância medida de cada ensaio.

Em decorrência de arredondamentos matemáticos, as doses efetivas aplicadas por volume apresentaram pequenas oscilações entre as diferentes alturas de lâminas líquidas, no entanto como forma de uniformização de dados, as doses volumétricas aplicadas adotadas neste estudo foram de 8, 16, 24, 32 e 40 Wh/m³.

De um modo geral aumentando-se ou diminuindo-se o tempo de exposição à radiação UV, uma mesma dose volumétrica pode ser aplicada em diferentes alturas de lâminas líquidas, desde que se garanta a penetração em toda massa líquida. No entanto, as doses recebidas são diretamente influenciadas pela absorvância da amostra, conforme se visualiza nas Figuras 5.20 e 5.21, ou

5 Resultados e Discussões

seja, quanto maior a absorvância menor é a dose recebida. Mantendo-se constante a absorvância, a dose recebida será somente influenciada pelo tempo de exposição e altura da lâmina líquida.

Nos ensaios de desinfecção, para cada altura de lâmina líquida, foram realizados três ensaios e os demais ensaios foram testados sem repetições.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 3— Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 2 cm

Número do ensaio	Io, (mW/cm ²)	L, espessura da lâmina líquida (cm)	t, tempo de exposição (s)	Da, dose aplicada (mWs/cm ²)	Dav, dose aplicada por volume (Wh/m ³)	Abs (254 nm)	Im, (mW/cm ²)	Dr, dose recebida (mWs/cm ²)	Drv, dose recebida/ volume (Wh/m ³)
1	9,24	2	6	55,44	8	0,4	4,22	25,32	3,52
			13	120,12	17	0,4	4,22	54,87	7,62
			19	175,56	24	0,4	4,22	80,19	11,14
			25	231,00	32	0,4	4,22	105,52	14,66
			32	295,68	41	0,4	4,22	135,06	18,76
			6	55,44	8	0,4	4,22	25,32	3,52
2	9,24	2	13	120,12	17	0,4	4,22	54,87	7,62
			19	175,56	24	0,4	4,22	80,19	11,14
			25	231,00	32	0,4	4,22	105,52	14,66
			32	295,68	41	0,4	4,22	135,06	18,76
			6	55,44	8	0,4	4,22	25,32	3,52
			13	120,12	17	0,4	4,22	54,87	7,62
3	9,24	2	19	175,56	24	0,4	4,22	80,19	11,14
			25	231,00	32	0,4	4,22	105,52	14,66
			32	295,68	41	0,4	4,22	135,06	18,76
			6	55,44	8	0,4	4,22	25,32	3,52
			13	120,12	17	0,4	4,22	54,87	7,62
			19	175,56	24	0,4	4,22	80,19	11,14
			25	231,00	32	0,4	4,22	105,52	14,66
			32	295,68	41	0,4	4,22	135,06	18,76
			6	55,44	8	0,4	4,22	25,32	3,52
			13	120,12	17	0,4	4,22	54,87	7,62
			19	175,56	24	0,4	4,22	80,19	11,14
			25	231,00	32	0,4	4,22	105,52	14,66

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 4– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 4 cm

Número do ensaio	Io, (mW/cm ²)	L, espessura da lâmina líquida (cm)	t, tempo de exposição (s)	Da, dose aplicada (mWs/cm ²)	Dav, dose aplicada por volume (Wh/m ³)	Abs (254 nm)	Im, (mW/cm ²)	Dr, dose recebida (mWs/cm ²)	Drv, dose recebida/ volume (Wh/m ³)
4	9,24	4	13	120,12	8	0,2	4,22	54,87	3,81
			25	231,00	16	0,2	4,22	105,52	7,33
			38	351,12	24	0,2	4,22	160,38	11,14
			51	471,24	33	0,2	4,22	215,25	14,95
			63	582,12	40	0,2	4,22	265,90	18,47
			13	120,12	8	0,5	1,99	25,82	1,79
5	9,24	4	25	231,00	16	0,5	1,99	49,65	3,45
			38	351,12	24	0,5	1,99	75,47	5,24
			51	471,24	33	0,5	1,99	101,29	7,03
			63	582,12	40	0,5	1,99	125,12	8,69
			13	120,12	8	0,6	1,67	21,65	1,50
			25	231,00	16	0,6	1,67	41,63	2,89
6	9,24	4	38	351,12	24	0,6	1,67	63,27	4,39
			51	471,24	33	0,6	1,67	84,92	5,90
			63	582,12	40	0,6	1,67	104,90	7,29

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 5– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 6 cm

Número do ensaio	Io, (mW/cm ²)	L, espessura da lâmina líquida (cm)	t, tempo de exposição (s)	Da, dose aplicada (mWs/cm ²)	Dav, dose aplicada por volume (Wh/m ³)	Abs (254 nm)	Im, (mW/cm ²)	Dr, dose recebida (mWs/cm ²)	Drv, dose recebida/volume (Wh/m ³)
7	9,24	6	19	175,56	8	0,7	0,96	18,15	0,84
			38	351,12	16	0,7	0,96	36,30	1,68
			57	526,68	24	0,7	0,96	54,45	2,52
			76	702,24	33	0,7	0,96	72,60	3,36
			95	877,80	41	0,7	0,96	90,75	4,20
8	9,24	6	19	175,56	8	0,8	0,84	15,88	0,74
			38	351,12	16	0,8	0,84	31,76	1,47
			57	526,68	24	0,8	0,84	47,64	2,21
			76	702,24	33	0,8	0,84	63,52	2,94
			95	877,80	41	0,8	0,84	79,41	3,68
9	9,24	6	19	175,56	8	0,8	0,84	15,88	0,74
			38	351,12	16	0,8	0,84	31,76	1,47
			57	526,68	24	0,8	0,84	47,64	2,21
			76	702,24	33	0,8	0,84	63,52	2,94
			95	877,80	41	0,8	0,84	79,41	3,68

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 6– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 8 cm

Número do ensaio	Io, (mW/cm ²)	L, espessura da lâmina líquida (cm)	t, tempo de exposição (s)	Da, dose aplicada (mWs/cm ²)	Dav, dose aplicada por volume (Wh/m ³)	Abs (254 nm)	Im, (mW/cm ²)	Dr, dose recebida (mWs/cm ²)	Drv, dose recebida/ volume (Wh/m ³)
10	9,24	8	25	231,00	8	0,8	0,63	15,67	0,54
			51	471,24	16	0,8	0,63	31,97	1,11
			76	702,24	24	0,8	0,63	47,64	1,65
			102	942,48	33	0,8	0,63	63,94	2,22
			127	1173,48	41	0,8	0,63	79,62	2,76
11	9,24	8	25	231,00	8	0,6	0,84	20,90	0,73
			51	471,24	16	0,6	0,84	42,63	1,48
			76	702,24	24	0,6	0,84	63,52	2,21
			102	942,48	33	0,6	0,84	85,26	2,96
			127	1173,48	41	0,6	0,84	106,15	3,69
12	9,24	8	25	231,00	8	0,5	1,00	25,07	0,87
			51	471,24	16	0,5	1,00	51,15	1,78
			76	702,24	24	0,5	1,00	76,22	2,65
			102	942,48	33	0,5	1,00	102,30	3,55
			127	1173,48	41	0,5	1,00	127,37	4,42

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 7 – Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de desinfecção com altura de lâmina líquida de 10 cm

Número do ensaio	Io, (mW/cm ²)	L, espessura da lâmina líquida (cm)	t, tempo de exposição (s)	Da, dose aplicada (mWs/cm ²)	Dav, dose aplicada por volume (Wh/m ³)	Abs (254 nm)	Im, (mW/cm ²)	Dr, dose recebida (mWs/cm ²)	Drv, dose recebida/ volume (Wh/m ³)
13	9,24	10	32	295,68	8	0,8	0,50	16,05	0,45
			63	582,12	16	0,8	0,50	31,60	0,88
			95	877,80	24	0,8	0,50	47,64	1,32
			127	1173,48	33	0,8	0,50	63,69	1,77
			159	1469,16	41	0,8	0,50	79,74	2,22
14	9,24	10	32	295,68	8	0,6	0,67	21,40	0,59
			63	582,12	16	0,6	0,67	42,13	1,17
			95	877,80	24	0,6	0,67	63,53	1,76
			127	1173,48	33	0,6	0,67	84,92	2,36
			159	1469,16	41	0,6	0,67	106,32	2,95
15	9,24	10	32	295,68	8	0,5	0,80	25,68	0,71
			63	582,12	16	0,5	0,80	50,55	1,40
			95	877,80	24	0,5	0,80	76,23	2,12
			127	1173,48	33	0,5	0,80	101,91	2,83
			159	1469,16	41	0,5	0,80	127,59	3,54

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 8– Doses reais de radiação UV utilizados nos experimentos de fotoreativação e recuperação no escuro de microrganismos expostos a radiação UV

Número do ensaio	Io, (mW/cm ²)	L, espessura da lâmina líquida (cm)	t, tempo de exposição (s)	Da, dose aplicada (mWs/cm ²)	Dav, dose aplicada por volume (Wh/m ³)	Abs (254 nm)	Im, (mW/cm ²)	Dr, dose recebida (mWs/cm ²)	Drv, dose recebida/volume (Wh/m ³)
16	9,24	2	6	55,44	8	0,4	4,22	25,32	3,52
			13	120,12	17	0,4	4,22	54,87	7,62
			19	175,56	24	0,4	4,22	80,19	11,14
			25	231,00	32	0,4	4,22	105,52	14,66
			32	295,68	41	0,4	4,22	135,06	18,76
17	9,24	4	13	120,12	8	0,4	2,44	31,78	2,21
			25	231,00	16	0,4	2,44	61,12	4,24
			38	351,12	24	0,4	2,44	92,90	6,45
			51	471,24	33	0,4	2,44	124,68	8,66
			63	582,12	40	0,4	2,44	154,01	10,70
18	9,24	6	19	175,56	8	0,4	1,67	31,64	1,46
			38	351,12	16	0,4	1,67	63,27	2,93
			57	526,68	24	0,4	1,67	94,91	4,39
			76	702,24	33	0,4	1,67	126,55	5,86
			95	877,80	41	0,4	1,67	158,18	7,32
19	9,24	8	25	231,00	8	0,4	1,25	31,33	1,09
			51	471,24	16	0,4	1,25	63,90	2,22
			76	702,24	24	0,4	1,25	95,23	3,31
			102	942,48	33	0,4	1,25	127,81	4,44
			127	1.173,48	41	0,4	1,25	159,13	5,53
20	9,24	10	32	295,68	8	0,4	1,00	32,09	0,89
			63	582,12	16	0,4	1,00	63,19	1,76
			95	877,80	24	0,4	1,00	95,28	2,65
			127	1.173,48	33	0,4	1,00	127,37	3,54
			159	1.469,16	41	0,4	1,00	159,47	4,43

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Nota: abs: Absorvância (254 nm) da amostra submetida a desinfecção

Figura 5. 20–Doses de radiações UV recebidas em diferentes alturas de lâminas líquidas - ensaios de desinfecção

Figura 5. 21-Doses de radiações UV recebidas em diferentes alturas de lâminas líquidas - ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro

Ensaio de desinfecção:

Nos ensaios de desinfecção com radiação UV, as doses volumétricas efetivas recebidas variaram entre $0,45 \text{ Wh/m}^3$ para os ensaios realizados com tempo de exposição de 32 s e altura de lâmina líquida de 10 cm e $18,76 \text{ Wh/m}^3$ para os ensaios realizados com o mesmo tempo de exposição e altura de lâmina líquida de 2 cm. Estas variações foram decorrentes das diferentes condições de testes (tempo de contato e altura da lâmina líquida), bem como, das variações da absorvância das amostras.

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que, para os ensaios 1, 2 e 3 de desinfecção (altura de lâmina líquida de 2 cm), as cinco doses recebidas para cada tempo de exposição mantiveram-se constante em função da homogeneidade das absorvâncias das amostras.

As cinco doses recebidas volumétricas variaram entre $3,52$ e $18,76 \text{ Wh/m}^3$. Em relação à dose superficial estes valores representam de $25,32$ e $135,06 \text{ mWs/cm}^2$, respectivamente e segundo International Water Guard Industries-IWGI (2002), estas doses superariam a necessidade requerida para inativação de até 5 log de *Escherichia coli*.

Em decorrência da heterogeneidade das absorvâncias das amostras dos ensaios com altura de lâmina líquida de 4 cm (ensaios 5, 6 e 7), as cinco doses recebidas foram variáveis entre os três ensaios, ou seja, D_v variou entre um mínimo de 1,50 a um máximo de 18,47 Wh/m³ ou D_r entre 21,65 e 265,90 mWs/cm². Em relação ao ensaio 5, o qual foi realizado com esgoto com absorvância de 0,2cm⁻¹ em comprimento de onda de 254 nm, os ensaios 6 (abs: 0,5) e 7 (abs: 0,7), apresentaram-se com redução significativa de absorção de dose, o que representou percentualmente déficit de 53% no ensaio 6 e de 60% no ensaio 7. No entanto, da mesma forma ocorrida nos ensaios 1, 2 e 3, as doses recebidas foram elevadas e por conseguinte, nestas condições, sua aplicação elevaria o consumo energético desnecessário para atendimento de até 1.000 UFC/100 mL de *Escherichia coli*.

Ainda de acordo com a IWGI (2002), as doses máximas recebidas nos ensaios 1 ao 6 seriam suficientes para inativação de até 5 log dos seguintes microrganismos, entre outros: esporos das bactérias *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium*, *Clostridium tetani*, *Streptococcus faecalis*, Poliovírus, e Rotavírus.

Nos ensaios 7, 8 e 9 com alturas de lâminas líquidas de 6 cm foram obtidas para as mesmas doses volumétricas aplicadas, diferenciações de doses recebidas entre o ensaio 7 e os ensaios 8 e 9. A menor absorvância foi verificada na amostra 7 resultando maiores doses (D_v entre 0,74 e 4,20 Wh/m³). Percentualmente, a diferença de 0,1 na absorvância do ensaio 7 (abs: 0,7) e os ensaios 8 e 9 (abs: 0,8) representou uma redução de 12% na dose efetiva recebida. As doses mínimas recebidas, 0,74 Wh/m³ ou 15,88 mWs/cm² (ensaio 7) e 0,84 ou 18,15 mWs/cm² (ensaios 8 e 9) seriam suficiente para inativação de até 5 log da *Escherichia coli* (IWGI, 2002) e provavelmente, atenderia ao padrão de referência deste estudo (até 1.000 UFC/100 mL). Esta afirmação só será verdadeira se mantida uma concentração de *Escherichia coli* de até 10⁸ UFC/100 mL no esgoto a ser desinfetado. Por outro lado, a dose exata adotada pela IWGI é de 11,7 mWs/cm², no entanto, maior dose acarretará em maior eficiência.

As cinco variações de doses recebidas nos ensaios com alturas de lâminas líquidas de 8 cm (ensaios 10, 11 e 12) foram diferenciadas em função da

absorvância de cada amostra. As doses volumétricas recebidas variaram de 0,54 e 2,76 Wh/m³; 0,73 e 3,69 Wh/m³ e 0,87 e 4,42 Wh/m³, para os ensaios 10, 11 e 12, respectivamente. As doses superficiais recebidas foram de 15,67 a 79,62 mWs/cm², 20,90 a 106,15 mWs/cm² e de 25,07 a 127,37 mWs/cm² para os ensaios 10, 11 e 12, respectivamente. Em relação ao ensaio 12 (menor absorvância verificada entre os três ensaios), a redução na dose recebida foi de aproximadamente 16% entre os ensaios 12 (abs: 0,5) e 11 (abs: 0,6) e de 37% entre os ensaios 12 (abs: 0,5) e 10 (abs: 0,8). No entanto, conceitualmente, assim como nos ensaios 7, 8 e 9, as doses mínimas recebidas atenderiam ao valor de referência (até 1.000 UFC/100 mL), porém, estão acima do necessário, o que aumenta os custos com a desinfecção.

