

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**DESINFECÇÃO DE ESGOTOS COM RADIAÇÃO  
ULTRAVIOLETA: INFLUÊNCIA DA  
QUALIDADE DO EFLUENTE E DA  
FOTORREATIVAÇÃO**

**Marco Roberto Pires**

**Campinas, SP  
2002**

UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**


**DESINFECÇÃO DE ESGOTOS COM RADIAÇÃO  
ULTRAVIOLETA: INFLUÊNCIA DA  
QUALIDADE DO EFLUENTE E DA  
FOTORREATIVAÇÃO**

**Candidato: Marco Roberto Pires**

**Orientador: Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani**

Tese de doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento e Ambiente.

**Campinas, SP  
2002**

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese. 30/02  
Prof. Dr.   
Matrícula: 22282-8  
Matrícula 22282-8  
Depto. Água e Solo/FEAGRI/UNIC

UNIDADE de  
1ª CHAMADA UNICAMP  
P664d  
/ \_\_\_\_\_ EX \_\_\_\_\_  
COMBO BCI 51195  
PROC 16.83710e  
S \_\_\_\_\_ DX \_\_\_\_\_  
PREÇO R\$ 11,00  
DATA 22-10-02  
Nº CPD \_\_\_\_\_

CM00175008-7

BIBID: 263867

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

<sup>4</sup>  
P664d

Pires, Marco Roberto

Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta:  
influência da qualidade do efluente e da fotorreativação /  
Marco Roberto Pires. --Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: José Euclides Stipp Paterniani.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

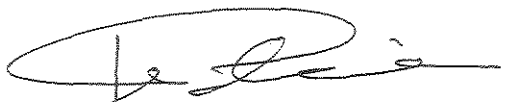
1. Desinfecção e desinfetantes. 2. Águas residuais. 3.  
Esgotos. 4. Radiação ultravioleta. 5. Água - Purificação  
- Tratamento biológico. I. Paterniani, José Euclides Stipp.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Civil. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

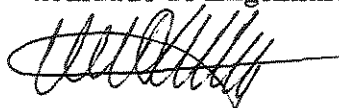
DESINFECÇÃO DE ESGOTOS COM RADIAÇÃO  
ULTRAVIOLETA: INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DO  
EFLUENTE E DA FOTORREATIVAÇÃO

MARCO ROBERTO PIRES

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani  
Presidente e Orientador / Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP



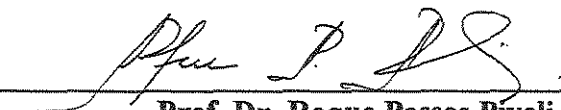
Prof. Dr. Roberto Feijó de Figueiredo  
Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP



Prof. Dr. Edson Aparecido Abdul Nour  
Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP



Prof. Dr. Denis Miguel Roston  
Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP



Prof. Dr. Roque Passos Piveli  
Faculdade de Saúde Pública - USP

Campinas, 24 de junho de 2002

20219523

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que ajudaram de alguma forma a realização deste trabalho, em especial:

- ✓ Ao Prof. Dr. Paterniani por acreditar na realização deste projeto, pela orientação e amizade;
- ✓ Ao Prof. Dr. Feijó que sempre esteve em outros projeto entre os quais este que deu origem ao doutoramento;
- ✓ Aos Profs Drs. Edson e José Roberto (Tuca) que ajudaram a sanar dúvidas;
- ✓ À Prof. Dra. Maria Elisa Paterniani que foi muito importante para análise estatística dos resultados;
- ✓ À Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP;
- ✓ À Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP em nome do Prof. Dr. Dênis Miguel Roston que disponibilizou o Laboratório de Saneamento para realização de ensaios experimentais;
- ✓ Aos técnicos de laboratório Túlio Pires Ribeiro (FEAGRI), Carolina Farah (FEC), Marcelo (FEC), Angélica (FEAGRI) e ao estagiário Sérgio (FEC);
- ✓ Aos responsáveis pelas Estações de Tratamento de Esgoto que disponibilizaram a locação do módulo experimental para coleta de amostras. E aos técnicos das estações que sempre estiveram a disposição para ajudar;
- ✓ Aos amigos que sempre incentivaram o trabalho
- ✓ Aos minha família e especial aos meus pais que sempre me apoiaram;
- ✓ À Marta, minha esposa, que ajudou em algumas coletas de dados em campo, e análises de amostras. Além da ajuda física, gostaria de agradecer pelo companheirismo, compreensão, paciência, carinho e amor.

Agradecimentos especiais à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Fapesp, que apoiou este projeto através de bolsa de estudo, processo 97/11210-1.

## Dedicatória

Dedico este trabalho à  
Marta, minha esposa.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<i>i</i>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<i>v</i>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<i>viii</i>
<b>RESUMO</b>	<i>x</i>
<b>ABSTRACT</b>	<i>xi</i>
<b>CAPÍTULO 1 – Introdução</b>	<i>1</i>
<b>CAPÍTULO 2 - Objetivos</b>	<i>4</i>
<b>CAPÍTULO 3 – Revisão Bibliográfica: Radiação Ultravioleta</b>	<i>5</i>
3.1 – Introdução	<i>5</i>
3.2 – Espectro da Radiação Ultravioleta	<i>7</i>
3.3 – Lâmpadas Bactericidas	<i>7</i>
3.4 – Dose de Radiação Ultravioleta	<i>10</i>
3.5 – Inativação dos Microrganismos	<i>16</i>
3.5.1 – Cinética de Lesões Únicas em Alvos Únicos	<i>16</i>
3.5.2 – Cinética de Alvos Múltiplos	<i>18</i>
3.5.3 – Cinética de Lesões Múltiplas	<i>21</i>
3.6 – Fotorreativação	<i>24</i>
3.7 – Características Hidráulicas de Reatores	<i>26</i>
3.7.1 – Tempo de Residência Hidráulica	<i>26</i>
3.7.2 – Dispersão	<i>28</i>
3.7.3 – Turbulência	<i>29</i>
3.7.4 – Volume Efetivo	<i>30</i>
3.8 – Reatores Fotoquímicos	<i>30</i>
3.8.1 – Reatores Fotoquímicos de Lâmpadas Emersas	<i>31</i>
3.8.2 - Reatores Fotoquímicos Cilíndricos de Câmaras Luminosas Coaxiais	<i>32</i>

3.9 – Custo do Sistema de Radiação Ultravioleta	34
3.10 – Desvantagens dos Sistemas de Radiação Ultravioleta	36
<b>CAPÍTULO 4 – Materiais e Métodos</b>	<b>37</b>
4.1 - Introdução	37
4.2 - Caracterização do Sistema de Ultravioleta	37
4.2.1 – Caracterização Física dos Reatores	38
4.2.2 – Comportamento Hidrodinâmico dos Reatores	42
4.3 – Ensaio de Inativação	43
4.3.1 – Eficiência dos Reatores na Inativação de Microrganismos	44
4.3.2 – Fotorreativação dos Microrganismos	46
4.3.3 – Parâmetros Analisados	46
4.4 – Fotorreativação em Condições Controladas	47
<b>CAPÍTULO 5 – Resultados e Discussão</b>	<b>50</b>
5.1 - Comportamento Hidrodinâmico dos Reatores	50
5.2 – Ensaio de Inativação	55
5.3 - Ensaio de Fotorreativação em Condições Controladas	104
<b>CAPÍTULO 6 – Conclusões</b>	<b>121</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>124</b>



## LISTA DE FIGURAS

3.1 - Espectro eletromagnético	07
3.2 - Efeito relativo da radiação ultravioleta nos coeficientes de extinção de <i>E.coli</i> comparado a porcentagem de absorção relativa do RNA	09
3.3 - Declínio da potência da lâmpada uv ao longo da vida útil	10
3.4 - Intensidade durante o período de exposição	12
3.5 - Inativação de <i>E.coli</i> em reator "flow-through" em diferentes coeficientes de absorção, A (cm <sup>-1</sup> )	14
3.6 - Determinação gráfica do número de alvos	20
3.7 - Esquema de fotorreativação	24
3.8 - Representação da curva da distribuição do tempo de residência	26
3.9 - Reator fotoquímico de lâmpadas emersas	31
3.10 - Corte transversal de reator de lâmpadas emersas	32
3.11 - Corte transversal do reator fotoquímico anular	33
3.12 - Reator fotoquímico tipo radial	33
3.13 - Custos totais de produção na desinfecção de efluente secundário tratado com ultravioleta, ozônio e cloração	34
4.1 - Esquema geral do Reator I	38
4.2 - Foto do Reator I - vista externa	39
4.3 - Foto do Reator I - vista interna	39
4.4 - Esquema geral do Reator II	40
4.5 - Foto do Reator II - vista externa	41
4.6 - Foto do Reator II - vista interna	41
4.7 - Esquema da instalação para os ensaios experimentais de comportamento hidrodinâmico	42
4.8 - Esquema geral da instalação piloto	45
4.9 - Módulo de inativação	48
4.10 - Módulo de fotorreativação	48
5.1 - Variação da concentração do traçador em função do tempo no reator I para a vazão de 14,84 L/min	53
5.2 - Variação da concentração de NaCl em função do tempo para vazão de 14,84 L/min (série B)	54