Assim como nos ensaios 10, 11 e 12, variabilidade similar percentual de doses se verificou entre os ensaios com alturas de lâminas líquidas de 10 cm. Para os ensaios 13 (abs: 0,8), 14 (abs: 0,6) e 15 (abs: 0,5), as doses mínimas e máximas recebidas foram de 0,45 e 2,22 Wh/m³, 0,59 e 2,95 Wh/m³ e 0,71 e 3,54 Wh/m³, respectivamente. Em relação à dose superficial os valores situaram-se entre 16,05 e 159,47 mWs/cm². Neste caso, aplicam-se as mesmas considerações citadas nos ensaios 7 a 12.

Cabe ressaltar que foram apresentadas, no capítulo de revisão da literatura, recomendações de doses de radiação UV para inativação de bactérias, vírus, protozoários, helmintos e leveduras, no entanto, de forma comparativa utilizaram-se os valores apresentados por IWGI (2002). Outro fator a ser considerado é que os valores propostos pela IWGI referem-se às doses aplicadas, por segurança, os valores quantificados e expressos neste estudo, referem-se à dose efetiva recebida.

Ensaio de fotorreativação e recuperação no escuro dos microrganismos indicadores após exposição à radiação UV:

Nos ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro dos microrganismos indicadores após exposição à radiação UV, a absorvância de todas as amostras testadas foi de 0,4 e, por conseguinte as doses efetivas recebidas foram diferenciadas somente pelo tempo de exposição e altura da lâmina

líquida. As doses recebidas volumétricas variaram entre 0,89 e 6,57 Wh/m³, ou 32,09 a 135,06 mWs/cm².

Segundo Daniel (1993) as doses necessárias de radiações UV para inativação de 99,9% de *Escherichia coli* e *Streptococcus faecalis*, sem e com reativação são de: 4 e 10 mWs/cm² e 8 e 15 mWs/cm², respectivamente. Enquanto que Lindenauer e Darby (1994), afirmam que o efeito da fotorreativação é insignificante em doses superiores a 60mWs/cm². No item 5.6 apresenta-se discussão detalhada sobre os processos de fotorreativação e recuperação no escuro dos coliformes totais e da *Escherichia coli* para as condições analisadas neste estudo.

As elevadas absorvâncias verificadas no esgoto ressaltam a importância de se maximizar a eficiência de tratamento nas unidades que antecedem a desinfecção, mais especificamente na remoção de substâncias de elevado potencial de absorção da radiação UV, como por exemplo, matéria orgânica dissolvida e em suspensão, ferro dissolvido e substâncias húmicas. O consumo energético pela desinfecção por radiação UV é aumentado quando, em função de maior absorvância, se eleva a dose aplicada volumétrica para obter-se uma eficiência requerida. Os resultados obtidos expressam perdas significativas na dose recebida com percentuais aproximados entre 54 a 94% para os ensaios de desinfecção e de 54 a 89% para os ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos após exposição a radiação UV.

5.4 Ensaios de desinfecção

Os dados estão apresentados com ênfase na eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, *Escherichia coli* e *Clostridium perfringense* na sequência, discussão dos fatores intervenientes observados para as condições testadas (influência da absorvância da amostra e do diâmetro das partículas em suspensão).

As variáveis físico-químicas analisadas foram turbidez, absorvância em comprimento de onda de 254 nm, sólidos totais, sólidos suspensos totais,

diâmetro das partículas em suspensão e ferro total. Os resultados estão apresentados diferenciados por alturas de lâminas líquidas testadas.

Nas tabelas 5.9 a 5.13 são apresentadas os resultados dos ensaios de desinfecção com alturas de lâminas líquidas de 2, 4, 6, 8 e 10 cm, incluindo: variáveis físico-químicas selecionadas para caracterização do afluente (efluente do alagado construído) utilizado nos ensaios de desinfecção, doses volumétricas (aplicada e recebidas) de radiação UV, concentração de microrganismos indicadores afluente à desinfecção (N_0), concentração de microrganismos indicadores remanescentes à desinfecção (N), logaritmo de inativação e percentual de inativação de microrganismos indicadores

5.4.1 Ensaios com altura de lâmina líquida de 2 cm

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 9—Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, *E. coli* e *C. perfringens* para ensaios com lâmina líquida de 2 cm.

Ensaio 1 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,4; Turbidez (uT): 48; ST (mg/L): 249; SST (mg/L): 185 Ferro total (mg/L): 0,88 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): 319									
D_{av} (Wh/m ³)	D_{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	1,50x10⁵			3,00x10⁴		8,00x10²		
8	3,52	0,00	-	100,00	ND	100,00	1,30x10 ³	-	-
16	7,62	3,00x10 ¹	3,70	99,98	ND	100,00	2,00x10 ²	0,60	75,00
24	11,14	2,00x10 ¹	3,88	99,99	ND	100,00	2,00x10 ²	0,60	75,00
32	14,66	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,60	75,00
40	18,76	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,60	75,00
Ensaio 2 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,4; Turbidez (uT): 79; ST (mg/L): 329; SST (mg/L): 49 Ferro total (mg/L): 1,08 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): 4,77									
D_{av} (Wh/m ³)	D_{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	Log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	2,00x10⁵			6,00x10⁴		4,00x10³		
8	3,52	0,00	ND	100,00	ND	100,00	4,00x10 ²	1,00	90,00
16	7,62	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,30	95,00
24	11,14	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,30	95,00
32	14,66	0,00	ND	100,00	ND	100,00	6,00x10 ²	0,82	85,00
40	18,76	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,30	95,00
Ensaio 3 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,4; Turbidez (uT): 61; ST (mg/L): 214; SST (mg/L): 23 Ferro total (mg/L): 0,27 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): 4,15									
D_{av} (Wh/m ³)	D_{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	1,80x10⁴			2,0x10³		9,00x10²		
8	3,52	0,00	ND	100,00	ND	100,00	4,00x10 ²	0,35	55,56
16	7,62	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,65	77,78
24	11,14	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,65	77,78
32	14,66	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,65	77,78
40	18,76	0,00	ND	100,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,65	77,78

Notas: Diâmetro da partícula a 90%: 90% das partículas tem diâmetro $\leq$ ao indicado; ND: não determinado e; -: sem eficiência.

As amostras de esgoto tratado utilizadas nos ensaios (1, 2 e 3) de desinfecção de bancada com lâminas líquidas de 2 cm, apresentaram-se homogêneas em relação a absorvância medida, muito embora, a concentração de ferro total tenha variado de um mínimo de 0,27 a 1,10 mgFe/L, possivelmente o ferro contido estava predominantemente na forma oxidada Fe^{3+} (não dissolvido) e por conseguinte não interferiu na absorvância da amostra. As concentrações de ST foram elevadas (valores entre 214 mg/L a 329 mg/L) com maior representatividade da parcela dissolvida, com exceção da amostra do ensaio 1 com SST de 185 mg/L. No entanto, não se observou maior absorção em detrimento desta concentração. Os diâmetros médios das partículas a 90% foram de 319 μm , 4,77 μm e 4,15 μm para as amostras dos ensaios 1, 2, e 3, respectivamente. A turbidez das amostras variaram entre 48 a 79 uT.

A concentração remanescente dos indicadores testados seguiu uma ordem decrescente, sendo: *Clostridium perfringens*, coliformes totais e *Escherichia coli*. Os resultados obtidos de eficiência de inativação de microrganismos indicadores patogênicos indicaram que as doses testadas resultaram na inativação total da *Escherichia coli*. Os coliformes totais foram 100% inativados em 86,7% de quinze amostras analisadas, seguindo de inativação superior a 3 log em 13,33% das amostras. Quanto à bactéria *Clostridium perfringens*, esta, ainda em doses mais elevadas, não apresentou eficiência de inativação muito satisfatória, pois 26,7% das amostras tiveram entre 1 e 1,3 log de inativação. A concentração do *Clostridium perfringens* no efluente desinfetado do ensaio 1 com aplicação de 8 Wh/m^3 foi maior que no esgoto não desinfetado. Este comportamento deve-se provavelmente a influência dos sólidos suspensos totais que possivelmente retiveram na amostra analisada maior quantidade de microrganismos.

Estudo realizado por Bilotta e Daniel (2006) com desinfecção UV de esgoto tratado em nível secundário, mostra eficiências ainda menores para o *Clostridium perfringens*, de 0,2 log com aplicação de 25 Wh/m^3 e de 0,7 log com aplicações de 1,5 Wh/m^3 e 50 Wh/m^3 .

De modo geral, a concentração de sólidos suspensos, turbidez e absorvância são parâmetros limitantes para decisão da utilização da desinfecção por radiação UV. No entanto, os resultados obtidos indicam eficiências de inativação satisfatórias dos indicadores coliformes totais e *Escherichia coli*,

ainda em condições de baixa qualidade do efluente para desinfecção UV. Os valores máximos usuais recomendados são de 30 mg/L para SST (EPA, 1999b), 5 uT (Naturaltec, 2010) e 0,1 de absorvância em comprimento de onda de 254 nm (valor usualmente adotado pelos fabricantes de equipamentos de desinfecção por radiação UV).

Em relação à turbidez, as amostras utilizadas para os ensaios de desinfecção com lâmina líquida de 2 cm apresentaram-se com correlação não esperada, ou seja, para maiores valores de turbidez (amostras 2 e 3) se observou predominantemente maiores eficiências na inativação de microrganismos. No entanto, as menores eficiências obtidas no ensaio 1 podem ser justificadas pela distribuição de tamanho das partículas suspensas (319,56 μm – diâmetro 90%). Geralmente, as dimensões das bactérias variam de 0,5 a 5 μm e possivelmente os sólidos de grandes dimensões estão servindo de abrigo a estes microrganismos.

Por outro lado, as doses de radiações UV utilizadas nos ensaios 1, 2 e 3 foram muito elevadas e por conseguinte, não foi possível determinar a dose mínima necessária para atender ao padrão de referência microbiológica adotado neste estudo (*Escherichia coli* ≤ 1.000 UFC/100 mL). Todos os resultados indicaram inexistência remanescente da *E. coli*.

5.4.2 Ensaios com altura de lâmina líquida de 4 cm

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 10– Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, *E. coli* e *C. perfringens* para ensaios com lâmina líquida de 4 cm.

Ensaio 4 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,2; Turbidez (uT): 78;ST (mg/L): 214;SST (mg/L): ND Ferro total (mg/L): 0,16 e Diâmetro da partícula a 90% (µm): 3,18										
D _{av} (Wh/m ³)	D _{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	E.coli (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	C. perfringens (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	1,60x10 ⁵			1,00x10 ⁴			5,00x10 ³		
8	1,33	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,40	96,00
16	2,56	1,00x10 ¹	4,20	99,99	0,00	ND	100,00	6,00x10 ²	0,92	88,00
24	3,90	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,40	96,00
32	5,23	6,00x10 ¹	3,43	99,96	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,40	96,00
40	6,46	2,00x10 ¹	3,90	99,99	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,40	96,00
Ensaio 5 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,5; Turbidez (uT): 200;ST (mg/L): 316;SST (mg/L): 42 Ferro total (mg/L): 0,22 e Diâmetro da partícula a 90% (µm): 5,76										
D _{av} (Wh/m ³)	D _{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	E.coli (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	C. perfringens (NMP/100 mL)	Log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	1,71x10 ⁵			9,50x10 ⁴			5,00x10 ³		
8	0,63	2,98x10 ⁴	0,76	82,57	2,25x10 ⁴	0,63	76,32	7,00x10 ³	-	-
16	1,21	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	3,00x10 ³	0,22	40,00
24	1,83	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	1,70x10 ³	0,47	66,00
32	2,56	1,00x10 ¹	4,23	99,99	0,00	ND	100,00	4,00x10 ²	1,10	92,00
40	3,04	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	4,00x10 ²	1,10	92,00
Ensaio 6 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,2; Turbidez (uT): 78;ST (mg/L): 214;SST (mg/L): ND Ferro total (mg/L): 0,16 e Diâmetro da partícula a 90% (µm): 6,87										
D _{av} (Wh/m ³)	D _{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	E.coli (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	C. perfringens	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	1,40x10 ⁵			1,00x10 ⁴			3,00x10 ³		
8	0,53	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,18	93,33
16	1,01	2,00x10 ²	2,85	99,86	1,50x10 ²	1,82	98,50	1,10x10 ³	0,44	63,33
24	1,54	2,00x10 ¹	3,85	99,99	4,00x10 ¹	2,40	99,60	2,00x10 ²	1,18	93,33
32	2,06	ND			ND			2,30x10 ³	0,12	23,33
40	2,55	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	1,18	93,33

Notas: Diâmetro da partícula a 90%: 90% das partículas tem diâmetro $\leq$ ao indicado; ND: não determinado e; -: sem eficiência.

A qualidade dos efluentes dos ensaios de números 4, 5 e 6 apresentam-se com variações significativas na turbidez da amostra 5 (200 uT) em relação às amostras 4 (78 uT) e 6 (61 uT) e na concentração de ferro da amostra 6 (1,13 mg/L) em relação as demais (0,16 mg/L para amostra do ensaio 4 e 0,22 mg/L para amostra do ensaio 5). Maior concentração de ST foi observada na amostra do ensaio 5 (316 mg/L) com SST de 42 mg/L. Os diâmetros das partículas suspensas foram relativamente pequenos com valores entre 3,18 μm a 6,87 μm (diâmetro 90%).

Muito embora se tenha observado maior absorvância e maior concentração de ferro na amostra do ensaio 6 é pouco provável que estes dois parâmetros estejam correlacionados. Possivelmente o ferro presente encontra-se na forma oxidada e, por conseguinte não absorve radiação ultravioleta. Cabe ainda ressaltar que os valores de turbidez e de concentração de SST da amostra do ensaio 6 foram os mais baixos em relação aos dados obtidos dos ensaios 11 e 12. Neste aspecto, a maior absorvância medida pode ser justificada pela presença de matéria orgânica e inorgânica dissolvida.

Assim como nos ensaios 1, 2 e 3, a concentração remanescente dos microrganismos indicadores seguiu uma ordem decrescente, sendo: *Clostridium perfringens*, coliformes totais e *Escherichia coli*.

A inativação de coliformes totais atingiu inativação total em 50% das amostras analisadas, diminuindo a eficiência em 36,7% quando comparado aos resultados para a lâmina líqüida de 2 cm para o mesmo indicador. A turbidez elevada da amostra do ensaio de número 6 (200 uT) não influenciou negativamente no resultado para inativação de coliformes totais. A eficiência de inativação foi o maior percentual total de inativação (60%) observado quando comparado aos ensaios 5 (40 %) e 7 (50%). Oitenta por cento das amostras do ensaio 5 submetidas a desinfecção foram 100% inativadas. Estes resultados reafirmam a maior relação da efetividade da desinfecção com o diâmetro da partícula. Muito embora a amostra 5 tenha elevada turbidez e concentração de ST, o diâmetro das partículas em suspensão é de pequena dimensão (5,76 μm – diâmetro a 90%).

A inativação da *Escherichia coli* foi de 100% em 78,6% dos ensaios, seguindo de eficiência entre 0,63 e 2,4 log nas demais amostras. Os resultados obtidos

apresentaram-se com 21,4% de eficiência de inativação inferior em relação aos dados para lâminas líquidas de 2 cm, porém ainda satisfatória, excetuando o ensaio de número 5 para doses de 8 Wh/m³ com concentração remanescente de *E. coli* superior ao padrão de referência adotado (até 1.000 *E. coli*/100 mL).

Da mesma forma ocorrida nos ensaios 1, 2 e 3, as doses de radiação UV utilizadas nos ensaios 4, 5 e 6 foram elevadas e por conseguinte, não foi possível determinar a dose mínima necessária para atender ao padrão de referência microbiológica adotado neste estudo (*Escherichia coli* ≤ 1.000 UFC/100 mL).

Contrariando a tendência decrescente de inativação dos ensaios realizados com alturas de lâminas líquidas de 2 cm e de 4 cm, a resistência à inativação do *Clostridium perfringens* dos ensaios 4, 5 e 6 foi menor que nos ensaios 1, 2 e 3, nos quais aproximadamente 64,3% das amostras apresentaram inativações entre 1,1 e 1,4 log, porém, eficiência não satisfatória. Esse resultado é conflitante com os observados para coliformes totais e *Escherichia coli* e pode ter sido influenciado pela menor interferência dos sólidos suspensos totais na alíquota da amostra analisada. A concentração remanescente da amostra 5 desinfetada com dose de 8 Wh/m³ foi superior ao da amostra não desinfetada. Assim como já explicitado no ensaio com 2 cm de altura de lâmina líquida, este comportamento deve-se provavelmente a influência dos sólidos suspensos totais que possivelmente retiveram na amostra analisada maior quantidade de microrganismos, ou ainda, por contaminação da amostra.

5.4.3 Ensaio com altura de lâmina líquida de 6 cm

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 11– Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, *E. coli* e *C. perfringens* para ensaios com lâmina líquida de 6 cm.

Ensaio 7 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,7; Turbidez (uT): 67;ST (mg/L): 442;SST (mg/L): 17 Ferro total (mg/L): 1,19 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): 3,35										
D_{av} (Wh/m ³)	D_{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	2,3x10⁵			4,00x10⁴			5,00x10²		
8	0,29	1,00x10 ³	2,36	99,57	4,00x10 ²	2,00	99,00	2,30x10 ³	-	-
16	0,59	4,00x10 ¹	3,76	99,98	3,00x10 ¹	3,12	99,93	4,00x10 ²	0,10	20,00
24	0,88	5,00x10 ¹	3,66	99,98	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,40	60,00
32	1,18	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	4,00x10 ²	0,10	20,00
40	1,47	4,00x10 ¹	3,76	99,98	3,00x10 ¹	3,12	99,93	8,00x10 ²	-	-
Ensaio 8 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,8; Turbidez (uT): 75;ST (mg/L): 46;SST (mg/L): ND Ferro total (mg/L): 0,74 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): 2,62										
D_{av} (Wh/m ³)	D_{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	Log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	4,00x10⁴			2,20x10⁴			2,60x10³		
8	0,26	1,00x10 ²	2,60	99,75	1,00x10 ²	2,34	99,55	2,00x10 ²	1,11	92,31
16	0,51	4,40x10 ²	1,96	98,90	6,60x10 ²	1,52	97,00	4,00x10 ²	0,81	84,62
24	0,77	7,70x10 ²	1,72	98,08	4,80x10 ²	1,66	97,82	1,30x10 ³	0,30	50,00
32	1,03	9,00x10 ¹	2,65	99,78	5,00x10 ¹	2,64	99,77	9,00x10 ²	0,46	65,38
40	1,29	7,00x10 ¹	2,76	99,83	3,00x10 ¹	2,87	99,86	4,00x10 ²	0,81	84,62
Ensaio 9 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,8; Turbidez (uT): 75;ST (mg/L): 330;SST (mg/L): 36 Ferro total (mg/L): 1,46 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): 3,57										
D_{av} (Wh/m ³)	D_{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	4,00x10³			2,00x10³			ND		
8	0,26	1,80x10 ³	0,35	55,00	8,00x10 ²	0,40	60,00			
16	0,51	5,30x10 ²	0,88	86,75	4,60x10 ²	0,64	77,00			
24	0,77	2,00x10 ²	1,30	95,00	1,00x10 ²	1,30	95,00			
32	1,03	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00			
40	1,29	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00			

Notas: Diâmetro da partícula a 90%: 90% das partículas tem diâmetro $\leq$ ao indicado; ND: não determinado e; -: sem eficiência.

5 Resultados e Discussões

A absorvância das amostras (7, 8 e 9) medidas no comprimento de onda de 254 nm foram de 0,7 (amostra do ensaio 7) e de 0,8 nas amostras dos ensaios 8 e 9. Assim como nos ensaios com alturas de lâminas líquidas de 2 cm e de 4 cm, a concentração de ferro total foi variável, porém, não influenciou na absorção de radiação UV no esgoto, provavelmente o ferro presente encontra-se da forma oxidada e por conseguinte não absorve radiação ultravioleta. A turbidez medida situou-se entre 67 uT e 75 uT e portanto elevada para os limites usuais para desinfecção UV (até 5 uT). A concentração de ST dos ensaios 7 e 9 foram elevados, no entanto, as concentrações de sólidos suspensos foram baixas e esses sólidos foram de pequenas dimensões (entre 2,62 μm e 3,51 μm – diâmetro 90%).

Em relação aos coliformes totais a distribuição percentual de inativação foi 100% em 20% das amostras, 99,9% em 20%, 99% em 26,66% e menor que 99% em 33,33% das amostras. Comparando-se os dados com lâminas de 4 cm percebe-se uma diminuição significativa de aproximadamente 30% da inativação total dos coliformes totais.

Quanto a *Escherichia coli*, a inativação foi superior quando comparada com os coliformes totais. Aproximadamente em 26,67% das amostras foi obtida inativação total, seguindo de eficiências de inativação de 99,9; 99 e, inferior a 99% para representações percentuais de amostras de 13,33; 26,66 e 31,67%, respectivamente. A perda de eficiência total de inativação deste microrganismo foi de aproximadamente 52% em relação aos testes realizados com alturas de lâminas líquidas de 4 cm, corroborando as recomendações da literatura para que se trabalhe com lâminas delgadas. No entanto, as concentrações remanescentes deste microrganismo ainda satisfazem ao limite máximo estabelecido neste estudo (1.000 UFC/100 mL).

As eficiências de inativação ainda satisfatórias dos coliformes totais e da *Escherichia coli*, podem estar associadas ao pequeno diâmetro das partículas em suspensão, contrariando as recomendações da literatura para desinfecção de efluentes de elevada absorvância, ou turbidez, ou sólidos suspensos totais. Nas doses testadas, os resultados de inativação do *Clostridium perfringens* não foram satisfatórios (inativação máxima de 1,11 log). Cabe ainda destacar que no ensaio 7 para as doses aplicadas de radiação UV de 8 e 41 Wh/m³, o valor remanescente do microrganismo foi maior que o da amostra não desinfetada.

Da mesma forma ocorrida nos ensaios anteriores (com alturas de lâminas líquidas de 2 e 4 cm), este comportamento deve-se provavelmente à influência dos sólidos suspensos totais que possivelmente retiveram na amostra analisada maior quantidade de microrganismos, ou ainda, por contaminação da amostra.

Eficiências predominantemente maiores de inativação do *Clostridium perfringens* foram obtidas recentemente por Medeiros (2010), que avaliou, entre outros microrganismos e desinfetantes, a inativação de *Clostridium perfringens* por radiação UV em esgoto doméstico tratado em nível secundário. Os resultados indicaram eficiências de inativação entre 0,9 a 2,32 log com doses de radiação UV recebidas de 2,5 e 6,1 Wh/m³.

A concentração remanescente dos indicadores seguiu uma ordem decrescente, sendo: *Clostridium perfringens*, coliformes totais e *Escherichia coli*.

5.4.4 Ensaios com altura de lâmina líquida de 8 cm

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 12– Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, *E. coli* e *C. perfringens* para ensaios com lâmina líquida de 8 cm.

Ensaio 10 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,8; Turbidez (uT): 45;ST (mg/L): 335; SST (mg/L): 19 Ferro total (mg/L): 2,32 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): 2,60										
D_{av} (Wh/m ³)	D_{iv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	1,30x10⁵			6,00x10⁴			8,00x10³		
8	0,19	5,00x10 ⁴	0,41	61,54	2,00x10 ⁴	0,48	66,67	3,00x10 ³	0,43	62,50
16	0,39	4,00x10 ³	1,51	96,92	9,00x10 ²	1,82	98,50	7,00x10 ²	1,06	91,25
24	0,58	0,00	ND	100,00	0,00	-	100,00	2,00x10 ²	1,60	97,50
32	0,78	2,50x10 ³	1,72	98,08	5,00x10 ²	2,08	99,17	2,00x10 ²	1,60	97,50
40	0,97	1,00x10 ³	2,11	99,23	4,00x10 ²	2,18	99,33	8,00x10 ²	1,00	90,00
Ensaio 11 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,6; Turbidez (uT): 73;ST (mg/L): 546; SST (mg/L): 17 Ferro total (mg/L): 0,79 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): 17,90										
D_{av} (Wh/m ³)	D_{iv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	Log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	7,80x10⁴			1,04x10⁵			8,00x10²		
8	0,25	8,10x10 ³	0,98	89,62	3,10x10 ³	1,53	97,02	2,00x10 ²	0,60	75,00
16	0,52	5,10x10 ³	1,18	93,46	1,70x10 ³	1,79	98,37	4,00x10 ²	0,30	50,00
24	0,77	9,00x10 ²	1,94	98,85	4,00x10 ²	2,41	99,62	2,00x10 ²	0,60	75,00
32	1,04	6,00x10 ²	2,11	99,23	3,00x10 ²	2,54	99,71	2,00x10 ²	0,60	75,00
40	1,29	0,00	ND	100,00	3,00x10 ²	2,54	99,71	2,00x10 ²	0,60	75,00
Ensaio 12 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,5; Turbidez (uT): 50;ST (mg/L): 474;SST (mg/L): 28 Ferro total (mg/L): 0,79 e Diâmetro da partícula a 90% (μm): ND										
D_{av} (Wh/m ³)	D_{iv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	4,00x10⁴			1,50x10⁴			7,00x10²		
8	0,30	1,90x10 ³	1,32	95,25	4,00x10 ²	1,57	97,33	9,00x10 ²	-	-
16	0,62	1,70x10 ³	1,37	95,75	5,00x10 ²	1,48	96,67	2,00x10 ²	0,54	71,43
24	0,93	2,20x10 ²	2,26	99,45	8,00x10 ¹	2,27	99,47	7,00x10 ²	0,00	0,00
32	1,24	7,00x10 ¹	2,76	99,83	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,54	71,43
40	1,55	8,00x10 ¹	2,70	99,80	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,54	71,43

Notas: Diâmetro da partícula a 90%: 90% das partículas tem diâmetro $\leq$ ao indicado; ND: não determinado e; -: sem eficiência.

As amostras utilizadas nos ensaios 10, 11 e 12 apresentaram-se relativamente homogêneas em relação aos parâmetros de turbidez, SST e ferro total, com exceção de ferro da amostra 10. Muito embora se tenha observado maior absorvância e maior concentração de ferro na amostra do ensaio 10 é pouco provável que estes dois parâmetros estejam correlacionados. Possivelmente o ferro presente encontra-se na forma oxidada e, por conseguinte não absorve radiação ultravioleta. Cabe ainda ressaltar que a turbidez da amostra do ensaio 10 foi a mais baixa em relação aos ensaios 11 e 12. Neste aspecto, a maior absorvância medida pode ter ocorrido devido à presença de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas. A concentração de ST variou entre 335 e 546 mg/L, com parcelas suspensas entre 17 e 28 mg/L. O diâmetro médio de 90% dos sólidos suspensos foi de 2,60 e 17,90 μm para as amostras dos ensaios 10 e 11, respectivamente. Devido a problemas laboratoriais, não foi possível quantificar o tamanho efetivo das partículas sólidas da amostra utilizada no ensaio 12.

Em 13,33% das amostras os coliformes totais foram 100% inativados, o que correspondeu a 2 amostras de um total de 15. As demais se situaram com eficiências de inativação entre 61,5% e 99,8%. Quando se compara os dados apresentados na **Tabela 4.9** com os resultados para os testes com lâmina líquida de 6 cm, pode-se perceber que não houve influência significativa da altura da lâmina líquida na efetividade da desinfecção. A inativação total deste microrganismo diminuiu em 6,67% em relação aos testes com altura de lâmina líquida de 6 cm.

Desempenhos ligeiramente superiores foram observados na inativação da *Escherichia coli*. A eficiência máxima ocorreu em 20% das amostras, seguindo de eficiências entre 66,67 e 99,71%. No entanto, em 80% (12 amostras) das amostras foram obtidas concentrações deste microrganismo inferiores ao limite máximo estipulado neste estudo (1.000 UFC/100 mL).

Assim como nos outros ensaios, o percentual de inativação para *Clostridium perfringens* não foi significativo. Quando inativados, os percentuais de inativação situaram-se entre 0,43 a 1,60 log. Em uma amostra (ensaio 12 com dose de radiação UV aplicada de 8 Wh/m³) pôde-se verificar valor remanescente superior ao valor do efluente sem desinfecção. Possivelmente

5 Resultados e Discussões

este comportamento, assim como nos ensaios anteriores, deve-se à influência dos sólidos suspensos totais que possivelmente retiveram na amostra analisada maior quantidade de microrganismos, ou ainda, por contaminação da amostra. Avaliando-se somente os ensaios 10 e 11 (ensaios em que são conhecidos os diâmetros médios das partículas sólidas) percebe-se que a menor inativação deste microrganismo se deu no ensaio 11, o qual apresenta esgoto com SST com diâmetro equivalente a $17,90\ \mu\text{m}$.

Assim como na maioria dos ensaios, a concentração remanescente dos indicadores seguiu uma ordem decrescente, sendo: *Clostridium perfringens*, coliformes totais e *Escherichia coli*.

5.4.5 Ensaios com altura de lâmina líquida de 10 cm

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 13– Caracterização do efluente tratado sem desinfecção, eficiência da radiação UV na inativação de coliformes totais, *E. coli* e *C. perfringens* para ensaios com lâmina líquida de 10 cm.

Ensaio 13 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,5; Turbidez (uT): 49;ST (mg/L): 333; SST (mg/L): 19 Ferro total (mg/L): 0,84 e Diâmetro da partícula a 90% (µm): 7,84										
D _{av} (Wh/m ³)	D _{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	4,00x10 ³			1,00x10 ³			4,00x10 ²		
8	0,16	2,00x10 ²	1,30	95,00	0,00	ND	100,00	1,30x10 ³	-	-
16	0,31	0,00	ND	100,00	2,60x10 ²	0,59	74,00	6,00x10 ²	-	-
24	0,46	1,70x10 ³	0,37	57,50	5,00x10 ²	0,30	50,00	8,00x10 ²	-	-
32	0,62	2,00x10 ²	1,30	95,00	1,00x10 ²	1,00	90,00	6,00x10 ²	-	-
40	0,78	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	-	50,00
Ensaio 14 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,6; Turbidez (uT): 44;ST (mg/L):ND;SST (mg/L): 18 Ferro total (mg/L): 1,94 e Diâmetro da partícula a 90% (µm):7,09										
D _{av} (Wh/m ³)	D _{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	3,00x10 ³			2,60x10 ⁴			8,00x10 ²		
8	0,21	7,7x10 ³	1,59	97,43	1,00x10 ²	2,41	99,62	6,00x10 ²	0,12	25,00
16	0,41	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,60	75,00
24	0,62	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	2,00x10 ²	0,60	75,00
32	0,83	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	8,00x10 ²	0,00	0,00
40	1,03	0,00	ND	100,00	1,00x10 ²	2,41	99,62	2,00x10 ²	0,60	75,00
Ensaio 15 - Características do efluente tratado sem desinfecção: Abs a 254 nm: 0,6; Turbidez (uT): 44;ST (mg/L): 458;SST (mg/L): 7 Ferro total (mg/L): 0,89 e Diâmetro da partícula a 90% (µm): 11,69										
D _{av} (Wh/m ³)	D _{rv} (Wh/m ³)	Coliformes totais (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)	<i>C. perfringens</i> (NMP/100 mL)	log (N/No)	Eficiência (%)
0	0	1,70x10 ⁴			1,00x10 ³			1,30x10 ⁴		
8	0,25	4,00x10 ³	0,63	76,47	1,00x10 ³	0,00	0,00	1,10x10 ⁴	0,07	15,38
16	0,49	4,20x10 ³	0,61	75,29	3,00x10 ²	0,52	70,00	3,40x10 ³	0,58	73,85
24	0,74	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	ND	-	-
32	0,99	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	9,00x10 ²	1,16	93,08
40	1,24	0,00	ND	100,00	0,00	ND	100,00	2,20x10 ³	0,77	83,08

Notas: Diâmetro da partícula a 90%: 90% das partículas tem diâmetro ≤ ao indicado; ND: não determinado e,-:sem eficiência

5 Resultados e Discussões

Assim como nos ensaios anteriores, os resultados dos parâmetros físico-químicos de caracterização dos esgotos utilizados nos ensaios de desinfecção não são compatíveis aos padrões usuais adotados para efluentes que serão desinfetados pelo processo físico de radiação UV. Normalmente, as recomendações são de que o esgoto tenha baixa turbidez (até 5uT), concentração de sólidos entre 10 mg/L e 30 mg/L e ferro total de 0,3 mg/L, resultando em baixa absorvância.