5.3 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 1 referente ao Reator I	58
5.4 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 1 referente ao Reator I	58
5.5 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 1 referente ao Reator I	58
5.6 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 1 referente ao Reator I	58
5.7 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 1 referente ao Reator II	60
5.8 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 1 referente ao Reator II	60
5.9 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 1 referente ao Reator II	60
5.10 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 1 referente ao Reator II	60
5.11 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 2 referente ao Reator I	65
5.12 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 2 referente ao Reator I	65
5.13 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 2 referente ao Reator I	65
5.14 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 2 referente ao Reator I	65
5.15 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 2 referente ao Reator II	67
5.16 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 2 referente ao Reator II	67
5.17 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 2 referente ao Reator II	67
5.18 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 2 referente ao Reator II	67
5.19 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 3 referente ao Reator I	73
5.20 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 3 referente ao Reator I	73
5.21 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 3 referente ao Reator I	73
5.22 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 3 referente ao Reator I	73
5.23 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 3 referente ao Reator II	75
5.24 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 3 referente ao Reator II	75
5.25 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 3 referente ao Reator II	75

5.26 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 3 referente ao Reator II	75
5.27 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 4 referente ao Reator I	81
5.28 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 4 referente ao Reator I	81
5.29 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 4 referente ao Reator I	81
5.30 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 4 referente ao Reator I	81
5.31 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 4 referente ao Reator II	83
5.32 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 4 referente ao Reator II	83
5.33 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 4 referente ao Reator II	83
5.34 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 4 referente ao Reator II	83
5.35 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 5 referente ao Reator I	88
5.36 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 5 referente ao Reator I	88
5.37 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 5 referente ao Reator I	88
5.38 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 5 referente ao Reator I	88
5.39 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 5 referente ao Reator II	90
5.40 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 5 referente ao Reator II	90
5.41 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 5 referente ao Reator II	90
5.42 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 5 referente ao Reator II	90
5.43 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 6 referente ao Reator I	96
5.44 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 6 referente ao Reator I	96
5.45 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 6 referente ao Reator I	96
5.46 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 6 referente ao Reator I	96
5.47 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes totais para o ponto de coleta 6 referente ao Reator II	98
5.48 - Fração de sobrevivência (N/No) de coliformes fecais para o ponto de coleta 1 referente ao Reator II	98

5.49 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 6 referente ao Reator II	98
5.50 - Grau de fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 6 referente ao Reator II	98
5.51 - Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 6,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=40$ segundos)	106
5.52 - Grau de fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose uv de 6,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=40$ segundos)	108
5.53 - Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 7,5 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=50$ segundos)	110
5.54 - Grau de fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose uv de 7,5 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=50$ segundos)	111
5.55 - Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 9,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=60$ segundos)	112
5.56 - Grau de fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose uv de 9,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=60$ segundos)	113
5.57 - Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 10,5 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=70$ segundos)	115
5.58 - Grau de fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose uv de 10,5 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=70$ segundos)	117
5.59 - Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 12,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=80$ segundos)	118
5.60 - Grau de fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose uv de 12,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta=80$ segundos)	119

## LISTA DE TABELAS

3.1 - Distribuição de energia emitida por uma lâmpada bactericida	08
3.2 - Estimativa de dose uv para os métodos "bioassay" e PSS	16
3.3 - Relação entre o volume de água desinfetada por cloro e o consumo de energia elétrica em função da dose de cloro	35
4.1 - Parâmetros analisados em cada ponto de coleta	47
5.1 - Valores da altura da lâmina d'água e volume do Reator I em função da vazão	51
5.2 - Resultados experimentais do comportamento hidráulico de um reator ultravioleta de lâmpadas emersas (Reator I) - traçador na concentração de 4%	51
5.3 - Resultados experimentais do comportamento hidráulico de um reator ultravioleta anular (Reator II) - traçador na concentração de 1%	52
5.4 - Resultados experimentais do comportamento hidráulico de um reator ultravioleta anular (Reator II) - traçador na concentração de 2%	52
5.5 - Comparação dos resultados dos ensaios hidráulicos Reator II para concentração do traçador em solução de 1 e 2%	55
5.6 - Caracterização do efluente no Ponto 1 de coleta	56
5.7 - Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 1	57
5.8 - Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 1	59
5.9 - Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 1	61
5.10 - Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 1	61
5.11 - Características do efluente do reator anaeróbio (UASB) da ETE de Piracicamirim, em Piracicaba/SP	63
5.12 - Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 2	64
5.13 - Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 2	66

5.14 - Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 2	68
5.15 - Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 2	68
5.16 - Características do efluente da segunda lagoa facultativa da ETE CECAP, em Piracicaba/SP	71
5.17 - Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 3	72
5.18 - Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 3	74
5.19 - Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 3	76
5.20 - Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 3	76
5.21 - Características do efluente final da ETE Carioba, em Americana/SP	79
5.22 - Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 4	80
5.23 - Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 4	82
5.24 - Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 4	84
5.25 - Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 4	84
5.26 - Características do efluente final da ETE de indústria tecnológica, em Campinas/SP	86
5.27 - Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 5	87
5.28 - Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 5	89
5.29 - Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 5	91
5.30 - Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 5	91
5.31 - Características do efluente final da ETE IAC/Jundiaí, em Jundiaí/SP	94
5.32 - Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 6	95
5.33 - Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 6	97
5.34 - Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 6	99
5.35 - Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - <i>E.coli</i> , e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 6	99
5.36 - Valores mínimos exigidos para obtenção de eficiência de desinfecção utilizando coliformes totais como parâmetro de controle no Reator I	102

5.37 - Valores mínimos exigidos para obtenção de eficiência de desinfecção utilizando coliformes totais como parâmetro de controle no Reator II	102
5.38 - Valores mínimos exigidos para obtenção de eficiência de desinfecção utilizando coliformes fecais ( <i>E.coli</i> ) como parâmetro de controle para o Reator I	103
5.39 - Valores mínimos exigidos para obtenção de eficiência de desinfecção utilizando coliformes fecais ( <i>E.coli</i> ) como parâmetro de controle para o Reator II	103
5.40 - Valores da dose de radiação ultravioleta para os ensaios de fotorreativação	105
5.41 - Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose de uv de 6,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 40$ segundos)	106
5.42 - Grau de Fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose de uv de 6,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 40$ segundos)	108
5.43 - Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose de uv de 7,5 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 50$ segundos)	110
5.44 - Grau de Fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose de uv de 7,5 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 50$ segundos)	111
5.45 - Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose de uv de 9,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 60$ segundos)	112
5.46 - Grau de Fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose de uv de 9,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 60$ segundos)	113
5.47 - Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose de uv de 10,5 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 70$ segundos)	115
5.48 - Grau de Fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose de uv de 10,5 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 70$ segundos)	117
5.49 - Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose de uv de 12,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 80$ segundos)	118
5.50 - Grau de Fotorreativação para coliformes fecais - <i>E.coli</i> para dose de uv de 12,0 mW.s/cm <sup>2</sup> ( $\theta= 80$ segundos)	119

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

A:	coeficiente de absorvância, $\text{cm}^{-1}$ ;
$C_i$	concentração do traçador;
d:	dispersão;
D:	dose de radiação ultravioleta, $\text{W.s/cm}^2$ ;
$D_{Cl}$ :	dosagem de cloro, mg/l;
E:	curva de distribuição do tempo de residência – DTR;
$E(x,y)$ :	intensidade de radiação total nas coordenadas (x,y);
$E_{dir}(x,y)$ :	intensidade direta de radiação nas coordenadas (x,y);
$E_{ref}(x,y)$ :	intensidade refletida de radiação nas coordenadas (x,y);
$[Fe^{2+}]_a$	concentração molar antes da irradiação (mol/L);
$[Fe^{2+}]_d$	concentração molar depois da irradiação (mol/L);
FRD:	fator de redução de dose;
I, $I_0$ , $I_m$ , $I_w$ :	intensidade de radiação ultravioleta, $\text{W/cm}^2$ ;
j:	nível de lesão;
k:	constante de inativação ultravioleta, $(\text{W.s/cm}^2)^{-1}$ ;
m:	fator que representa proporção da intensidade média;
N:	número inicial de microrganismo;
$N_0$ :	número final de microrganismo;
$N/N_0$ :	fração de sobrevivência;
$N_j$ :	densidade de microrganismo no nível de lesão j;
$N_{j-1}$ :	densidade de microrganismo no nível de lesão j-1;
$N_p$ :	concentração de organismos reduzidos para uma dada porcentagem em dado tempo;
$N_{pr}$ :	número de microrganismos fotorreativados;
$N_t$ :	número de microrganismos no tempo t;
$N_R$	número de Reynolds;
$P(0)$ :	probabilidade de um alvo não ser inativado ou fração sobrevivência;
r:	coeficiente de correlação,
r, $r_0$	raio do tubo de quartzo;
$r_{Nj}$ :	taxa de formação de microrganismo no nível de lesão j (densidade. $s^{-1}$ );
t:	tempo de contato ou exposição, unidade de tempo;
$t_f$	tempo em que aparece o primeiro sinal do traçador;



$t_p$	tempo em que o pico da concentração do traçador é observado;
$t_{10}$	tempo em que 10% do traçador passou pelo reator;
$t_{50}$	tempo em que 50% do traçador passou pelo reator;
$T$	tempo teórico de residência (Volume/Vazão);
$t_{90}$	tempo em que 90% do traçador passou pelo reator;
$u$	velocidade axial linear
$x$ :	espessura da camada líquida, cm;

### Letras gregas

$\alpha$ :	coeficiente de absorção ou absorbância, $\text{cm}^{-1}$ ;
$\beta$ :	coeficiente que depende do tipo de microrganismo;
$\eta$ :	número de alvos;
$\phi_{\text{Fe}}$	rendimento quântico de produção de $\text{Fe}^{2+}$ no comprimento de onda de 254 nm (íon grama/einstein);
$\mu$	viscosidade
$\nu$	viscosidade cinemática
$\theta$	tempo médio (centróide) da curva;
$\theta$	tempo de detenção
$\rho$	densidade do fluido
$\rho$	fator de reflexão;
$\sigma$	variança

### Abreviaturas

uv:	ultravioleta
GF	grau de fotorreativação

## RESUMO

PIRES, M.R. Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta: influência da qualidade do efluente e da fotorreativação, Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 128p. Tese de Doutorado.

Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta vem sendo utilizado, principalmente, em países europeus e nos EUA. A fotorreativação dos microrganismos tem sido avaliada para determinar seu grau de interferência na desinfecção. Este trabalho teve como objetivo avaliar a radiação ultravioleta para diferentes qualidades de efluentes e estudar a fotorreativação. Foram utilizados dois reatores diferentes, sendo um com lâmpadas emersas e outro imersa. Os reatores foram testados em seis efluentes diferentes para quatro vazões diferentes para cada reator. Os coliformes totais e fecais foram analisados para avaliar a eficiência dos reatores. Ensaio de fotorreativação em condições controladas foram realizadas. De forma geral, o Reator I foi mais eficiente que o Reator II, e a qualidade do efluente muitas vezes foi mais importante que a dose aplicada como apresentada no Ponto de Coleta 3 para coliformes fecais, em que a inativação foi maior para a vazão 4 (com menor tempo de exposição à luz) em vez de ocorrer para a vazão 1 (com maior tempo de exposição). Doses de radiação ultravioleta mais altas implicam em valores iniciais e finais de fotorreativação menores, porém para atingir o valor máximo necessita de mais tempo. Quanto maior a dose de radiação ultravioleta aplicada menor é o grau de fotorreativação; os coliformes totais tem melhor correlação para análises desta natureza quanto comparado com a *E.coli*.

## ABSTRACT

PIRES, M.R. Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta: influência da qualidade do efluente e da fotorreativação, Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 128p. Tese de Doutorado.

Disinfection of effluents with ultraviolet radiation has been used in European countries and United States. The photoreactivation of microorganism have been estimated to determine the influence on the disinfection. The objective of this work had to evaluate the ultraviolet disinfection to different qualities of effluent and photoreactivation. Two different kinds of reactors were used in experimental analyzed. The reactors were tested to six different effluents for four flows. Total and fecal coliforms were analyzed to estimate the efficiency of reactors. Assays of photoreactivation were analyzed in controlled conditions. In most of case, the Reactor I was more efficient than Reactor II, and effluent quality was more important than the dose uv applied. Dose uv higher imply in initial and final values of lower photoreactivation. The total coliforms have better correlation than *E.coli*.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A água é um recurso escasso em relação a sua utilização nas diversas atividades humanas, ao contrário do que se pode imaginar. Embora três quartos da superfície da Terra sejam cobertas por água, 97,4% é salgada e se encontra nos oceanos, 1,8% é congelada e se encontra nas geleiras das regiões polares, e 0,8% é de água doce onde apenas 3% desta porcentagem são superficiais, ou seja, de aproveitamento imediato (*Sperling, 1995*).

É importante lembrar que parte desta água está contaminada, e este processo de contaminação é decorrente de anos de uso deste recurso sem planejamento ou inadequado. Entre as causas desta contaminação pode-se citar o crescimento demográfico, desenvolvimento industrial e ocupação do solo de forma intensa e acelerada.

O tratamento de água de abastecimento tem a finalidade de fornecer à população condições de uso para o consumo, sem risco à sua saúde. Com a descoberta de doenças de veiculação hídrica, fez-se necessária e obrigatória a desinfecção da água. Isso tanto para águas de abastecimento, como também para efluentes secundários domésticos e industriais.

A desinfecção é a última etapa do processo de tratamento de água para abastecimento público antes da distribuição à população, onde servirá às residências, casas comerciais, indústrias, e outros estabelecimentos para as mais diversas finalidades. Após o seu uso, a água entra na

rede de coleta de esgotos sanitários das cidades. O próximo passo é realizado nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's), onde ocorrerá a remoção de matéria orgânica e nutrientes por diversos métodos e posterior desinfecção. Infelizmente, as ETE são uma raridade no Brasil, na grande maioria, os esgotos sanitários coletados, são lançados sem qualquer tratamento, diretamente nos corpos receptores, prejudicando a qualidade dessas águas, aumentando sensivelmente o risco de contaminação por veiculação hídrica.

Dados estes fatos a desinfecção tornou-se indispensável no processo de tratamento de água, tanto de abastecimento, como residuárias (esgoto doméstico ou industrial). A desinfecção é efetuada , principalmente em efluentes secundários. Basicamente existem três métodos de desinfecção (*Daniel, 1993*):

- por processos naturais: lagoas de estabilização;
- agentes químicos: cloro ( $\text{Cl}_2$  , hipoclorito de sódio ou de cálcio), dióxido de cloro, cloraminas e ozônio; e,
- agentes físicos: calor e radiação ultravioleta.

Por questões históricas, técnicas e econômicas, o cloro foi, e ainda é, o desinfetante mais utilizado no país e no mundo. Após a descoberta do potencial de formação de subprodutos, como os trihalometanos, advindos da reação do cloro com matérias húmicas e proteínas, começou-se a questionar o seu uso como desinfetante. Iniciaram-se pesquisas para uma alternativa à cloração, tanto para substituí-lo, como para diminuir os precursores desses subprodutos. A preocupação com estes subprodutos decorre do seu potencial cancerígeno. Apesar disso, o cloro ainda é muito utilizado devido à manutenção de residual na água, importante para sistemas de abastecimento.

Outros desinfetantes, como as cloraminas, o ozônio, o dióxido de cloro, constituem-se em alternativas à cloração, contudo a utilização destes desinfetantes de forma mais ampla não tem se mostrado viável, principalmente por questões econômicas.

A radiação ultravioleta, como desinfetante alternativo, é conhecida desde o início do século XX, mas por problemas de confiabilidade do equipamento, tecnologia, entre outros, foi abandonada. Superados em grande parte esses problemas, o sistema de radiação ultravioleta tem ganho popularidade, principalmente nos países europeus.

Ao contrário dos outros desinfetantes que tem ação química, a radiação ultravioleta atua fisicamente, atingindo principalmente os ácidos nucleicos dos microrganismos, promovendo reações fotoquímicas, inativando os vírus e bactérias. Os agentes químicos necessitam espaços bem definidos para estocar o produto, enquanto que a radiação ultravioleta não necessita.