A absorvância das amostras variou entre 0,4 e 0,5, turbidez entre 44 e 49 uT; a concentração de sólidos totais foi muito elevada (valor máximo de 458 mg/L), no entanto, com pequena parcela de sólidos suspensos (variando de 6 a 19 mg/L) e de pequenas dimensões (7,09 e 11,69 μm) e; ferro entre 0,84 e 1,94 mg/L. Possivelmente o ferro presente encontra-se da forma oxidada e por conseguinte não absorve radiação ultravioleta, consequentemente não interfere na absorvância da amostra.

Embora os ensaios 13, 14 e 15 tenham sido realizados em condições desfavoráveis quanto à altura da lâmina líquida (10 cm), os resultados obtidos para os indicadores coliformes totais e *Escherichia coli* demonstraram 100 % de inativação em 53,33% das amostras. Esses valores se comparam a valores intermediários obtidos para os ensaios com alturas de lâminas líquidas de 4 e de 6 cm. Nos ensaios com 4 cm de altura de lâmina líquida, a inativação total de coliformes totais e de *E.coli* se deu em 50 e 78,6% das amostras, respectivamente. Para os ensaios com altura de lâmina líquida de 6 cm, 20% e 26,67% dos coliformes totais e da *E.coli*, respectivamente, foram 100% inativados.

Na sequência de eficiência de inativação dos coliformes totais e *Escherichia coli*, tem-se: para coliformes totais, em 20% das amostras a inativação foi de 90% e, 26,67% com inativação inferior a 90% ou 1,0 log; para a *E.coli*, em 13,33% das amostras a inativação foi de 99%, 6,66% com inativação de 90% e 26,67% com inativação inferior a 90%.

As elevadas eficiências de inativação dos indicadores coliformes totais e *Escherichia coli* podem estar associadas ao maior tempo de exposição dos efluentes à radiação UV, para atender a mesma dose volumétrica de aplicação utilizada nos demais ensaios, e consequentemente maior homogeneização da amostra. O aumento do tempo de exposição possibilita elevar a probabilidade

de o microrganismo ser atingido pela radiação UV. Cabe destacar que a concentração remanescente da *Escherichia coli* dos ensaios 13, 14 e 15 atendem aos limites de referência deste estudo (até 1.000 *Escherichia coli*/100 mL).

Muito embora as características dos efluentes dos sistemas de tratamento que antecedem a desinfecção com radiação ultravioleta não satisfaçam as recomendações que constam na literatura, os resultados obtidos mostram que o diâmetro da partícula pode interferir de forma prioritária na eficiência da desinfecção. Nestes ensaios (13,14 e 15), os diâmetros das partículas suspensas podem ser considerados de pequenas dimensões (valor máximo de 11,69 μm) e provavelmente não interferiu negativamente na eficiência da desinfecção para os coliformes totais e *E.coli*.

Quanto ao *Clostridium perfringens*, estes apresentaram grande resistência à inativação. As doses utilizadas não foram suficientes para se obter resultados satisfatórios. Quando inativados, a eficiência de inativação foi de 0,07 a 1,16 log. Seguindo a mesma tendência dos ensaios anteriores, foi verificado ainda que em alguns ensaios a concentração remanescente desta bactéria no efluente desinfetado foi maior que no efluente não desinfetado. Como já explicitado, este comportamento não é incomum e deve-se provavelmente influência dos sólidos suspensos totais que possivelmente retiveram na amostra analisada maior quantidade de microrganismos, ou ainda, por contaminação da amostra.

Seguindo a mesma tendência predominante dos ensaios, a concentração remanescente dos indicadores seguiu uma ordem decrescente, sendo: *Clostridium perfringens*, coliformes totais e *Escherichia coli*.

5.5 Ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro dos indicadores coliformes totais e *Escherichia coli*.

Nas Tabelas 5.14 a 5.18 apresentam-se, para cada ensaio, valores de turbidez e absorvância a 254 nm, coliformes totais e *Escherichia coli* medidos no

5 Resultados e Discussões

efluente utilizado (esgoto do alagado construído) nos ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos indicadores após exposição à radiação UV, doses volumétricas (aplicadas e recebidas) de radiação UV, concentrações de microrganismos no esgoto posterior à desinfecção (N_0 e N), concentrações de microrganismos remanescentes após 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz, para ensaios com alturas de lâminas líquidas de 2, 4, 6, 8 e 10 cm, respectivamente.

Cabe ressaltar que a temperatura média ambiente nos ensaios em que as amostras foram expostas a radiação solar foi de aproximadamente 30°C, com céu parcialmente nublado. As amostras que foram submetidas à ausência de luz foram condicionadas a 28°C.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 14— Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e *E. coli* afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 2 cm de altura de lâmina líquida.

Altura da lâmina líquida (cm)	Turbidez (uT) - Absorvância a 254 nm	Doses volumétricas (Wh/m ³)		Concentração remanescente (UFC/100 mL)					
		D _{av}	D _{rv}	Após desinfecção		3 horas posterior a desinfecção e exposição à radiação solar		3 horas posterior a desinfecção e em ausência de luz	
				Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>
2	43 - 0,4	8	3,52	8,00x10 ²	1,90x10 ²	3,10x10 ²	2,00x10 ²	5,50x10 ²	1,20x10 ²
		16	7,62	0,00	0,00	8,00x10 ¹	0,00	0,00	0,00
		24	11,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		32	14,66	0,00	0,00	1,40x10 ²	0,00	0,00	0,00
		40	18,76	0,00	0,00	3,00x10 ²	0,00	0,00	0,00

Nota:ND: não determinado.

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 15– Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e *E. coli* afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 4 cm de altura de lâmina líquida.

Altura da lâmina líquida (cm)	Turbidez (uT) - Absorvância a 254 nm	Doses volumétricas (Wh/m ³)		Concentração remanescente (UFC/100 mL)					
		D _{av}	D _{iv}	Após desinfecção		3 horas posterior a desinfecção e exposição à radiação solar		3 horas posterior a desinfecção e em ausência de luz	
				Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>
4	42 - 0,4	8	2,21	2,02x10 ³	2,00x10 ²	0,00	0,00	4,00x10 ²	1,00x10 ²
		16	4,24	2,80x10 ²	2,60x10 ²	0,00	0,00	2,20x10 ²	5,30x10 ²
		24	6,45	ND	1,00x10 ²	0,00	0,00	1,00x10 ¹	3,00x10 ²
		32	8,66	5x10 ¹	0,00	0,00	0,00	2,00x10 ¹	1,70x10 ²
		40	10,70	9,30x10 ³	1,30x10 ³	0,00	0,00	ND	3,00x10 ²

Nota:ND: não determinado.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 16— Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e *E. coli* afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 6 cm de altura de lâmina líquida.

Altura da lâmina líquida (cm)	Turbidez (uT) - Absorvância a 254 nm	Doses volumétricas (Wh/m ³)		Concentração remanescente (UFC/100 mL)					
		D _{av}	D _{rv}	Após desinfecção		3 horas posterior a desinfecção e exposição à radiação solar		3 horas posterior a desinfecção e em ausência de luz	
				Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>
6	37 - 0,4	8	1,46	1,35x10 ²	6,00x10 ¹	0,00	0,00	8,90x10 ²	1,50x10 ²
		16	2,93	8,60x10 ²	6,00x10 ¹	0,00	0,00	4,80x10 ²	5,00x10 ¹
		24	4,39	6,20x10 ²	5,00x10 ¹	0,00	0,00	6,20x10 ²	9,00x10 ¹
		32	5,86	3,20x10 ²	1,00x10 ¹	0,00	0,00	8,20x10 ²	1,00x10 ¹
		40	7,32	3,00x10 ²	0,00	0,00	0,00	8,00x10 ¹	0,00

Nota:ND: não determinado.

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 17 – Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e *E. coli* afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 8 cm de altura de lâmina líquida.

Altura da lâmina líquida (cm)	Turbidez (uT) - Absorvância a 254 nm	Doses volumétricas (Wh/m ³)		Concentração remanescente (UFC/100 mL)					
		D _{av}	D _{nv}	Após desinfecção		3 horas posterior a desinfecção e exposição à radiação solar		3 horas posterior a desinfecção e em ausência de luz	
				Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totais	<i>Escherichia coli</i>
8	54 - 0,4	8	1,09	1,40x10 ³	5,00x10 ²	0,00	0,00	0,00	1,00x10 ²
		16	2,22	1,00x10 ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		24	3,31	3,70x10 ²	1,70x10 ²	0,00	0,00	ND	ND
		32	4,44	0,00	3,00x10 ¹	0,00	0,00	1,00x10 ²	2,00x10 ¹
		40	5,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota:ND: não determinado.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 18 – Turbidez e absorvância a 254 nm, doses volumétricas de radiação UV, concentração de coliformes totais e *E. coli* afluente e efluente a desinfecção UV e posterior a 3 horas de exposição à radiação solar e em ausência de luz para os ensaios com 10 cm de altura de lâmina líquida.

Altura da lâmina líquida (cm)	Turbidez (uT) - Absorvância a 254 nm	Doses volumétricas (Wh/m³)		Concentração remanescente (UFC/100 mL)					
				D _{av}	D _{lv}	Após desinfecção		3 horas posterior a desinfecção e exposição à radiação solar	
		Coliformes totais	Escherichia coli			Coliformes totais	Escherichia coli	Coliformes totais	Escherichia coli
10	50 - 0,4	8	0,89	1,50x10 ²	1,20x10 ²	0,00	0,00	7,50x10 ²	8,90x10 ²
		16	1,76	1,00x10 ¹	2,40x10 ²	0,00	0,00	2,00x10 ¹	5,00x10 ¹
		24	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		32	3,54	1,00x10 ²	8,00x10 ¹	0,00	0,00	7,00x10 ¹	4,00x10 ¹
		40	4,43	4,00x10 ¹	8,00x10 ¹	0,00	0,00	2,00x10 ²	1,40x10 ²

Nota:ND: não determinado.

5 Resultados e Discussões

A influência do processo de fotorreativação enzimática para os coliformes totais foi verificada nos experimentos realizados com altura de lâmina líquida de 2 cm (ensaio 16). A concentração dos coliformes totais após exposição à radiação solar aumentou em até 1 e 2 log para os ensaios com doses volumétricas aplicadas de 16 e de 32 e 40 Wh/m³, respectivamente, ou doses recebidas de radiação UV de 2,67 e de 5,13 e 6,57 Wh/m³, respectivamente. Para as doses testadas, não se observou, em ausência de luz, recrescimento de coliformes totais e *Escherichia coli*.

Nos ensaios com altura de lâmina líquida de 4 cm (ensaio 17), a recuperação da *Escherichia coli* pela ausência de luz foi verificada para doses de radiação UV aplicadas de 24 e 32 Wh/m³, ou, doses recebidas de 6,45 e 8,66 Wh/m³. No entanto, o recrescimento foi pouco significativo (inferior a 1 log).

O efeito de recrescimento dos coliformes totais e da *Escherichia coli* pela ausência de luz foi observado nos ensaios com altura de lâmina líquida de 6 cm (ensaio 18). Para o indicador coliforme total, este comportamento verificou-se para doses de radiação UV aplicadas de 32 e 40 Wh/m³ (equivalente a doses recebidas de 5,86 e 7,32 Wh/m³, respectivamente). O recrescimento da *E. coli* se constatou nos ensaios com aplicações de doses volumétricas de 8 e 24 Wh/m³ (equivalente a doses recebidas de 1,46 e 4,39 Wh/m³, respectivamente). O aumento de microrganismos foi de até 2 log.

À exceção dos coliformes totais para dose de radiação UV aplicada de 32 Wh/m³, ou dose recebida de 4,44 Wh/m³, que em ausência de luz obteve recrescimento de 2 log, não foram observados nas demais doses do ensaio 19 (altura de lâmina líquida de 8 cm) fotorreativação e recuperação no escuro dos coliformes totais e da *E. coli*.

No ensaio 20 (altura de lâmina líquida de 10 cm) o processo de recuperação do microrganismo no escuro foi observado para os coliformes totais e *E. coli* para doses de radiação UV aplicadas e recebidas, respectivamente, de 8 e 0,89 Wh/m³, (recrescimento inferior a 1 log). Ainda para os coliformes totais, este efeito foi também verificado nas doses de radiação UV aplicadas e recebidas respectivamente, de 16 e 1,79 Wh/m³ (recrescimento de aproximadamente 1 log).

Ao se avaliar conjuntamente os efeitos da radiação visível e da ausência luminosa nos cinco ensaios, pôde-se perceber predominância de reativação

pela ausência de luz. Possivelmente, o processo de fotorreativação foi minimizado devido à desinfecção ocorrida na amostra pela radiação solar, em decorrência da exposição das amostras em horário (entre 12 e 15 h) de forte emissão de radiação UV, bem como pela absorção da radiação solar pelo vidro relógio e filme PVC, ambos entre 8 e 10%, utilizados para recobrimento da amostra para impedir contaminação.

5.6 Custos da desinfecção

5.6.1 Custos de implantação

Os custos atuais de implantação associados às unidades de desinfecção proposta neste estudo (canais em concreto, com módulos de desinfecção em aço inox dotados de lâmpadas emersas) foram de R\$ 26.817,23, R\$ 45.746,54 e de R\$ 81.073,83 para as unidades de desinfecção com capacidade de tratamento de 30; 60 e 120 m³/h, respectivamente. Nos apêndices A e B apresentam-se memorial descritivo dos projetos das unidades de tratamento, bem como, plantas com características físicas. Os valores correspondentes em R\$/hab estão discriminados na Tabela 5. 19.

Tabela 5. 19– Custos de implantação de unidades de desinfecção UV com capacidades de tratamento de 30, 60 e 120 m³/h, para populações de 5.000, 10.000 e 20.000 habitantes respectivamente.

Custos	Capacidade de tratamento (m ³ /h)		
	30	60	120
Obras civis (R\$)	7.550,21	9.312,94	11.582,52
Módulos de desinfecção e suportes dos módulos (R\$)	8.580,12	15.419,91	28.597,93
Parte elétrica (material e serviço) (R\$)	5.290,15	10.441,80	20.180,40
Lâmpadas UV de 90 cm (R\$)	3.072,00	6.144,00	12.288,00
Total (R\$)	26.817,23	45.746,54	81.073,83
Total (R\$/hab)	5,36	4,57	4,05
Reposição anual das lâmpadas (R\$/hab)	0,61	0,61	0,61

Comumente, o aumento da capacidade de tratamento de uma unidade de tratamento de esgoto diminui proporcionalmente o custo de implantação. Nas condições avaliadas, a economia de escala obtida foi de aproximadamente 14,71% entre as unidades de 30 e 60 m³/h e de 24,42% entre as unidades de tratamento de 30 e 120 m³/h.