A radiação ultravioleta é obtida por meio de lâmpadas especiais (tubular, tipo lâmpadas fluorescentes) de baixa potência. Isto significa que a desinfecção com ultravioleta utiliza diretamente a energia elétrica para inativação dos microrganismos.

Os sistemas compactos de desinfecção por radiação ultravioleta são simples quanto a instalação, operação e manutenção. O sistema, geralmente, consiste de uma calha ou tubulação que a água a ser desinfetada passa equipado com a lâmpada especial.

É crescente a preocupação na disposição final de resíduos líquidos, manutenção da qualidade dos corpos receptores e na reutilização das águas. Sob este aspecto, e em conjunto com a simplicidade operacional dos equipamentos de radiação ultravioleta, têm-se um importante aliado para as diversas aplicações inerentes a desinfecção.

Outro fator importante para popularização dos sistemas de radiação ultravioleta, é sem dúvida o custo. Tem-se demonstrado que estes sistemas são competitivos economicamente se comparados à cloração (*U.S.EPA* 1986).

Apesar do potencial da radiação ultravioleta como sistema de desinfecção, alguns fatores necessitam serem estudados e avaliados como o método de determinar a dose de radiação ultravioleta e a fotorreativação, para garantir a confiabilidade do sistema.

## CAPÍTULO 2

### OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho foi estudar os fatores que interferem na eficiência de desinfecção de efluentes utilizando reatores com radiação ultravioleta de lâmpada submersa e emersa na inativação de coliformes totais e coliformes fecais (*E.coli*). Para alcançar este objetivo, foram avaliados os seguintes aspectos:

- avaliação do comportamento hidrodinâmico de reatores para radiação ultravioleta;
- influência da qualidade do efluente na eficiência do sistema desinfecção com radiação ultravioleta: inativação e fotorreativação; e.
- avaliação do potencial de fotorreativação.

## **CAPÍTULO 3**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **Radiação Ultravioleta**

##### **3.1 - Introdução**

A necessidade da desinfecção está relacionada a redução de doenças de veiculação ou origem hídrica. Os organismos de maior interesse em ambientes contaminados são bactérias entéricas, vírus e parasitas intestinais. A alternativa de descartar o esgoto sem desinfetá-lo, significa descartar organismos potencialmente patogênicos, que por definição, causam doenças aos seres humanos.

O cloro é desinfetante mais utilizado na desinfecção de esgotos, porém, estudos demonstram que o cloro e seus subprodutos podem ser tóxicos a vida aquática, desta forma, questões sobre a necessidade da desinfecção em geral, como a desinfecção com cloro, têm sido levantadas.

Na década de 80, nos Estados Unidos, a implantação de tratamento de esgoto municipal estava vinculada à exigência mínima de tratamento secundário, que deveria incluir a limitação de coliformes fecais, mas este tópico foi omitido, delegando aos estados a responsabilidade de estabelecer critérios de qualidade de água (*U.S. EPA, 1986*).



Com o fato do esgoto doméstico ter sido identificado como fonte de contaminação por patogênicos e o processo de desinfecção mais utilizado causar danos ao ambiente, tomar a decisão de desinfetar ou não, é uma tarefa complicada que talvez deva ser feita para cada local específico. O importante é estabelecer metas que indicam a melhor solução, seja cloração, desinfetante alternativo ou ausência da desinfecção, se for o caso, desde que respeite as exigências de descarga de efluentes para o determinado local, ou seja, satisfaça tanto o interesse da saúde humana como os interesses do meio ambiente.

Vários outros desinfetantes, alternativos ao cloro, foram sendo testados e empregados nas estações de tratamento de esgotos, como o ozônio, o dióxido de cloro, bromo e a radiação ultravioleta.

A radiação ultravioleta tem alto grau de inativação de microrganismos patogênicos em curto tempo de contato, e não produz resíduos tóxicos que afetam o meio aquático ou os sistemas de distribuição de água de abastecimento (*Whitby e Palmateer, 1993*). Apesar dos autores afirmarem que não há produção de resíduos tóxicos não há muitas pesquisas nesta área que comprovem tal afirmação.

Superados os problemas técnicos de confiabilidade, segurança, e econômicos entre outros, a desinfecção através da radiação ultravioleta tem-se demonstrado ser uma boa alternativa à cloração, principalmente após o surgimento dos problemas causados pela cloração, como subprodutos indesejáveis com propriedades cancerígenas (*Severin, 1980; Zukovs et al., 1986*), além da necessidade de altas dosagens e longo tempo de contato (*Zukovs et al., 1986*).

A desinfecção por este sistema é feita com lâmpadas especiais de baixa pressão de mercúrio que emitem radiação em comprimento de onda letal aos microrganismos. Isto ocorre em reatores, que são denominados de reatores fotoquímicos, construídos de material refletor para aumentar sua eficiência. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos comparando os custos do sistema de radiação ultravioleta com outros sistemas de desinfecção, em especial, a cloração.

Neste capítulo será apresentada a teoria envolvida em sistemas de desinfecção com radiação ultravioleta.

### 3.2 - Espectro da Radiação Ultravioleta

Os raios de ultravioleta pertencem ao espectro eletromagnético e estão situados na faixa de 40 a 400 nm de comprimento de onda, entre os raios -X e a luz visível (Figura 3.1). A divisão aceita da radiação ultravioleta, em geral, é: vácuo (40 a 200 nm), UV-C (200 a 280 nm), UV-B (280 a 315 nm) e UV-A (315 a 400 nm) (Sobotka, 1993).

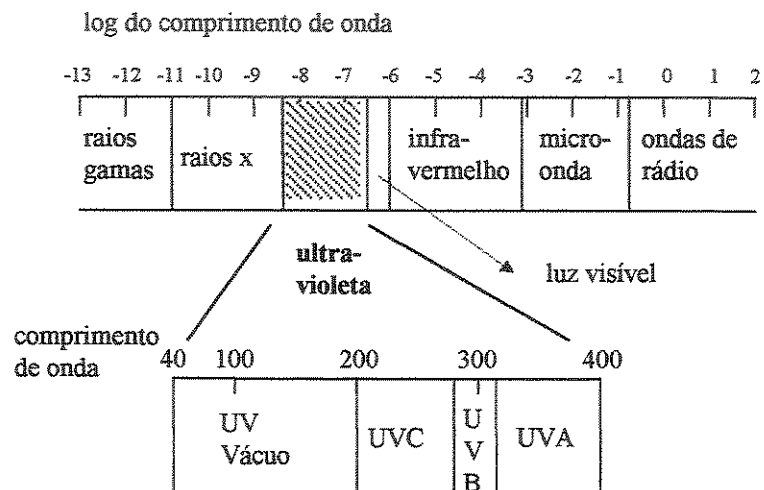


FIGURA 3.1 - Espectro eletromagnético (Wolfe, 1990; Di Bernardo, 1993).

### 3.3 - Lâmpadas Bactericidas

Para desinfecção de águas, são aplicadas fontes artificiais de radiação ultravioleta baseado no uso de descarga elétrica nos átomos de mercúrio que se encontram na forma de vapor. As lâmpadas de radiação ultravioleta são divididas geralmente em dois tipos: alta-pressão e baixa-pressão. Entre as lâmpadas de alta-pressão, destaca-se a lâmpada com argônio/mercúrio e eletrodos epoxidados (fios de volfrâmio envolvidos com estrôncio e carbonato de bário), com

comprimento de ondas máximo na faixa de 365 a 366,3 (*Sobotka*, 1993). Além destas lâmpadas, há também as lâmpadas de média pressão, que são menos usadas comercialmente.

*Wolfe* (1990) classifica as lâmpadas em baixa e média pressão. As lâmpadas de baixa pressão produzem uma faixa estreita de luz ultravioleta em que o pico está próximo do comprimento de onda de 254 nm. As lâmpadas de média pressão produzem um faixa longa de luz ultravioleta.

As lâmpadas bactericidas de baixa-pressão são construídas com tubos de descarga feitos em vidro especial. A radiação aparece na lâmpada como resultado da descarga nos vapores de mercúrio em baixa-pressão (aproximadamente 0,001 atm). A potência das lâmpadas está entre 15 e 60 W. Nestas lâmpadas aproximadamente 70% de toda potência emitida são de raios ultravioleta. Mais de 95% do total de emissão de ultravioleta está no comprimento de onda de 254 nm. A Tabela 3.1 mostra a distribuição de energia emitida de uma lâmpada bactericida. A energia em um comprimento de onda específico é expresso como a porcentagem da emissão total dentro de uma faixa (ou região) de ultravioleta.

TABELA 3.1 - Distribuição de energia emitida por uma lâmpada bactericida.

Comprimento de Onda (nm)	Porcentagem relativa de emissão dentro da região	
	248 - 365 nm	248 - 313 nm
248	0,1	0,1
<b>254</b>	<b>95,2</b>	<b>97,4</b>
265	0,1	0,1
280/289	0,1	0,1
297	0,3	0,3
302	0,2	0,2
313	1,8	1,9
334	0,1	-
365	2,0	-

Fonte: *Harm*, 1980.

Os raios ultravioleta são absorvidos pelos ácidos nucleicos (DNA e RNA) das células causando mudanças fotoquímicas letais a vida celular. O comprimento de onda de maior efeito bactericida é o de 254 nm. Em escala relativa, os coeficientes de extinção (efeito inibidor na formação de colônia de bactéria) e a porcentagem relativa de absorção de uma solução de RNA foram plotados em função do comprimento de onda (Figura 3.2). O efeito máximo ocorreu entre os comprimento de onda de 250 e 260 nm, e é possível se perceber a similaridades das duas curvas, embasando a premissa de que os efeitos letais da radiação ultravioleta ocorrem nos ácidos nucleicos (U.S.EPA, 1986).

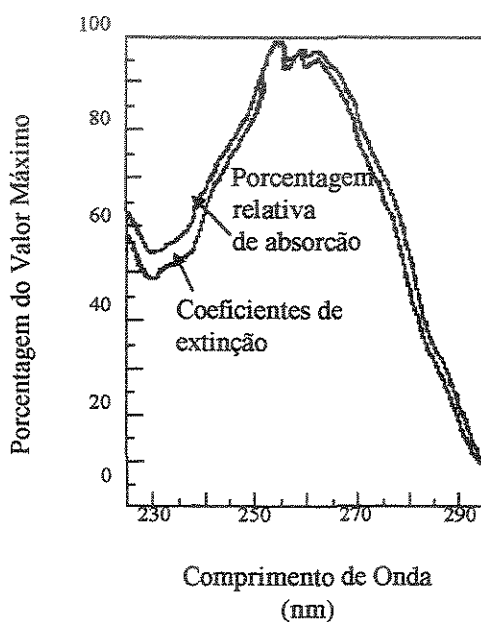


FIGURA 3.2 - Efeito relativo da radiação ultravioleta nos coeficientes de extinção de *E.coli* comparado a porcentagem de absorção relativa do RNA (U.S.EPA, 1986).

O tempo de vida útil das lâmpadas de baixa-pressão, em geral, é de 5000 a 10000 horas (Wolfe, 1990), considerando que as lâmpadas fiquem ligadas por pelo menos 8 horas continuamente. Porém, ao longo do tempo de vida útil, ocorre a redução da potência emitida pela lâmpada, como mostra a Figura 3.3.

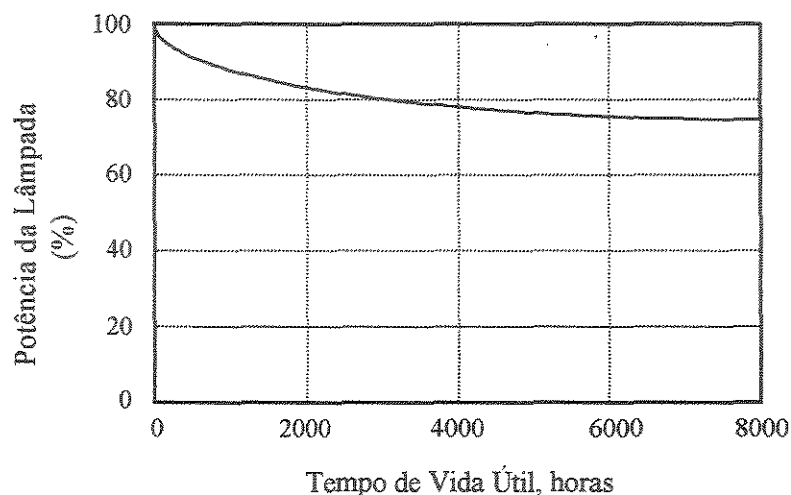


FIGURA 3.3 - Declínio da potência da lâmpada uv ao longo da vida útil (*Loge et al.*, 1996).

### 3.4 - Dose de Radiação Ultravioleta

Para os desinfetantes químicos, a dose é dada pela concentração em mg/l, entretanto a dose de radiação ultravioleta é o produto da intensidade de radiação bactericida ( $W/cm^2$ ) e tempo de exposição, como mostra a equação (3.1) (*Qualls et al.*, 1983):

$$D = I \cdot t \quad (3.1)$$

onde:

D : dose de radiação ultravioleta ( $W.s/cm^2$ );

I : intensidade de radiação bactericida ( $W/cm^2$ );

t : tempo de exposição (s);

A fração de sobrevivência é definida como sendo a relação entre a concentração de microrganismos antes e depois da inativação e é uma função da dose como mostra a equação (3.2):

$$N/N_0 = f(\text{dose}) \quad (3.2)$$

As equações (3.1) e (3.2) sugerem que a intensidade e o tempo de exposição possam ser variados reciprocamente para obtenção da mesma fração de sobrevivência (*Qualls e Johnson, 1985*).

Em acordo com a lei da reciprocidade na determinação da dose, a magnitude da radiação ultravioleta não teve grande efeito na inativação de oocistos de *Cryptosporidium parvum*, pois foram utilizadas lâmpada de baixa e média pressão atingindo a mesma eficiência, comparando-se para a mesma base de dose ultravioleta (*Craik et al., 2001*). Sommer et al. (1998) trabalhando com processo de desinfecção natural através da radiação ultravioleta solar concluíram que não há evidências para um tempo mínimo ou mínima intensidade de radiação ultravioleta, mas é essencial que o produto destes dois parâmetros seja suficiente para a inativação. Neste trabalho de Sommer foram utilizados os bacteriófagos e a *E.coli*.

A partir de uma população homogênea de microrganismos juntamente com a cinética de “alvo-único” (“single-hit”), o log da fração de sobrevivência pode ser uma função linear da dose recebida pelos microrganismos (*Chick, 1908; Jagger, 1967; apud Qualls e Johnson, 1985*). Entretanto, as curvas de log de sobrevivência pela dose para coliformes em efluentes secundários, demonstram-se não-lineares, em parte devido a natureza heterogênea da população e à presença de bactérias protegidas pela inclusão em partículas (*Qualls, et al., 1983*). A eficiência do processo de desinfecção é muito dependente da quantidade de partículas suspensas, entretanto partículas com tamanho inferior a 7 µm tem muito pouco efeito no processo (*Jolis et al., 2001*).

Em um sistema fluxo contínuo (“flow-through”) uma partícula pode ser submetida à variação de níveis de intensidade durante o período de exposição (Figura 3.4). A dose de uma partícula durante um pequeno intervalo de tempo  $I \cdot dt$  e para o período é:

$$dose_w = \int_0^t I \cdot dt \quad (3.3)$$

onde o índice  $w$ , refere-se à fração de distribuição de intensidades médias sobre o tempo de exposição.

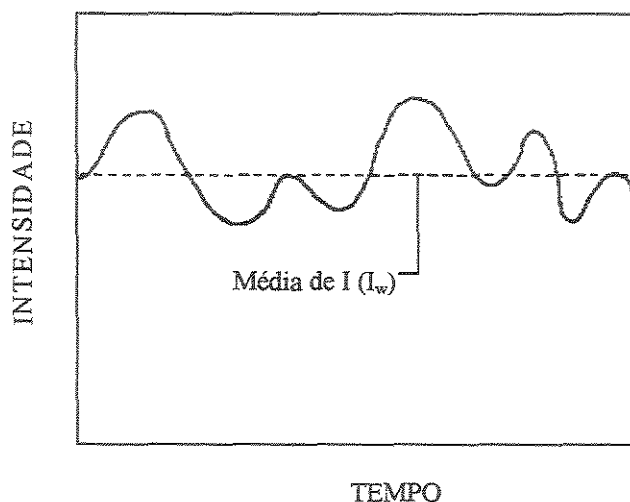


FIGURA 3.4 - Intensidade durante o período de exposição (*Qualls e Johnson, 1985*).