De forma geral, os custos de implantação obtidos neste estudo foram menores quando comparados com outros modelos de unidades de desinfecção UV disponíveis no mercado (Tabelas 5.20 e 5.21) para as mesmas condições de qualidade e vazão de esgoto.

No entanto, cabe ressaltar que houve diferenciação da potência máxima nominal necessária instalada nos modelos industriais com as unidades de desinfecção proposta neste estudo, o que em alguns casos, contribuiu para elevação dos custos de implantação dos modelos industriais, como se observa nas Tabelas 5.20 e 5.21. As unidades de tratamento projetadas neste estudo possuem lâmpadas germicidas de 30 W, totalizando potências nominais instaladas de 1.920; 3.840 e de 7.680 W para as unidades de desinfecção de 30; 60 e 120 m³/h, respectivamente. Enquanto que as potências nominais para as unidades de desinfecção da indústria A foram 750, 1500, e 3000 W e para as unidades da indústria B foram de 8.600, 17.200 e 34.400 W, para as mesmas vazões de referências.

Destaca-se ainda o fato da inflexibilidade de ajuste nos preços das unidades de desinfecção UV industriais principalmente pela imposição, por parte dos fabricantes, da potência mínima instalada que, muitas vezes, é superior à necessária, obtida em ensaios testes.

Na sequência apresentam-se características e discussões sobre os equipamentos pesquisados.

Equipamento de fabricação nacional, indústria A: valores referentes a março/2011

Módulos de desinfecção confeccionados em aço inoxidável, dotadas de lâmpadas UV de 75 W, instalados em suportes de aço inoxidável. Os módulos deverão ser montados em canal do tipo aberto. Segundo dados do fabricante, a vida útil das lâmpadas é 8.000 horas e deverão ficar submersas ao fluxo.

Na Tabela 5. 20 apresentam-se os custos médios para projetos, aquisição e instalação de módulos de desinfecção UV, incluindo suporte dos módulos e lâmpadas UV da indústria A. Excluem-se nesta composição materiais e obras civis necessários para instalação dos módulos e suportes de desinfecção UV.

O somatório do custo médio total (R\$/hab) para elaboração dos projetos, aquisição e instalação dos módulos de desinfecção da indústria A (R\$ 9,78/hab) ultrapassa significativamente (99,7%) o valor médio estimado nos projetos deste estudo (R\$ 4,06/hab), nos quais, inclui-se na composição dos preços, o canal de desinfecção (material e serviços).

Os custos totais de aquisição dos módulos, suportes e lâmpadas de desinfecção UV da indústria A, superam em aproximadamente 74%, os valores das unidades projetadas nesta pesquisa. Destaca-se ainda o elevado valor cobrado pela indústria A para instalação dos módulos de desinfecção (Tabela 5. 20). Neste aspecto, a elaboração e execução de projetos sem vinculação com os sistemas UV disponíveis no mercado, podem ser uma alternativa para diminuição de custos de implantação de sistemas de desinfecção UV.

As potências nominais totais das lâmpadas instaladas nos módulos de desinfecção da indústria A foram inferiores às estimados nos projetos propostos neste estudo. Adotando-se como base a dose mínima necessária (8 Wh/m³, dose aplicada volumétrica em comprimento de onda de 254nm) e altura de lâmina líquida de 6 cm para atendimento do padrão de *Escherichia coli* de 1000 UFC/100 mL, obtido em ensaios testes, dever-se-á diminuir a altura de lâmina líquida ou aumentar o tempo de exposição à radiação UV, o que consequentemente, elevará os custos de operação com energia elétrica.

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 20 - Custos médios de módulos de desinfecção UV, incluindo projeto, suporte e lâmpadas UV da indústria A

				Custos (R\$)					
Equipamentos A	População de referência (hab)	Qmáx de referência (m³/h)	Potência instalada (W)	Aquisição de módulos de desinfecção UV(R\$)			Elaboração de projetos R\$	Implantação dos módulos	Total¹ (R\$/hab)
				Módulos de desinfecção UV + lâmpadas UV	Suportes para os módulos de desinfecção UV	Total			
				A1	5.000	30	750		
A2	10.000	60	1.500	77.156,25	5.054,00	82.210,25	6.745,00	9.450,00	9,84
A3	20.000	120	3.000	154.312,50	9.377,00	163.689,50	9.876,00	16.200,00	9,49

Nota: A1 – contém 5 módulos de desinfecção, com 2 lâmpadas UV/módulo de 75 W, instalados em suportes medindo 1,554 m de comprimento X 0,019 m de largura; A2 – contém 5 módulos de desinfecção, com 4 lâmpadas UV/módulo de 75 W, instalados em suportes medindo 2,450 m de comprimento X 0,040 m de largura e A3 - 10 módulos de desinfecção, com 4 lâmpadas UV/módulo de 75 W, instalados em suportes medindo 2,450 m de comprimento X 0,040 m de largura;¹ Excluem-se os custos associados ao canal de desinfecção UV.

Equipamento de fabricação nacional, indústria B: valores referentes a maio/2011

Câmara de contato em aço inox (corpo, tampa e flanges), tipo fechado: câmara submetida a eletro polimento interno e externo com 200 mm de diâmetro medindo 0,364 m de largura e 0,450 m de comprimento, com 2 lâmpadas de média pressão de 4.300W/lâmpada, ou 8.600 W/câmara. O sistema é dotado de limpador automático tipo raspador para câmara de contato. Segundo dados do fabricante, a vida útil das lâmpadas é 5.000 h e o custo médio de reposição de uma lâmpada é de R\$ 2.600,00/semestre.

Na Tabela 5. 21 apresentam-se os custos médios conjuntos para aquisição das unidades de desinfecção e para reposição das lâmpadas UV. Diferentemente das unidades de desinfecção UV projetadas neste estudo, os custos de montagem não foram computados. No entanto, o preço médio de aquisição dos equipamentos da indústria B, supera o valor quantificado para aquisição e montagem das unidades de desinfecção UV entre 70,37 a 77,60%.

O consumo energético estimado pela indústria também é elevado. Os ensaios realizados mostraram que a dose volumétrica aplicada de 8 Wh/m³ (dose para comprimento de onda de 254nm) e altura de lâmina líquida de 6 cm é suficiente para atendimento do padrão adotado (*Escherichia coli* < 1.000 UFC/100 mL) obtido nos ensaios realizados. Nestas condições, o consumo de energia poderia ser minimizado. Os dados obtidos mostraram consumo de energia de 17.113,55, 34.227,11 e de 68.454,22 kW/ano para vazões de 30;60 e 120 m³/h, respectivamente, em detrimento dos apresentados pela indústria B que foi de 78.840,00, 157.680,00, e de 315.360,00kW/ano para as mesmas vazões citadas.

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 21- Custos médios para aquisição de unidades de desinfecção UV e para reposição de lâmpadas UV da indústria B

Equipamentos B	População de referência (hab)	Q _{máx} de referência (m ³ /h)	Potência instalada (W)	Consumo elétrico (Wh)	Custo de aquisição dos equipamentos (R\$)	Custo de aquisição dos equipamentos (R\$/hab)	Custo anual de reposição de lâmpadas (R\$)
B1	5.000	30	8.600	9.000	90.500,00		10.400,00
B2	10.000	60	17.200	18.000	181.000,00	18,10	20.800,00
B3	20.000	120	34.400	36.000	362.000,00		41.600,00

Nota: B1 – contém 1 câmara e possui capacidade de tratamento para uma vazão de até 32 m³/h (280.320 m³/ano); B2 – contém 2 câmaras e possui capacidade de tratamento para uma vazão de até 64 m³/h (560.640 m³/ano) e B3 - contém 4 câmaras e possui capacidade de tratamento para uma vazão de até 128 m³/h (1.121.280 m³/ano).

Equipamento importado, indústria C: (valores referentes a dezembro de 2011)

Módulos de desinfecção confeccionados em aço inoxidável, com 4 lâmpadas UV/módulo. Os módulos são montados em canal em aço inoxidável medindo 2,921 m de comprimento, 0,762 m de largura e 0,527 m de altura. Segundo dados do fabricante, a vida útil das lâmpadas é de 12.000 horas e deverão ficar submersas ao fluxo. Não foi possível obter a potência nominal instalada em cada módulo (quantidade e potência das lâmpadas UV), o que inviabiliza a análise do custo médio para reposição de lâmpadas. O número de módulos necessários para as vazões de referência também é desconhecido.

Os custos médios dos referidos sistemas para vazões máximas de 44 m³/h e de 132 m³/h, são de US\$ 19.500,00 e de US\$ 32.000,00, respectivamente. Adotando-se a conversão do dólar para real de R\$ 1,7871 (02/12/2011) têm-se os custos de R\$ 34.848,45 e R\$ 58.080,75 para as referidas vazões. Somando-se ainda os custos de exportação (frete, montagem e impostos), estes valores são acrescidos em aproximadamente duas vezes e meio, totalizando R\$, 87.121,12 e R\$ 145.201,87, respectivamente. Assim como os demais sistemas de desinfecção do tipo industrial, os modelos da indústria C, também apresentaram custos maiores do que os sistemas elaborados nesta pesquisa.

5.6.2 Custos de operação com energia elétrica

Na Tabela 5. 22 apresentam-se os consumos de energia elétrica para todas as combinações dos ensaios de desinfecção com radiação UV considerando 24 horas de funcionamento do reator. Cabe ressaltar que o consumo de energia elétrica é função da potência instalada (número de lâmpadas X potência nominal da lâmpada) e do número de horas em que as lâmpadas ficam ligadas. As potências instaladas foram quantificadas para as combinações de doses de 8, 16, 24, 32 e 40 Wh/m³ para as vazões de 30, 60 e 120 m³/h. A metodologia de cálculo foi à mesma utilizada e demonstrada no Apêndice A.

5 Resultados e Discussões

Conforme se observa na Tabela 5. 22, o aumento de dose eleva o consumo de energia elétrica na mesma proporção, o mesmo ocorre com acréscimo de vazão, sem proporcionar economia operacional de escala.

Cabe ressaltar que as diferenças na altura de lâmina líquida e no tempo de exposição para inativação dos microrganismos não representam alterações nos custos. Estes dois parâmetros operacionais determinam o número de ciclos diários e o volume desinfetado num dado tempo. Para as vazões de referências (30, 60 e 120 m³/h), os volumes máximos tratados em um ano são de 262.800 m³, 525.600 m³ e de 1.051.200 m³, respectivamente.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 22– Consumo de energia elétrica (kW/ano) aplicando-se doses volumétricas de 8, 16, 24, 32 e 40 Wh/m³

L (cm)	Dav (Wh/m ³)	Número de lâmpadas para as vazões de:			Potência instalada (W) para as vazões de:			Consumo de energia (kW/ano) para as vazões de:		
		30 m ³ /h	60 m ³ /h	120 m ³ /h	30 m ³ /h	60 m ³ /h	120 m ³ /h	30 m ³ /h	60 m ³ /h	120 m ³ /h
2, 4, 6, 8 e 10	8	64	128	260	1.953,60	3.907,20	7.814,41	17.113,55	34.227,11	68.454,21
	16	128	264	520	3.907,20	7.814,41	15.628,82	34.227,11	68.454,21	136.908,42
	24	192	392	784	5.860,81	11.721,61	23.443,22	51.340,66	102.681,32	205.362,64
	32	264	520	1.040	7.814,41	15.628,82	31.257,63	68.454,21	136.908,42	273.816,85
	40	328	648	1.304	9.768,01	19.536,02	39.072,04	85.567,77	171.135,53	342.271,06

Nota: Dav: dose volumétrica aplicada em comprimento de onda de 254 nm

Na Tabela 5. 23 apresentam-se, para as condições de testes aplicadas neste estudo, os gastos anuais médios com energia elétrica nas diferentes regiões do Brasil, bem como no estado do Rio Grande do Norte.

Os cálculos foram baseados nas tarifas médias adotadas pelas concessionárias de energia elétricas no Brasil (ANEEL julho/2011) correspondentes à categoria B (unidades de serviços públicos não dotadas de subestação e com até 75 kW instalados). Na composição final do preço, adotou-se, segundo as normas tarifárias, desconto de 15% cedido às unidades prestadoras de serviços de saneamento e o incremento dos impostos médios por região (PIS, COFINS e ICMS). De acordo com a ANEEL/2011, a cobrança de energia elétrica aos serviços públicos que não utilizam subestação e que a potência máxima instalada é de 75 kW, é fixada somente pela demanda em kW/h. O valor médio final adotado nas regiões norte e sudeste foi de R\$ 0,26/kW/h, nas regiões nordeste e centro-oeste foi de R\$ 0,23kW/h, na região sul foi de R\$ 0,18kW/h e no RN foi de R\$ 0,38kW/h.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 23– Custos anuais com energia elétrica para funcionamento contínuo de reator de desinfecção UV em diferentes regiões do Brasil e no estado do RN com aplicações diferenciadas de doses volumétricas (Dav) e de vazões.

Dav (Wh/m ³)	Custos com energia elétrica (R\$/ano) para vazão de 30 m ³ /h					
	Regiões					Estado
	S	SE	CO	N	NE	RN
8	3.043,71	4.428,62	3.862,99	4.438,59	4.000,14	6.473,11
16	6.087,43	8.857,25	7.725,99	8.877,18	8.000,27	12.946,22
24	9.131,14	13.285,87	11.588,98	13.315,77	12.000,41	19.419,32
32	12.174,86	17.714,49	15.451,98	17.754,36	16.000,54	25.892,43
40	15.218,57	22.143,11	19.314,97	22.192,95	20.000,68	32.365,54
Volume tratado no ano: 262.800,00 m ³						
Dav (Wh/m ³)	Custos com energia elétrica (R\$/ano) para vazão de 60 m ³ /h					
	Regiões					Estado
	S	SE	CO	N	NE	RN
8	6.087,43	8.857,25	7.725,99	8.877,18	8.000,27	12.946,22
16	12.174,86	17.714,49	15.451,98	17.754,36	16.000,54	25.892,43
24	18.262,28	26.571,74	23.177,97	26.631,54	24.000,81	38.838,65
32	24.349,71	35.428,98	30.903,96	35.508,72	32.001,09	51.784,86
40	30.437,14	44.286,23	38.629,95	44.385,89	40.001,36	64.731,08
Volume tratado no ano: 525.600,00 m ³						
Dav (Wh/m ³)	Custos com energia elétrica (R\$/ano) para vazão de 120 m ³ /h					
	Regiões					Estado
	S	SE	CO	N	Nordeste	RN
8	12.174,86	17.714,49	15.451,98	17.754,36	16.000,54	25.892,43
16	24.349,71	35.428,98	30.903,96	35.508,72	32.001,09	51.784,86
24	36.524,57	53.143,47	46.355,94	53.263,07	48.001,63	77.677,29
32	48.699,42	70.857,97	61.807,92	71.017,43	64.002,17	103.569,72
40	60.874,28	88.572,46	77.259,90	88.771,79	80.002,71	129.462,15
Volume tratado no ano: 1.051.200,00 m ³						

Nota: Dav (dose aplicada volumétrica em comprimento de onda de 254 nm)

Na Tabela 5. 24 apresentam-se os custos médios, em R\$/m³ e em R\$/hab/ano, com energia elétrica para as diferentes combinações de doses e vazões aplicadas. No entanto, para a análise final econômica, foi selecionadas somente a alternativa de ensaio operacional em que a concentração residual de *Escherichia coli* foi menor que 1.000 UFC/100 mL em 100% dos ensaios analisados com menor dose, ou seja, ensaio com lâmina líquida de 6 cm com dose volumétrica aplicada de 8 Wh/m³ (em comprimento de onda de 254 nm). Nestas condições o custo com energia elétrica variou entre 0,01 (região sul) a 0,02 R\$/m³ (estado do RN), ou 0,61 (região Sul) a 1,29 (estado do RN) R\$/hab/ano.

As despesas quantificadas com energia elétrica foram menores que a do estudo de Silva (2007) avaliando o custo de energia elétrica para desinfecção de esgoto anaeróbio e aeróbio, em escala real, com capacidade de tratamento de aproximadamente $54 \text{ m}^3/\text{h}$ e com aplicação de dose de radiação UV de $9,49 \text{ Wh/m}^3$. O custo médio obtido com energia foi de R\$ 0,07/ m^3 .

Alves et al. (2004), obtiveram um custo médio com energia elétrica para desinfecção de esgoto doméstico tratado em reator UASB seguido de filtro biológico de 0,63 R\$/hab/ano. Excluindo-se a correção monetária ao longo dos anos, o valor de 0,63 R\$/hab/ano se equipara somente ao custo atual obtido para a média da região Sul (0,61 R\$/hab/ano) com utilização de dose volumétrica de 8 Wh/m^3 . Cabe ressaltar que a tarifa média utilizada em 2007 pelo autor foi de R\$ 0,15 kW/h, e inferior à média atual adotada pelas companhias de energia elétrica do país, que variam de R\$ 0,17kW/h (região sul) a R\$ 0,26kW/h (regiões Norte e Sudeste) e a tarifa média do estado do RN (R\$ 0,37 kW/h).

De forma geral, a tarifa de energia elétrica aplicada nas diferentes regiões do Brasil pode ser um fator limitante na utilização de sistemas de desinfecção com radiação UV. O estado do Rio Grande do Norte, por exemplo, tem uma tarifa média maior de aproximadamente 54% em relação à maior tarifa média entre as regiões do Brasil (Norte).

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 24—Custos médios com energia elétrica em R\$/m³ e R\$/hab/ano para desinfecção de esgotos adotando-se vazões de 30, 60 e 120 m³/ano

L (cm)	Dav (Wh/m ³)	Custos com energia elétrica (R\$/m ³) para vazões de 30, 60 e 120 m ³ /h					
		S	SE	CO	N	NE	RN
2, 4, 6 e 10	8	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
	16	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05
	24	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,07
	32	0,05	0,07	0,06	0,07	0,06	0,10
	40	0,06	0,08	0,07	0,08	0,08	0,12
L (cm)	Dav (Wh/m ³)	Custos com energia elétrica (R\$/hab/ano) para vazão de 30, 60 e 120 m ³ /h					
		S	SE	CO	N	NE	RN
2, 4, 6 e 10	8	0,61	0,89	0,77	0,89	0,80	1,29
	16	1,22	1,77	1,54	1,77	1,60	2,59
	24	1,83	2,66	2,32	2,66	2,40	3,88
	32	2,43	3,54	3,09	3,55	3,20	5,18
	40	3,04	4,43	3,86	4,44	4,00	6,47

Nota: Dav: dose aplicada volumétrica em comprimento de onda de 254 nm

5 Resultados e Discussões

Na Tabela 5. 25 apresentam-se equações matemáticas que permitem representar por região, os custos da desinfecção por radiação ultravioleta com energia elétrica. Como a potência necessária instalada é proporcional a vazão e a dose volumétrica de radiação UV, as equações poderão ser utilizadas para qualquer dose volumétrica de radiação UV, obtendo-se como resultado o custo em R\$/hab/ano ou R\$/m³. As equações foram estabelecidas com bases na estimativa do consumo energético.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 25– Equações matemáticas para estimativa do custo de energia elétrica com a utilização de desinfecção de esgoto doméstico com radiação ultravioleta em diferentes regiões do Brasil e o estado do RN em função da dose volumétrica de radiação aplicada.

Regiões do Brasil		Custos atuais			Custos ao longo dos anos		
		R\$/m ³	R\$/hab/ano	R\$/m ³	R\$/hab/ano	R\$/hab/ano	R\$/hab/ano
S		$C_{EE} = 0,0014D_{av}$	$C_{EE} = 0,0761 D_{av}$	$C_{EE} = (0,0014D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,0761 D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,0761 D_{av}) \times TART$	
SE		$C_{EE} = 0,0021D_{av}$	$C_{EE} = 0,1107 D_{av}$	$C_{EE} = (0,0021D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,1107 D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,1107 D_{av}) \times TART$	
CO		$C_{EE} = 0,0018D_{av}$	$C_{EE} = 0,0966D_{av}$	$C_{EE} = (0,0018D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,0966D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,0966D_{av}) \times TART$	
N		$C_{EE} = 0,0021D_{av}$	$C_{EE} = 0,111D_{av}$	$C_{EE} = (0,0021D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,111D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,111D_{av}) \times TART$	
NE		$C_{EE} = 0,0019D_{av}$	$C_{EE} = 0,1D_{av}$	$C_{EE} = (0,0019D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,1D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,1D_{av}) \times TART$	
Estado		Custos atuais			Custos ao longo dos anos		
		R\$/m ³	R\$/hab/ano	R\$/m ³	R\$/hab/ano	R\$/hab/ano	
RN		$C_{EE} = 0,0031D_{av}$	$C_{EE} = 0,1618 D_{av}$	$C_{EE} = (0,0031D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,1618 D_{av}) \times TART$	$C_{EE} = (0,1618 D_{av}) \times TART$	

Nota: D_{av} : dose volumétrica de radiação UV (Wh/m³); C_{EE} : custo com energia elétrica; TART: taxa acumulada de reajuste tarifária da energia elétrica

5.6.3 Custo de manutenção com reposição de lâmpadas:

Na composição de custos para reposição das lâmpadas foi considerado um dispêndio unitário de R\$ 48,00/lâmpada. Cabe ressaltar que as lâmpadas orçadas são de 30 W de potência e 90 cm de comprimento. Estimando-se a reposição de 100% das lâmpadas por ano, tem-se um gasto atual aproximado de R\$ 3.072,00 para tratar 30 m³/h, R\$ 6.144,00 para tratar 60 m³/h e de R\$ 12.288,00 para tratar 120 m³/h, o que representa 0,01R\$/m³ ou 0,61 R\$/hab/ano.

5.6.4 Custos de operação e manutenção – O & M

Na Tabela 5. 26 apresenta-se somatório dos custos prioritários de operação e manutenção das unidades de desinfecção UV projetadas nesta pesquisa para as três vazões de referência (30, 60, e 120 m³/h). Para a dose aplicada volumétrica de 8 Wh/m³ (dose selecionada como de melhor viabilidade técnica e econômica), os custos por volume tratado, variaram entre R\$ 0,02/m³ (região Sul) a R\$ 0,03/m³ (região Norte e Sudeste). No estado do RN este valor se eleva para R\$ 0,04/m³.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 26– Custos médios da desinfecção UV de esgoto, em R\$/m³ e R\$/hab/ano, com operação e manutenção em diferentes regiões do Brasil e no estado do RN adotando-se vazões de 30, 60 e 120 m³/ano

L (cm)	Dav (Wh/m ³)	Custos com operação e manutenção (R\$/m ³) para vazão de 30, 60 e 120 m ³ /h					
		S	SE	CO	N	NE	RN
2, 4, 6 e 10	8	0,023	0,028	0,026	0,028	0,026	0,036
	16	0,034	0,045	0,04	0,045	0,041	0,06
	24	0,046	0,062	0,055	0,062	0,057	0,085
	32	0,057	0,078	0,07	0,079	0,072	0,11
	40	0,069	0,095	0,084	0,095	0,087	0,134
L (cm)	Dav (Wh/m ³)	Custos com operação e manutenção (R\$/hab/ano) para vazão de 30, 60 e 120 m ³ /h					
		S	SE	CO	N	NE	RN
2, 4, 6 e 10	8	1,223	1,500	1,387	1,502	1,414	1,909
	16	1,831	2,385	2,159	2,389	2,214	3,203
	24	2,44	3,271	2,932	3,277	3,014	4,498
	32	3,049	4,157	3,704	4,165	3,814	5,792
	40	3,658	5,043	4,477	5,053	4,614	7,087

Com exceção do estado do RN, os custos de O & M da desinfecção de esgoto por radiação UV nas regiões do Brasil foram inferiores aos obidos em pesquisa do PROSAB, no estado do Paraná, apresentados por Jordão e Alem Sobrinho (2003). O estudo teve o objetivo de avaliar a desinfecção por radiação UV de esgoto tratado em reatores UASB e filtro biológico com vazão de $36 \text{ m}^3/\text{h}$. O custo médio de operação e manutenção foi de R\$ 0,03/ m^3 .

Pesquisas paralelas no âmbito do PROSAB (2003), no estado do Paraná, propuseram variações de custos de operação e manutenção de diferentes desinfetantes, entre estas, destacam-se: a da ETE-Sul, cujo custo médio de desinfecção com cloro gasoso para uma população de 124.000 habitantes (vazão de 310L/s) foi de R\$ 0,02/ m^3 ; As ETES Bandeirantes e Assis Chateaubriand utilizam a cloração com hipoclorito de sódio, o que eleva os custos da cloração. As referidas ETES atendem populações equivalentes de 41.380 (vazão de 88L/s) e 14.425 habitantes (vazão de 40 L/s), respectivamente, com custo médio de operação e manutenção de R\$ 0,08/ m^3 para a primeira ETE e de R\$ 0,09/ m^3 para a segunda ETE. A radiação ultravioleta foi analisada para uma vazão de $36 \text{ m}^3/\text{h}$, obtendo-se um custo de operação de 0,03 R\$/ m^3 . Provavelmente, com a descloração, este valor ultrapassaria os custos com a cloração com cloro gás.

O dióxido de cloro também foi testado no estado do Paraná e obteve o maior custo entre os desinfetantes testados (R\$ 0,11/ m^3) para vazão de $36 \text{ m}^3/\text{h}$. Em Santa Catarina testou-se o ozônio tendo-se como resultado um custo médio de O & M de R\$ 0,09/ m^3 para tratar $66,6 \text{ m}^3/\text{h}$.

Os custos de O & M da radiação UV obtidos nesta pesquisa foram relativamente baixos e competem com outros desinfetantes comumente utilizados. Provavelmente, isto se deve a redução gradual nos preços das lâmpadas germicidas ao longo dos anos, provocada pelo maior número de empresas fabricantes de lâmpadas UV gerando maior competitividade e também, pela maior eficiência das lâmpadas atuais.

5.6.5 Custos totais (implantação, operação e manutenção)

Nas Tabelas 5.27 a 5.29 apresentam-se os custos atuais (material e serviços) para implantação das três unidades de desinfecção UV projetadas nesta pesquisa, contemplando: canais abertos em concreto, dotados de módulos de desinfecção em aço inox com lâmpadas de baixa pressão a serem instaladas emersas ao fluxo de esgoto. Os custos anuais de operação e manutenção estão também a preços atuais de mercado. Ressalta-se que os custos de operação com energia elétrica estão diferenciados por regiões e estado do RN em função da variação nos preços da energia elétrica.

Na composição dos custos de operação estão apresentados valores para a condição de ensaio que conferiu concentração residual de *Escherichia coli* menor que 1.000 UFC/100 mL em 100% dos ensaios analisados com menor dose (ensaio com lâmina líquida de 6 cm com dose volumétrica aplicada de 8 Wh/m³, em comprimento de onda de 254 nm).

Para subsidiar o cálculo do custo total do investimento a valor presente, ao longo do período de alcance do projeto (determinado nesta pesquisa em 20 anos), aplicou-se uma taxa de juros anual de 11% sobre os custos de operação e manutenção, obtendo-se o valor presente total, definido como custo de implantação mais o valor presente dos gastos anuais. Estes resultados apresentam-se nas tabelas 5.28 a 5.30.

Os dados obtidos indicam investimentos médios aproximados entre 14,3 a 20,5 R\$/habitante, para garantia da desinfecção do esgoto para um período de 20 anos. A desinfecção de esgoto doméstico por radiação UV é uma técnica economicamente viável e compete com a cloração não somente quando da utilização da descloração, como demonstrado na maioria das literaturas disponíveis sobre o assunto.

5 Resultados e Discussões

Tabela 5. 27 – Custos totais anuais da desinfecção UV para unidade de tratamento com capacidade de tratamento de 30 m³/h

Unidade de desinfecção com capacidade de tratamento de 30 m ³ /h						
Custos ¹ (anuais)	S	SE	CO	N	NE	RN
Implantação (material e serviço) (R\$)	26.817,23	26.817,23	26.817,23	26.817,23	26.817,23	26.817,23
Operação (energia elétrica) (R\$)	3.043,71	4.428,62	3.862,99	4.438,59	4.000,14	6.473,11
Manutenção (reposição de lâmpadas) (R\$)	3.072,00	3.072,00	3.072,00	3.072,00	3.072,00	3.072,00
Total (R\$)	75.518,67	86.547,15	82.042,87	86.626,52	83.134,97	102.828,05
Total (R\$/hab)	15,10	17,31	16,41	17,33	16,63	20,57
Média total (R\$/hab)	17,22					

Nota: ¹ Não estão computados nos custos de operação, os custos provenientes de salários e encargos sociais de operadores, sendo este custo já inserido no custo total de uma ETE e, comum a qualquer tecnologia de desinfecção adotada.

Tabela 5. 28– Custos totais anuais da desinfecção UV para unidade de tratamento com capacidade de tratamento de 60 m³/h

Unidade de desinfecção com capacidade de tratamento de 60 m ³ /h						
Custos ¹ (anuais)	S	SE	CO	N	NE	RN
Implantação (material e serviço) (R\$)	45.746,54	45.746,54	45.746,54	45.746,54	45.746,54	45.746,54
Operação (energia elétrica) (R\$)	6.087,43	8.857,25	7.725,99	8.877,18	8.000,27	12.946,22
Manutenção (reposição de lâmpadas) (R\$)	6.144,00	6.144,00	6.144,00	6.144,00	6.144,00	6.144,00
Total (R\$)	143.149,41	165.206,38	156.197,82	165.365,12	158.382,01	197.768,19
Total (R\$/hab)	14,31	16,52	15,62	16,54	15,84	19,78
Média total (R\$/hab)	16,43					

Nota: ¹ Não estão computados nos custos de operação, os custos provenientes de salários e encargos sociais de operadores, sendo este custo já inserido no custo total de uma ETE e, comum a qualquer tecnologia de desinfecção adotada.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

Tabela 5. 29 – Custos totais anuais da desinfecção UV para unidade de tratamento com capacidade de tratamento de 120 m³/h

Unidade de desinfecção com capacidade de tratamento de 120 m ³ /h						
Custos ¹ (anuais)	S	SE	CO	N	NE	RN
Implantação (material e serviço) (R\$)	81.073,83	81.073,83	81.073,83	81.073,83	81.073,83	81.073,83
Operação (energia elétrica) (R\$)	12.174,86	17.714,49	15.451,98	17.754,36	16.000,54	25.892,43
Manutenção (reposição de lâmpadas) (R\$)	12.288,00	12.288,00	12.288,00	12.288,00	12.288,00	12.288,00
Total (R\$)	275.879,58	319.993,51	301.976,39	320.310,98	306.344,78	385.117,13
Total (R\$/hab)	13,79	16,00	15,10	16,02	15,32	19,26
Média total (R\$/hab)	15,91					

Nota: ¹ Não estão computados nos custos de operação, os custos provenientes de salários e encargos sociais de operadores, sendo este custo já inserido no custo total de uma ETE e, comum a qualquer tecnologia de desinfecção adotada.