A intensidade média que a partícula é submetida em relação ao período de exposição, é definido como:

$$I_w = \frac{1}{t} \int_0^t I \cdot dt \quad (3.4)$$

então, pelas equações (3.1), (3.3) e (3.4) a dose recebida por uma partícula é:

$$dose_w = (I_w) \cdot (t) \quad (3.5)$$

Assim, a dose que uma partícula é submetida pode ser expressa pela média da variação da intensidade durante o tempo de exposição, multiplicado pelo tempo que a partícula gasta dentro da unidade, ou seja, a equação (3.5) é uma simples consequência de efeitos recíprocos, bem estabelecidos, da intensidade e tempo de exposição (*Jagger, 1967, apud Qualls e Johnson, 1985*). É importante lembrar que as equações desenvolvidas (equações 3.2 a 3.5) partem de um sistema de fluxo contínuo. No caso de um sistema tipo batelada onde o sistema é

fechado, a dose, como o produto da intensidade pelo tempo de exposição é facilmente entendida.

A inativação de microrganismos é uma função exponencial com respeito a dosagem, em que parte da energia emitida pela fonte de radiação é absorvida por substâncias presentes na água como matérias dissolvidas, partículas em suspensão, e pela própria água. Esta absorção segue a lei de Beer-Lambert (*Sobotka, 1993*):

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (3.6)$$

onde:

I: intensidade de radiação que passa através da camada de água ( $\text{W}/\text{cm}^2$ );

$I_0$ : intensidade da radiação emitida pela fonte ( $\text{W}/\text{cm}^2$ );

x: espessura da camada de água exposta à radiação (cm);

$\alpha$ : coeficiente de absorção ou absorvância ( $\text{cm}$ )<sup>-1</sup>.

Considerando que na superfície da lâmina d'água ( $x = 0$ ), a intensidade de radiação é máxima ( $I = I_0$ ), desprezando a absorção pelo ar entre a fonte de radiação e a superfície da lâmina d'água, e que a intensidade é mínima na profundidade x, pode-se calcular a intensidade média ( $I_m$ ) integrando a equação (3.6), resultando em:

$$I_m = \frac{\int_0^x I_0 \cdot e^{-\alpha x} \cdot dx}{x} \quad (3.7)$$

Desta forma, a intensidade média resultante é:

$$I_m = \frac{I_0}{\alpha \cdot x} (1 - e^{-\alpha x}) \quad (3.8)$$

O coeficiente de absorção  $\alpha$  é função da qualidade da água ou do efluente, turbidez e cor. A turbidez da água é obtida através do teor em mg de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) em água bidestilada,



e a cor em mg de Pt/L (Sobotka, 1993). A inativação de *E.coli* em diferentes coeficientes de absorvância é apresentada na Figura 3.5.

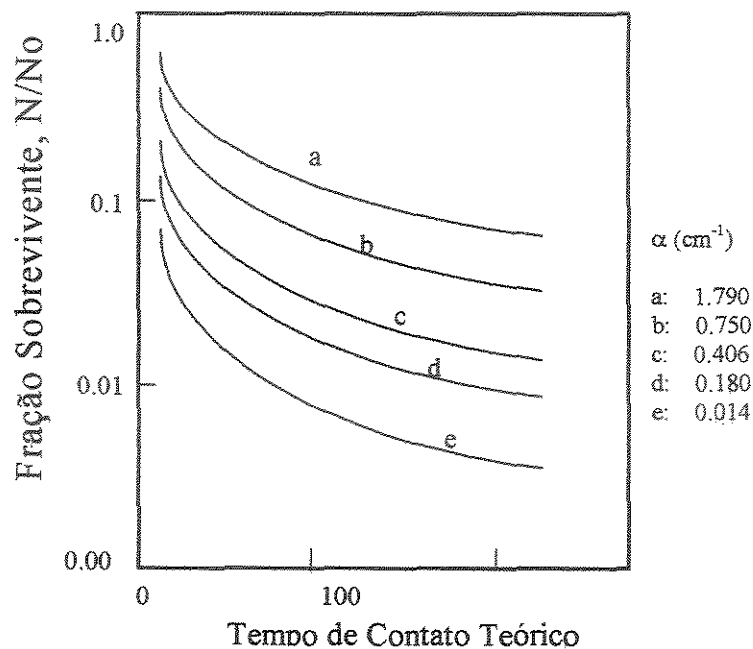


FIGURA 3.5 - Inativação de *E.coli* em reator “flow-through” em diferentes coeficientes de absorção,  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) (Severin *et al.*, 1984).

Para a estimar da dose de radiação ultravioleta há três métodos que são usados: ensaio biológico (“bioassay”), método matemático e actinometria química. Os dois primeiros são os métodos utilizados com maior frequência.

“Bioassay”. A relação entre a dose de ultravioleta e o microrganismo selecionado é desenvolvido sob condições altamente controladas. O microrganismo selecionado, geralmente esporos de *Bacillus subtilis*, é colocado em solução e exposto a um feixe de luz colimatado de ultravioleta em intervalos tempos fixados. Determina-se a intensidade de radiação diretamente através de um radiômetro, obtendo-se a relação dose-resposta ou curva de calibração, isto é, a fração de sobrevivência dos esporos *Bacillus subtilis* em função da dose. No reator a ser testado, a cultura pura de microrganismos é injetada no afluente, e o efluente amostrados para tempos conhecidos de exposição, feito através da variação da vazão. Para cada intervalo de

tempo, a fração de sobrevivência é determinada. Comparando-se a fração de sobrevivência obtida no reator com a obtida na curva de calibração, pode-se estimar a dose de radiação efetivamente aplicada. Então conhecendo-se o tempo de exposição para cada fração de sobrevivência, obtém-se a intensidade de radiação.

Método Matemático. O método matemático mais comum para determinar a intensidade média de ultravioleta em sistema de desinfecção é a somatória dos pontos da fonte (“point source summation - PSS”) também chamado de método do comprimento de lâmpada finito (*Qualls e Johnson, 1983*). No método PSS, a intensidade média de ultravioleta é determinada como uma função da transmitância ultravioleta da água a ser desinfetada. A lâmpada de ultravioleta é dividida em uma série finita de pontos, que emitem energia radialmente. A intensidade em qualquer ponto do reator é a soma das intensidades recebidas naquele ponto por todos os pontos-fonte (lâmpada). Parâmetros como a lâmpada, a geometria do reator são importantes para estabelecimento do método.

Actinometria Química: O actinômetro químico sofre decomposição fotoquímica de rendimento quântico conhecido quando exposto a radiação ultravioleta em 253,7 nm, então a quantidade de fotoproduto produzido é usado para estimar a dose (*Harris et al., 1987*). O actinômetro químico, geralmente, utilizado é ferrioxalato de potássio devido a sua sensibilidade para uma faixa ampla do espectro e relativa facilidade de uso. A dose para este método é dada por:

$$D = \frac{[Fe^{2+}]_d - [Fe^{2+}]_a}{\phi_{Fe}} \cdot 4,719 \times 10^5 \quad (3.9)$$

D: dose de radiação ultravioleta (mWs/cm<sup>2</sup>);

[Fe<sup>2+</sup>]<sub>d</sub>: concentração molar de Fe<sup>2+</sup> depois da irradiação (mol/l);

[Fe<sup>2+</sup>]<sub>a</sub>: concentração molar de Fe<sup>2+</sup> antes da irradiação (mol/l);

$\phi_{Fe}$ : rendimento quântico de produção de Fe<sup>2+</sup> no comprimento de onda de 254 nm (ion 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/cm<sup>3</sup>.

Blatchley et al. (1994) compararam os métodos “bioassay” e matemático (PSS) para determinar a dose em sistemas de desinfecção em 4 estações de tratamento. Para o “bioassay” foram utilizados os coliformes fecais e a *E.coli* para estimar a dose. Para o matemático foram utilizados os procedimentos propostos pela U.S.EPA (UVDIS - versão 3.1) e por Hunt (1992). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Estimativa de dose UV para os métodos “bioassay” e PSS (Blatchley et al., 1994).

Local	Coliforme fecal	<i>E. coli</i>	UVDIS 3.1	Hunt (1992)
	“bioassay” (mWs/cm <sup>2</sup> )	“bioassay” (mWs/cm <sup>2</sup> )		
Cicero	5,4	5,6	195	ND
East Chicago	7,0	7,0	61,0	62,5
Frankton	4,7	7,2	115	ND
West Lafayette	13,5	12,0	57,0	54,0

ND: sem dados devido a incompatibilidade entre o modelo e a configuração da lâmpada.

Pode-se perceber que para os ensaios biológicos as estimativas foram similares para dose UV, porém, quando comparados com PSS não houve concordância nas estimativas da dose. Comparando as estimativas dentro do mesmo métodos, a correlação é válida.