6.0 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, conclui-se:

- O efluente final das unidades de tratamento avaliadas, considerando-se os principais parâmetros físico-químicos que interferem na desinfecção por radiação UV, apresentou valores de turbidez, absorvância e ferro total superiores aos usuais recomendados para desinfecção com radiação UV, não comprometendo, porém, a desinfecção. Por outro lado, a concentração média de sólidos suspensos foi baixa e satisfatória à desinfecção UV;
- A intensidade média das lâmpadas utilizadas na pesquisa, obtida por actinometria, apresentou incidência média de radiação UV de $1,89 \text{ mW/cm}^2$ e, portanto, 27,31% inferior ao máximo valor estimado pelo fabricante que é de $2,60 \text{ mW/cm}^2$. Este comportamento deve-se às perdas pelo refletor e envelhecimento das lâmpadas;
- As doses efetivas de radiação UV aplicadas por volume (nos ensaios de desinfecção e fotorreativação e recuperação no escuro de microrganismos após radiação UV) apresentaram pequenas oscilações entre as diferentes alturas de lâminas líquidas, resultando em doses de 8, 16, 24, 32 e 40 Wh/m^3 . No entanto, quando aplicadas aos ensaios de desinfecção UV, as doses absorvidas variaram conforme as características do esgoto. Os resultados obtidos expressam perdas significativas na dose recebida entre 54 e 94% para as lâminas líquidas de 2 a 10 cm;
- O consumo de energia na utilização da desinfecção por radiação UV aumenta quando, em função de maior absorvância do esgoto, se eleva a dose aplicada volumétrica para obter-se uma determinada eficiência. Neste sentido, melhorar a eficiência do tratamento nas unidades que antecedem a desinfecção, mais especificamente em termos de remoção de substâncias de elevado potencial de absorção da radiação UV, pode ser uma alternativa visando minimizar custos;

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

- A concentração remanescente dos indicadores microbiológicos testados seguiu ordem decrescente de inativação, sendo esta: *Clostridium perfringens*, coliformes totais e *Escherichia coli*;
- As doses de radiações UV utilizadas nos ensaios com alturas de lâminas líquidas-ALL de 2 e 4 cm foram muito elevadas e consequentemente inviabilizaram a análise da dose mínima necessária para atender ao padrão de referência microbiológico adotado nesta pesquisa (*Escherichia coli* ≤ 1.000 UFC/100 mL). Nos ensaios de ALL de 2 e 4 cm a inativação de *Escherichia coli* foi de 100 e 80%, respectivamente, do total das amostras;
- Os ensaios com ALL de 6 cm apresentaram valores de turbidez, sólidos totais e absorvância elevados não comprometendo, porém, a desinfecção. Por outro lado, a concentração de sólidos suspensos foi baixa, e o diâmetro de partículas de pequenas dimensões, o que pode ter contribuído para efetividade da desinfecção. Os resultados indicaram concentrações remanescentes de *Escherichia coli* inferiores a 1.000 UFC/100 mL em todas as doses testadas. Nestas condições, pode-se avaliar uma dose menor que a mínima utilizada que foi de 8 Wh/m³;
- Oitenta por cento das amostras desinfetadas nos ensaios com alturas de lâminas líquidas de 8 cm apresentaram concentração de *Escherichia coli* superior ao padrão de referência (até 1.000 UFC/100 mL) quando aplicadas doses de 8 e 16 Wh/m³. Para o atendimento deste padrão, dever-se-á aumentar a dose, elevando-se, consequentemente, o custo da desinfecção;
- De forma não esperada, as eficiências de inativação de *Escherichia coli* dos ensaios com ALL de 10 cm superaram os ensaios com ALL de 8 cm. Estes resultados estão associados ao maior tempo de contato estabelecido nos ensaios com ALL de 10 cm para atender a mesma dose volumétrica aplicada nos ensaios com ALL de 8 cm. Maiores tempos de contatos propiciaram também maior homogeneização da amostra (as amostras desinfetadas nos ensaios com ALL de 10 cm ficaram submetidas à agitação por maior tempo).

6 Conclusões

Maior tempo de exposição e homogeneização possibilitou elevar a probabilidade do microrganismo ser atingido pela radiação UV.

- A eficiência de inativação da *Escherichia coli* diminuiu com aumento de altura de lâmina líquida para as ALL de 2, 4 e 6 cm, no entanto, não se verificou perdas significativas de eficiência entre as ALL de 6 e 8 cm. Como já mencionado, não se observou diminuição de eficiência entre as ALL de 8 e 10 cm.

- A partir dos resultados obtidos pode-se sugerir que, em geral, o diâmetro da partícula interfere de forma determinante na eficiência da desinfecção UV;

- Os efeitos da fotorreativação e da ausência de luz no recrescimento dos microrganismos indicadores (coliformes totais e *Escherichiacoli*) foi mais perceptível na ausência de luz. A fotorreativação foi minimizada devido à desinfecção complementar da radiação UV natural e ainda, pela absorção da radiação solar pelo vidro relógio e filme PVC, ambos entre 8 e 10%, utilizados para recobrimento da amostra para impedir contaminação;

- Analisando-se os custos de implantação das unidades de desinfecção propostas nesta pesquisa, verifica-se uma economia de escala de 14,71% entre as unidades de tratamento com vazões de 30 e 60 m³/h e de 24,42% entre as unidades de tratamento com vazões de 30 e 120 m³/h;

- Os custos de implantação das unidades de desinfecção UV projetadas nesta pesquisa, foram significativamente menores que os dos modelos industriais A, B e C, ou seja: o custo médio total para elaboração dos projetos, aquisição e instalação dos módulos de desinfecção da indústria A (excluindo-se o canal de desinfecção) ultrapassa em 99,7% o valor médio estimado nos projetos deste estudo; os custos totais de aquisição dos módulos, suportes e lâmpadas de desinfecção UV da indústria A, superam em aproximadamente 74%, os valores das unidades projetadas nesta pesquisa; O equipamento da indústria B (canal e módulos de desinfecção) apresentou um custo médio superior aos das unidades projetadas nesta pesquisa entre 70,37 e 77,60%; os modelos da

indústria C, também apresentaram custos maiores do que os sistemas elaborados nesta pesquisa;

- O custo com energia elétrica variou entre 0,01 R\$/m³ (região sul) e 0,02 R\$/m³ (estado do RN), ou, 0,61 R\$/hab/ano (região Sul) e 1,29 R\$/hab/ano (estado do RN) para a condição de análise na qual a concentração residual de *Escherichia coli* foi menor que 1.000 UFC/100 mL em 100% dos ensaios analisados com menor dose (ensaio com lâmina líquida de 6 cm com dose volumétrica aplicada de 8 Wh/m³, em comprimento de onda de 254 nm);

- A tarifa de energia elétrica praticada de forma não isonômica nas diferentes regiões do Brasil pode ser um fator limitante na utilização de sistemas de desinfecção com radiação UV. O estado do Rio Grande do Norte, por exemplo, tem uma tarifa média que supera em aproximadamente 54% a da região Norte, que é a maior tarifa média entre as regiões do Brasil;

- Os custos de operação e manutenção para a desinfecção com radiação UV obtidos nesta pesquisa foram baixos e competem com outros desinfetantes;

- Os custos médios globais anuais (implantação, operação e manutenção) obtidos variam de 14,3 a 20,5 R\$/habitante, para garantir a desinfecção do esgoto por radiação UV durante 20 anos;

A desinfecção de esgoto doméstico por radiação UV é uma técnica economicamente viável e compete com a cloração não somente quando da utilização da descloração, como demonstrado na maioria da literatura técnica disponível sobre o assunto.

7.0 RECOMENDAÇÕES

- Muito embora o diâmetro da partícula não seja ainda considerado um indicador da qualidade do efluente a ser desinfetado por radiação UV, recomenda-se em contraposição ou conjuntamente com os parâmetros já conhecidos, que o mesmo seja incluindo.
- Existe na literatura controvérsia referente à dose de radiação UV necessária para garantir a não recuperação dos microrganismos após exposição à radiação UV, o que impossibilita uma tomada de decisão. No entanto, sabe-se que este comportamento é variável entre espécies ou na mesma espécie, sendo, portanto, necessária sua investigação.
- Avaliar alternativas de energia na aplicação da radiação UV, como por exemplo, a energia solar. Esta opção poderá diminuir os custos associados à energia, sendo esta, predominante nos custos de operação.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, H. I. (1996). **The genetic controlo f radiation sensitivity in microorganisms**. Advances in radiation 2. P 167-191.

AISSE, M. M. et al (2003).In GONÇALVES, R.(Coordenador). **Desinfecção de efluentes sanitários**, remoção de organismos patogénos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia. Cloração e descloração. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária- ABES. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 438 p.

ALVES, C. V. P. et al. (2004) **Sistema integrado para tratamento biológico e desinfecção de esgotos sanitários: uma alternativa para atendimento a pequenas populações**. Assembléia Nacional da ASSEMAE, 34. Rio Grande do Sul, p. 16-2. Maio 2004.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2011). **Informações técnicas- tarifas médias por regiões**. Disponível em: <www.aneel.gov.br> Acesso em 01 de Nov de 2011.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA(2000). Pesquisa nacional de saneamento básico. 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> . Acesso em: 12 abril..2007.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2008). **Pesquisa nacional de saneamento básico**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> . Acesso em: 31 outubro 2011.

APHA, AWWA, WEF. (1999). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 20 ed., Washington.

ARAÚJO, A. L. *et al.* (2003). **Avaliação da ETE Ponta Negra (Natal/RN): remoção de matéria orgânica e ciclo do fósforo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. Anais. Rio de Janeiro:ABES, 2003a.1 CD.

8 Referências Bibliográficas

AWWA. American Water Works Association (1964). **Água, Tratamento e Qualidade**. Tradução Allyrio Macedo Filho e Zadir Castello Branco. Missão Norte Americana de Cooperação Econômica e Técnica. Editora Ao Livro Técnico S.A. Rio de Janeiro. 465 p.

AWWA. American Water Works Association (1995). **Development and validation of rational design methods of disinfection**. 6666, West Quincy Avenue. Denver. CO. 80235.

BAIRD, C. (2001). **Environmental chemistry**, W. H. Freeman and Company Ed. 2 ed.. New York.

BARTHEM, R. (2005). **A luz- Temas atuais de física**. Editora Livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física. São Paulo. 1 ed. p. 38.

BILOTTA, P. (2000). **Estudo comparativo da ação do ozônio e radiação ultravioleta na desinfecção de esgoto sanitário**. 130 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. (2006). **Ozônio e radiação UV na inativação de indicadores patogênicos em esgoto sanitário: análise comparativa**. Minerva, 3(2): p199- 207.

BJORN, L. O; MCKENZIE, R, L (2008). In BJORN, L. O. (Ed). **Photobiology – The science of life and light**. 2 ed. Sweden: University Lund, 2008. 659 p.

BLAKE et al (1987). **Distribution and accumulation of Zinc in *Typha latifolia***. In: REDDY, K, R e SMITH, W. H (eds). Aquatic plants for water treatment and resource recovery. Florida, Magnolia. P. 487-495.

BRAUN, A. M.; MAURETTE, M. T.; OLIVEIROS E. (1991) **Photochemical technology**. John Wiley & Sons. New York, 1991.

CARLSON, D. A., et al. (1982). **Project Summary: Ultraviolet Disinfection of Water for Small Water Supplies**. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency; Cincinnati, OH, EPA/600/S2-85/092.

CAMPBELL, A.T., et al. (1995). **Inactivation of Oocysts of *Cryptosporidium parvum* by Ultraviolet Radiation**. Water Research. 29(11):2583.

CAMPOS, J. R; PIZZIRANI, J (1977). A. **Desinfecção com radiação ultravioleta**. In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. Belo Horizonte. 1977. Anais.

CAVICCHIOLI, A; GUTZ, I. G. R. (2003). **O uso de radiação ultravioleta para o pré-tratamento de amostras em análise inorgânica**. Química Nova, São Paulo, v. 26, nº 6, p. 913-921.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1993). **Clostridium Perfringens: Determinação de amostras de água pela técnica dos tubos múltiplos**. Método de ensaio L5/213. 27 p. São Paulo.

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

CHERNICHARO, C. A. L. *et al* (2001). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de desinfecção**. In: Pós-tratamento de efluentes anaeróbios. Belo Horizonte. PROSAB/FINEP.

CILAS (2008). **Granulômetro por difração a laser - difração Fraunhofer**. Disponível em : <www.cilas.com/granulometrie.html>. Acesso em: 06 de outubro de 2008.

COLETTI, F. J (2003); **Inativação de microorganismos indicadores presentes em efluentes secundários de esgoto sanitário com radiação ultravioleta**. 239 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE- CONAMA. (2011). **Resolução nº 430 de 13.05.11**. 2011. Brasil.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE- CONAMA. (2005). **Resolução nº 357 de 18.03.05**. 2005. Brasil.

COSTA, J. B. (2007). **Avaliação ecotoxicológica de tratamento secundário de esgoto sanitário após desinfecção com ácido peracético, cloro, azônio e radiação ultravioleta**. 178 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

DANIEL, L. A. (1989). **Desinfecção de efluentes de esgoto sanitário pré-decantado empregando radiação ultravioleta**. 124p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DANIEL, L. A. et al. (2001). **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária- ABES. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 155 p. 2001.

DE OLIVEIRA, F; ALEM SOBRINHO, P. (2007) **Estudo da desinfecção com cloro gás e radiação UV de efluentes nitrificados e não nitrificados de sistemas de lodos ativados. Produção de trihalometanos**. In:XXVII Congresso Interamericano de IngenieriaSanitaria y Ambiental. Porto Alegre. Anais. CD-ROM.

DI BERNARDO, L; A. DI B. Dantas (2005). **Métodos e técnicas de tratamento de água**. v.1 e 2 . RIMA. 2ª ed. 1565. p.2005.

DIAS, V. D. (2001). **Radiação ultravioleta e ozônio aplicados como métodos alternativos de desinfecção de efluentes secundários de esgoto sanitário**. 150 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

DOMÈNECH, X; JARDIM, W. F; LITTER, M. I. (2001). **Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes**. In: Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogênea, cap. 1, Rede CYTED, La Plata.

DRIZO, A. et al. (1997). **Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow, using shale as a substrate**. Water Science and Technology, 35, (5), 95 – 102.

EMERICK, R.W. et al. (2000) **Modeling the inactivation of particle associated coliform bacteria**. Water Environment Research. V. 72, n. 4. p 432-438.

EPA. U.S. Environmental Protection Agency (1986). **Ultraviolet Design manual: municipal wastewater disinfection**. Cincinnati: Office of research

and development. Water engineering. Research Laboratory. Center for Environmental Research Information (EPA 625-1-86-021). United States.

EPA. U.S. Environmental Protection Agency. (1990). **Guidance manual for compliance with the filtration and disinfection requirements for public water systems using surface water sources**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. United States.

EPA. U. S. Environmental Protection Agency (1999a). **Alternative disinfectants and oxidants. Guidance manual**. (EPA 815-R-99-014). United States.

EPA. U. S. Environmental Protection Agency (1999b). **Wastewater – Technology Fact Sheet – Ultraviolet Disinfection**. (EPA 832-F-99-064). United States.

EPA. U. S. Environmental Protection Agency (2006). **Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule**. (EPA 815-R-06-007). United States.

GADGIL, A. et al (1998). **Low costs uv disinfection system for developing countries: Field tests in South Africa**. In: First International Symposium on Safe Drinking Water in Small Systems. Washington, D.C. USA.

GATES, F.L. (1929). **A study of the bactericidal action of ultraviolet light**. Journal of General Physiology 13:231–260.

GERBA, C. P; GRAMOS, D. M; NWACHUKU (2002). N. **Comparative Inactivation of Enteroviruses and Adenovirus 2 by UV Light**. Applied and Environmental Microbiology. American Society for Microbiology. All Rights Reserved V.68, n. 10, p. 5167-5169.

GOMES, P. H. (2009). **Sistemas de abastecimento de água: Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias**. Editora Universitária UFPB. 3 ed. 277 p.

GONÇALVES, R. F. et al. (2003). In GONÇALVES, R.(Coordenador). **Desinfecção de efluentes sanitários**, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia. Introdução. Associação Brasileira de Engenharia

8 Referências Bibliográficas

Sanitária- ABES. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 422p.

HALLIDAY, D; R. RESNICK. (1978). **Physics**. John Wiley & Sons. New York. 1 Ed. vol. 2. 813 p.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2000). **Pesquisa nacional de saneamento básico**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> . Acesso em: 31 outubro 2011.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2008). **Pesquisa nacional de saneamento básico**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> . Acesso em: 01 nov. 2011.

IDEMA. INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E AMBIENTAL DO RIO GRANDE DO NORTE (2005). **Anuário Estatístico- RN**.

INTERNATIONAL WATER – GUARD INDUSTRIES INC. THE WATER KNOWLEDGE COMPANY (2002). **Disinfection of water by ultraviolet light**. Disponível em: <[HTTP://www.waterknowledge.com](http://www.waterknowledge.com)> Acesso em: 14 abril. 2007.

JAGGER, J. (1967). **Introduction to Research in Ultraviolet Photobiology**. Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, Inc. Adler, H.I. 1966. The genetic control of radiation sensitivity in microorganisms. *Advances in Radiation*2:167–191.

JORDÃO, E, P; ALEM SOBRINHO, P (2003).In GONÇALVES, R.(Coordenador). **Desinfecção de efluentes sanitários**, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia. Análise crítica: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária- ABES. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 422 p.

JORDÃO, E. P; PESSÔA, C. A. (2005). **Tratamento de esgoto doméstico**. 4 ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária- ABES. Rio de Janeiro. 932 p.

KEEGAN, A. R. et al (2003). **Cell Culture-Taqman PCR Assay for Evaluation of. Applied and Environmental Microbiology**. American Society for Microbiology. All Rights Reserved V.69, n. 5, p. 2505-2511.

KRUIHOF, J.C; R.C. VAN DER LEER. (1990). **Practical experiences with UV-disinfection in The Netherlands**. Proceedings of the AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION seminar on emerging technologies in practice, Annual

Conference of the American Water Works Association, Cincinnati, OH, June 17 – 21.

LABORATÓRIO DE FÍSICA ATMOSFÉRICA (2010). **Radiación ultravioleta**. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz. Bolívia. Disponível em: <http://www.lfabolivia.org/?page_id=108&lang=pt>. Acesso em: 30 Jun. 2010.

LAPOLLI, F. R. et al (2003). **Desinfecção de efluentes sanitários por meio da ozonização**. In GONÇALVES, R.(Coordenador): Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia: coletânea de artigos técnicos. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária-ABES. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 422 p.

LEE, E. et al.(2009). **Influences of humic acids and photoreactivation on the disinfection of *Escherichia coli* by a high-power pulsed UV irradiation**. Journal of Chemical Engineering Korean. Yongin, Korea. V. 26(5). P. 1301-1307. DOI: 10.2478/s11814-009-0208-5.

LEVERENZ, H; DARBY, J; TCHOBANOGLOUS, G. (2006)**Evaluation of disinfection units for onsite wastewater treatment systems**. Report No. 2006-1. Centre for Environmental and Water Resources Engineering, University of California, Davis, CA, USA.

LINDENAUER, K. G; DARBY JL. (1994). **Ultraviolet disinfection of wastewater: effect of dose on subsequent photoreactivation**. Water Res. 28. p.805-817.

LOCAS, A; DEMERS, J; PAYMENT, P. (2008). **Evaluation of photoreactivation of *Escherichia coli* and enterococci after UV disinfection of municipal wastewater**. Canadian Journal of Microbiologyn. V. 54 (11). P. 971-975. DOI 10.1139/W08-088.

MASSCHELEIN, W. J. (2002). **Ultraviolet light in water and wastewater sanitation**. Edited for English by Rip G. Rice. Lewis Publishers. p. 175.

MAYA, C. et al (2003). **Evaluation of the UV disinfection process in bacteria and amoebae inactivation**. Water Science and Technology: water Supply. IWA Publishing. v. 3, n. 4,p. 285-29.

MEDEIROS, R. C. (2010). **Comparação da resistência de protozoários patogênicos - Giardia spp. e Cryptosporidium spp. - e de microrganismos indicadores à desinfecção sequencial cloro-radiação ultravioleta e ozônio-radiação ultravioleta.** 210 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

MENESES, C. G. R (2006). **Evolução da biodegradabilidade da matéria orgânica em um sistema de lagoa de estabilização.** 120p. Tese (Doutorado em Engenharia Química).Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Tratamento de águas e efluentes. Desinfecção ultravioleta. (2010). Disponível em : www.naturaltec.com.br/Desinfecção-Ultravioleta.html. Acesso em: 02 de fev. de 2010.

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

NERALLA, S. et al (2000). **Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands.** Bioresource Technology, 75, 19-25.

NETSHIDAULU, A. E. et al (2008). **Effectiveness of chlorine as disinfectant for wastewater.** Water Instituto of. AS. Disponível em: www.ewisa.co.za. Acesso em 11 abr. 2011.

OLIVER, B. G.; COSGROVE, E. G. (1975). **The disinfection of sewage treatment plant effluents using ultraviolet light.** Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 53, n. 4, p. 170-174.

PIRES, A. S. T. (2008). **Evolução das idéias da física.** Editora Livraria da Física. São Paulo. 1 ed. p. 481.

PIZA, A. F. R. de T. (2003). **Mecânica quântica.** Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo. P. 613.

QUEK, P. H; JIANGYONG HU, E. (2008) **Indicators for photoreactivation and dark repair studies following ultraviolet disinfection.** Journal of industrial microbiology & biotechnology. Heidelberg. Alemanha. V. 35. P. 533-541. DOI 10.1007/s10295-008-0314-0.

RODIER, J. (1981) **Analises de las aguas. Aguas naturales, aguas residuales y aguas del mar.** Barcelona, Omega S.A.

SAMPAIO, A. de O. (1985). **Desinfecção de esgotos sanitários com radiação ultravioleta.** 96p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

SANT' ANA, T. DAL' COL. et al. (2003). **Influência do tempo de funcionamento das lâmpadas UV na eficiência de reatores de desinfecção de esgoto sanitário por radiação ultravioleta.** In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville - Santa Catarina. Anais.

SANTOS, J. A. DE C. (2010). **Estudo da influência do cloreto de sódio na remoção de matéria orgânica, na determinação da DQO e na microbiota em um sistema de tratamento aeróbio por lodos ativados.** 98p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

SANZ, E. N; et al. (2007). **Modelling of reactivation after UV disinfection: effect of UV-C dose on subsequent photoreactivation and dark repair.** Water Research. V 41, p. 3141-3151.

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

SHIN, GWY-AM. et al (2008). **Inactivation of *Mycobacterium avium* Complex by UV Irradiation.** Applied and Environmental Microbiology. American Society for Microbiology. All Rights Reserved V.74, n. 22, p. 7067-7069.

SILVA FILHO, P. A. et al. (2006). **Predominância de lagoas de estabilização tipo facultativa no Nordeste brasileiro.** In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA DE SAÚDE PÚBLICA, 3., 2006, Fortaleza. Anais. Brasília: FUNASA, 2006. p.253-257.

SLADE, J. S., N.R. HARRIS; R.G. CHISHOLM. (1986). **Disinfection of Chlorine Resistant Enteroviruses in Ground Water by Ultraviolet Radiation.** Water Sci. Technol. 189(10):115-123.

8 Referências Bibliográficas

SNICER, G.A. et al.(1996). **Evaluation of Ultraviolet Technology in Drinking Water Treatment.** Presented at AWWA Water Quality Technology Conference, Boston, MA.

STOTTMEISTER, U. et al. (2003). **Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment.** Biotechnology Advances, 22, p. 93 – 117.

SILVA, S; S. (2007). **Aplicação de desinfecção UV para efluente da associação de reator UASB e biofiltro aerado submerso.** 149 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

SOUZA, J. B. (2000). **Desinfecção de águas com cor e turbidez elevadas: comparação técnica de processos alternativos ao cloro empregando radiação ultravioleta e ácido peracético.** 130 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

SOUZA, J. B; SARTORI, L; DANIEL, L. A. (2000). **Influência da cor e turbidez na desinfecção de águas de abastecimento utilizando-se cloro e radiação ultravioleta.** In: XXVII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre. Anais. CD-ROM.

TINÔCO, J. D. (2003) **Caracterização do Efluente da Estação de Tratamento de Esgoto Ponta Negra, visando sua Reutilização em Irrigação de Canteiros Públicos na Cidade de Natal - RN.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal-RN, Brasil.

TOMINAGA; M. Y; MIDIO; A. F. (1999). **Exposição humana a trihalometanos presentes em água tratada.** Revista de Saúde Pública – FSP/USP. São Paulo. vol.33. nº 4. p. 413- 421. Agosto de 1999.

TOSA, K; HIRATA, T. (1999). **Photoreactivation of enterohemorrhagic Escherichia Coli following UV disinfection.** Water Research. J. IndMicrobiolBiotechnol. V 33, n. 2, p. 361-366.

VOET, D; VOET, J. G; PRATT, C. W. (2008). **Fundamentos de bioquímica: a vida em nível molecular.** Tradução Jaqueline Josi Samá Rodrigues et al. 2 ed. Porto Alegre. Artmed.P. 1264.

Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica

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

WEF. WATER ENVIRONMENTAL DEFERATION (1996a). **Wastewater disinfection..** Manual of practice. FD-10. Alexandria. p. 299.

WEF. WATER ENVIRONMENTAL DEFERATION (1996b). **Operation of municipal wastewater treatment plants: manual of practice**. MOP-11. 5. Ed. Alexandria: 1351 p.

YONG, C. G. et al. (2007). **Microorganism repair after UV-disinfection of secondary-level effluent for agricultural irrigation**. Paddy Water Environment. V 5, p. 57-62.

ZIMMER, J. L; SLAWSON, R. M; HUCK, P. M. (2003). **Inactivation and potential repair of *Cryptosporidium parvum* following low-and médium-pressure ultraviolet irradiation**. Water Research. V 37, p. 3517-3523.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS UNIDADES DE DESINFECÇÃO UV

No dimensionamento das unidades de desinfecção UV foram considerados dados obtidos nos ensaios de batelada realizados em laboratório. Os parâmetros médios adotados foram:

- altura de lâmina líquida: 6 cm,
- dose volumétrica aplicada: 8 Wh/m³
- absorvância máxima a 254 nm: 0,4
- populações atendidas 5.000, 10.000 e 20.000 habitantes
- concentração máxima de *E. coli* no afluente: 1,00 x10⁵ UFC/100mL
- concentração máxima de *E. coli* no efluente: 1,00 x 10³ UFC/100mL
- fonte de radiação: lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio com 30 W de potência nominal
- Potência a 254 nm da lâmpada nova: 8,1 W (dados do fabricante)
- 35% de perda de radiação no refletor de alumínio
- 30% de perda pelo envelhecimento da lâmpada

Na Tabela A1 apresentam-se, para cada população de referência, as vazões quantificadas e adotadas nos projetos.

Tabela A1 – Vazões de dimensionamento das unidades de desinfecção

População	Q _{máx} diária		
	(L/dia)	(L/s)	(m ³ /h)
5.000	720.000	8,33	30
10.000	1.440.000	16,67	60
20.000	2.880.000	33,33	120

O número de lâmpadas foi calculado com base na Equação A1. No entanto, considerando 35% de perda de radiação no refletor de alumínio e 30% de perda pelo envelhecimento da lâmpada, tem-se uma potência disponível de 3,68 W/lâmpada.

$$n = \frac{QD}{P} \quad (A1)$$

Q: vazão (m³/h)

D: potência aplicada (Wh/m³)

P: potência disponível/lâmpada (W)

Na Tabela A2 apresenta-se o número de lâmpadas necessárias para cada unidade de desinfecção projetada.

Tabela A2 – Número de lâmpadas dimensionadas

Projetos	Vazão de Tratamento (m ³ /h)	Número de lâmpadas necessárias
1	30	65
2	60	130
3	120	260

As lâmpadas serão distribuídas em módulos para desinfecção UV, confeccionado em aço inox, cada módulo contendoum refletordotado de 8 lâmpadas de 30 W e instaladas emersas ao fluxo de esgoto. Os módulos serão encaixados em canais de concreto com chicanas.

Em função da geometria dos canais, o número de lâmpadas de cada projeto foi alterado, sendo: 64 lâmpadas no projeto 1, 128 lâmpadas no projeto 2 e 256 lâmpadas no projeto 3.

A altura da lâmina líquida (projetada para 6 cm) poderá sermodificada por meio de vertedores retangulares instalados nas saídas da unidades. As dimensões e detalhes destas unidades estão apresentados no Apêndice B.

APÊNDICE B – PLANTAS DAS UNIDADES DE DESINFECÇÃO UV (MÓDULOS E CANAIS DE DESINFECÇÃO)
MÓDULOS DE DESINFECÇÃO EM AÇO
INOX

Figura B1 – Desenho esquemático do módulo de desinfecção UV
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B2 – Detalhe da tampa parafusável do módulo de desinfecção SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

Figura B3 – Corte AA do módulo de desinfecção UV
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B4 – Corte BB do módulo de desinfecção UV
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

ESQUEMA DE LIGAÇÃO REATOR-LÂMPADAS

Figura B5 –Esquema gráfico das instalações elétricas do módulo de desinfecção UV (corte AA)
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B6– Esquema gráfico das instalações elétricas do módulo de desinfecção UV (corte BB)
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B8 – Corte AA do canal de desinfecção UV para vazão de 30 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

Figura B9– Corte BB do canal de desinfecção UV para vazão de 30 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B10 – Corte CC do canal de desinfecção UV para vazão de 30 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B12 – Vista frontal das instalações elétricas do canal de desinfecção UV para vazão de 30 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM MILÍMETRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

Figura B13– Diagrama unifilar das instalações elétricas do canal de desinfecção UV para vazão de 30 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM MILÍMETRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

Figura B15 – Corte AA do canal de desinfecção UV para vazão de 60 m³/h
SEM ESCALA

Figura B16– Corte BB do canal de desinfecção UV para vazão de 60 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B17 – Corte CC do canal de desinfecção UV para vazão de 60 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

VISTA A - CONJ 2

VISTA B - CONJ 2

VISTA C - CONJ 2

Figura B19 – Vistas A, B e C das instalações elétricas do canal de desinfecção UV para vazão de 60 m³/h SEM ESCALA – UNIDADE EM MILÍMETRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

Figura B20– Diagrama unifilar das instalações elétricas do canal de desinfecção UV para vazão de 60 m³/h SEM ESCALA – UNIDADE EM MILÍMETRO

Figura B21 – Desenho gráfico esquemático do canal de desinfecção UV para vazão de 120 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

Figura B22 – Corte AA do canal de desinfecção UV para vazão de 120 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B23 – Corte BB do canal de desinfecção UV para vazão de 120 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Figura B24 – Corte CC do canal de desinfecção UV para vazão de 30 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM METRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

Figura B25 – Detalhe gráfico das instalações elétricas do canal de desinfecção UV para vazão de 120 m³/h
SEM ESCALA – UNIDADE EM MILÍMETRO

Figura B26 – Vistas A, B e C das instalações elétricas do canal de desinfecção UV para vazão de 60 m³/h SEM ESCALA – UNIDADE EM MILÍMETRO

Apêndice B Plantas das Unidades de Desinfecção UV (Módulos e Canais de Desinfecção)

Figura B27– Diagrama unifilar das instalações elétricas do canal de desinfecção UV para vazão de 30 m³/h SEM ESCALA– UNIDADE EM MILÍMETRO