### 3.5 - Inativação dos Microrganismos

#### 3.5.1 - Cinética de Lesões Únicas em Alvos Únicos

A inativação dos microrganismos através da radiação ultravioleta tem sua melhor eficiência em comprimento de onda entre 250 e 260 nm, sendo que a máxima eficiência ocorre no

comprimento de onda de 253,7 nm. Os microrganismos atingidos pela radiação sofrem alterações no DNA ou RNA, inativando-os. A inativação é dada pela função exponencial em relação à dose (*Severin*, 1980):

$$\frac{N}{N_0} = e^{-k \cdot I \cdot t} \quad (3.10)$$

ou

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k \cdot I \cdot t \quad (3.11)$$

onde:

N: microrganismos sobreviventes (UFC/ml);

N<sub>0</sub>: microrganismos iniciais(UFC/ml);

k: taxa constante de inativação (W.s/cm<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>;

I: intensidade de energia germicida (W/cm<sup>2</sup>);

t: tempo de exposição (s);

A relação  $\ln(N/N_0)$  da equação (3.11) é também conhecida por fração de sobrevivência ou log de sobrevivência. Observa-se claramente que as relações anteriores assemelham-se em muito com a lei de Chick, que relaciona a destruição de microrganismos com o tempo de contato, para um desinfetante qualquer.

A equação (3.11) é uma expressão teórica padrão (*Daniel*, 1993), baseada em observações empíricas (*Severin*, 1980). Esta equação tem como hipóteses básicas:

- A intensidade da radiação é constante através da camada líquida, a absorção pelo meio em suspensão é desprezível, e o regime de escoamento é tubular ou a câmara de desinfecção opera como um reator tipo batelada;
- a inativação é função da dosagem de ultravioleta (*Severin*, 1980; *Harm*, 1980);
- uma única lesão é suficiente para inativar o microrganismo (*Harm*, 1980); e,

- a população é homogênea quanto à sensibilidade dos microrganismos à radiação ultravioleta (*Harm, 1980*).

Como foi visto anteriormente, ocorre a absorção pelo meio, e a intensidade de radiação não é homogênea nas camadas líquidas. Desta forma, pode-se fazer a correção da equação (3.11), unindo-a com a equação (3.8). Então tem-se:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\frac{k \cdot I_0}{\alpha \cdot x} (1 - e^{-\alpha \cdot x}) \cdot t \quad (3.12)$$

### 3.5.2 - Cinética de Alvos Múltiplos

A resistência inicial dos microrganismos para inativação com radiação ultravioleta foi modelada, no passado, com a cinética de alvos múltiplos (*Severin, et al., 1983*). Este modelo foi desenvolvido primeiramente para outros tipos de radiação diferentes da ultravioleta. Devido à sua simplicidade matemática e aplicabilidade em experimentos em batelada, ainda é usado, apesar de observações na mecânica da inativação ultravioleta não confirmar este modelo.

Neste modelo é assumido que uma partícula contém um número finito,  $\eta$ , de alvos críticos discretos, o qual deve ser atingido antes da inativação total da partícula. Sendo o número de alvos finitos, a probabilidade de um deles ser atingido é reduzida no decorrer da reação, pois, a medida que os alvos são atingidos, diminui-se o número de alvos, reduzindo a probabilidade de se atingir o próximo alvo (*Severin, et al., 1983*).

Uma partícula pode representar um microrganismo com  $\eta$  alvos ou um grupo de microrganismos que possui um total de  $\eta$  alvos. Entretanto, devido aos métodos de enumeração é impossível identificar a diferença na sobrevivência de um grupo ou de um único microrganismo.

### Aplicação da Cinética de Alvos Múltiplos para Reatores Tipo Batelada

Para um reator tipo batelada, assume-se que a intensidade de radiação ultravioleta ,  $I$  ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), é uniforme em todos os pontos dentro do reator. A probabilidade de um alvo não ser atingido ou inativado é dada pela equação:

$$P(0) = e^{-kI.t} \quad (3.13)$$

$P(0)$ : probabilidade de um alvo não ser inativado, ou fração sobrevivente. Então, a probabilidade de inativar um alvo específico é:

$$1 - P(0) = 1 - e^{-kI.t} \quad (3.14)$$

Assumindo que todos os alvos são equivalentes e que as lesões são distribuídas aleatoriamente nos alvos, então a probabilidade de sobrevivência de um microrganismo com  $\eta$  alvos é dado por:

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \left(1 - e^{-kI.t}\right)^\eta \quad (3.15)$$

Para níveis de sobrevivência suficientemente baixos, a equação (3.15) pode ser aproximada (*Daniel*, 1993), com uso do teorema do binômio, a:

$$\frac{N}{N_0} \cong \eta \cdot e^{-kI.t} \quad (3.16)$$

Para se obter os valores de  $\eta$  e  $k$  plotam-se os valores da fração sobrevivente ( $N/N_0$ ) em escala logarítmica (ordenada) contra os valores de  $I.t$  (abscissa). A interseção da reta com o eixo das ordenadas fornece o valor de  $\eta$  e a declividade da reta fornece o valor de  $k$  (Figura 3.6).

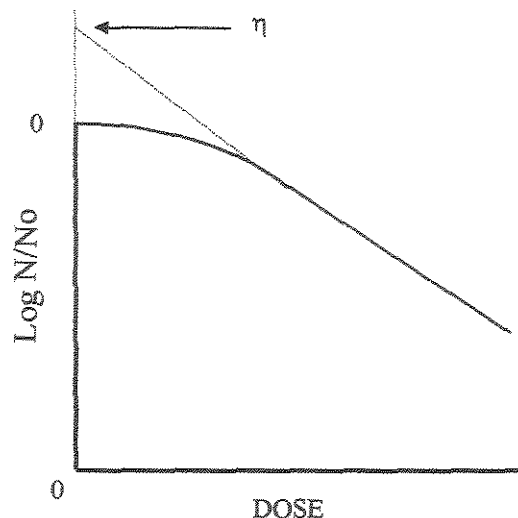


FIGURA 3.6 - Determinação gráfica do número de alvos (*Harm, 1980*).

Pela dificuldade de se determinar exatamente a porção reta da curva a partir dos dados experimentais, é preferível calcular  $\eta$  e  $k$  através da equação (3.15) pelo método dos mínimos quadrados (*Severin, et al., 1983*).

#### Aplicação da Cinética de Alvos Múltiplos para um Reator Tipo Anular

Para obter dados de inativação de fluxo contínuo foi utilizado um reator de ultravioleta de tipo anular. A lâmpada ultravioleta emite luz radialmente e a intensidade,  $I$ , em um ponto na posição radial,  $r$ , é dada pela forma integrada de lei de Lambert (*Jacob e Dranoff, 1970*):

$$I = \frac{I_0 \cdot r_0}{r} \cdot e^{-2,303 \cdot A(r-r_0)} \quad (3.17)$$

onde  $I_0$  é a intensidade na superfície do tubo de quartzo,  $r_0$  (cm) é raio do tubo de quartzo, e  $A$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) o coeficiente de absorvância em 254 nm. A taxa de sobrevivência é dada por:

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{imkI_0\theta}{1 + imkI_0\theta} \quad (3.18)$$

onde  $\theta$  é o tempo de detenção hidráulico no reator e  $m$  é um fator que representa uma proporção da intensidade média.

$$m = \frac{2r_0 \left[ 1 - \exp -2,303A (r - r_0) \right]}{2,303A (r^2 - r_0^2)} \quad (3.19)$$

### 3.5.3 - Cinética de Lesões Múltiplas

Uma outra proposta para a modelagem de inativação com radiação ultravioleta é a cinética de lesões múltiplas (“series-event kinetics”). As lesões ocorrem em passos sequenciais, e cada passo como uma função inteira (*Severin, et al., 1983*). A taxa com que um microrganismo passa de um nível de lesão para o próximo é de primeira ordem com relação à intensidade e independente do nível de lesão ocupado pelo microrganismo.

As lesões são acumuladas pelos microrganismos continuamente a partir do momento em que são expostos à radiação ultravioleta. Entretanto, no início da irradiação ultravioleta a probabilidade para que um microrganismo tenha sofrido  $h$  lesões ( $h > 1$ ) é muito pequena. Pela irradiação contínua, uma maior fração de sobreviventes já acumulou ( $h - 1$ ) lesões e necessita somente uma lesão adicional para inativação, ou seja, os microrganismos serão inativados quando o nível de lesões ultrapassar uma quantidade mínima, que depende da espécie do microrganismo, de sua idade fisiológica e das condições metabólicas (*Daniel, 1993*). Mantidas as mesmas condições, o nível mínimo pode ser considerado constante.

#### Aplicação da Cinética de Lesões Múltiplas para Reatores Tipo Batelada

Para um reator tipo batelada, a taxa com que um microrganismo passa para um nível de lesão  $j$ , é dada por:



$$r_{N_j} = kIN_{j-1} - kIN_j \quad (3.20)$$

onde:

$r_{N_j}$ : taxa de formação de microrganismo no nível de lesão  $j$  (densidade. $s^{-1}$ );

$k$ : constante de inativação dos microrganismos pela radiação ultravioleta ( $W.s/cm^2$ ) $^{-1}$ ;

$I$ : intensidade de radiação ultravioleta ( $W/cm^2$ );

$N_j$ : densidade de microrganismos no nível de lesão  $j$ ;

$N_{j-1}$ : densidade de microrganismos no nível de lesão  $(j - 1)$ .

A resultante da equação (3.20) é resolvida seqüencialmente variando  $j = 0$  até  $j = h - 1$ . A densidade de microrganismos, genericamente, em um nível  $j$ , é calculada por:

$$N_j = \frac{N_0 (k.I.t)^j}{j!} e^{-k.I.t} \quad (3.21)$$

$N_0$ : é a densidade de microrganismo antes da exposição da radiação ultravioleta;

$j$ : nível de lesões.

A densidade de microrganismos sobreviventes,  $N$ , ou seja, todos aqueles atingidos pelo nível de lesão  $h - 1$  ou menos, é dada por:

$$N = \sum_{j=0}^{h-1} N_j \quad (3.22)$$

Substituindo as equação (3.22) na equação (3.21) tem-se:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-k.I.t} \sum_{j=0}^{h-1} \frac{(k.I.t)^j}{j!} \quad (3.23)$$

No modelo de alvos múltiplos a probabilidade de produzir lesões sucessivas dentro de um microrganismo reduz-se a medida que as lesões ocorrem, pela redução de alvos disponíveis. No modelo de lesões múltiplas, ao contrário da anterior, a probabilidade dos eventos ocorrerem não é reduzida, devido à suposição de disponibilidade infinita de locais para receber um fóton de radiação ultravioleta sofrer lesão. Sob este aspecto os modelos anteriores diferem quanto ao valor limite, ou seja, o valor limite, para lesões múltiplas, não é o número de locais que devem ser destruídos antes da inativação ocorrer. Um número de locais maior do que o número limite podem ser destruídos durante todo o processo da reação (Daniel, 1993).

#### Aplicação da Cinética de Lesões Múltiplas para um Reator Tipo Anular

A taxa ( $r_{Nj}$ ) que um organismo passa para outro nível de lesão (Severin et al., 1984) é dado pela equação (3.24):

$$r_{Nj} = \frac{kI_0 r_0}{r} \cdot e^{-2,303A(r-r_0)} (N_{j-1} - N_j) \quad (3.24)$$

A resultante da equação (24) é resolvida seqüencialmente variando  $j = 0$  até  $j = h - 1$ . A densidade de microrganismos, genericamente, em um nível  $j$ , é calculada por:

$$N_j = \frac{(mkI_0\theta)^j}{(1 + mkI_0\theta)^{j+1}} N_0 \quad (3.25)$$

e a densidade de sobrevivência dos organismos no efluente,  $N$ , é dado por:

$$N = \sum_{j=0}^{h-1} N_j = N_0 \sum_{j=0}^{h-1} \frac{(mkI_0\theta)^j}{(1 + mkI_0\theta)^{j+1}} \quad (3.26)$$

A equação 3.26 pode ser rescrita como segue:

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \left[ 1 + \left( \frac{1}{mkI_0\theta} \right) \right]^{-h} \quad (3.27)$$

Segundo Pires (1997), as três cinéticas apresentam boa correlação nos dados obtidos da inativação de microrganismos, podendo desta forma, optar pela “Cinética de Lesões Únicas em Alvos Únicos”, que é de aplicação mais simples que as outras duas.

### 3.6 - Fotorreativação

Muitos microrganismos são capazes de repararem os efeitos dos danos causados pela luz ultravioleta quando expostos em comprimento de onda próximo a faixa ultravioleta ou a faixa do espectro azul-violeta, ou seja, pode ocorrer tanto no processo de desinfecção como naturalmente.

Uma variedade de fotoprodutos são formados nos DNA do microrganismo como resultado da absorção da luz ultravioleta. O mais importante desses fotoprodutos é o dímero de pirimidina formado entre moléculas adjacentes de pirimidinas do mesmo elemento de DNA, podendo interromper tanto a transcrição como a replicação (Lindenauer e Darby, 1994). As bactérias desenvolveram, através da evolução, mecanismos de defesa devido à exposição à radiação ultravioleta da luz solar. Este mecanismo ocorre entre dímeros de pirimidina e uma enzima fotorreativante (PRE).

Harm (1975) citado por Lindenauer e Darby (1994) sugeriu um esquema quantitativo de fotorreativação (Figura 3.7) em dois passos:

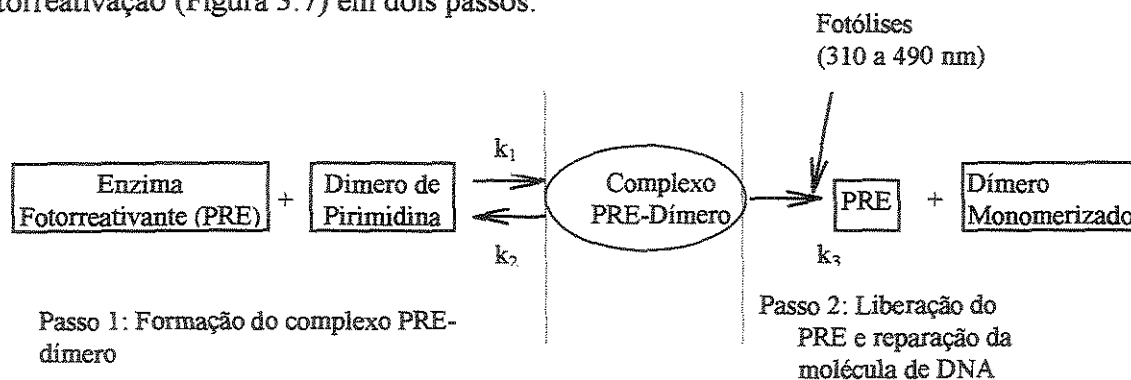


FIGURA 3.7 - Esquema de fotorreativação.

Passo 1: Formação do complexo PRE-dímero. Sem a necessidade da luz, uma PRE une-se com dímero de pirimidina para formar um complexo. O número de enzimas fotorreativante presente em microrganismos ou células varia para cada microrganismo. A taxa de formação depende da temperatura, pH, e força iônica.

Passo 2: Liberação da PRE e reparação do DNA. A fotorreativação resulta na monomerização do dímero e subsequente liberação da enzima fotorreativante. A restauração do dímero para sua forma monomerizada original é absolutamente dependente da intensidade da energia luminosa e cinética da reação. A reação ocorre em menos de milésimos de segundos e a reparação é perfeita. O comprimento de onda necessário para fotorreativação difere para cada microrganismo, mas em geral está entre 310 e 490 nm.

Em 1949, Kelner (*apud Lindenauer e Darby, 1994*) definiu o Fator de Redução de Dose (FRD) para quantificar o efeito da fotorreativação:

$$\text{FRD} = \frac{\text{dose uv para dada sobrevivência sem fotorreativação}}{\text{dose uv para mesma sobrevivência com fotorreativação}} \quad (3.28)$$

O FRD é sempre menor ou igual a 1. Em 1951, Kelner (*apud Lindenauer e Darby, 1994*) recomendou que a fotorreativação fosse quantificada por:

$$GF = \frac{N_{pr} - N}{N_0 - N} * 100 \quad (3.29)$$

onde:

GF: grau de fotorreativação;

N: microrganismos sobreviventes ;

N<sub>0</sub>: microrganismos iniciais; e,

N<sub>pr</sub>: número de microrganismos fotorreativados.

Desta forma, o grau de fotorreativação representa a fração de células inativadas que foram reativadas.

### 3.7 - Características Hidráulicas de Reatores

Além das características fotoquímicas dos reatores, as características hidráulicas são muito importantes para avaliar a eficiência na desinfecção com radiação ultravioleta. Para este tópico utilizou-se como referência básica “Design Manual – Municipal Wastewater Disinfection” da U.S.EPA, 1986.

As principais considerações hidráulicas de operação de um reator de ultravioleta são:

- tempo de residência hidráulica;
- dispersão;
- turbulência;
- volume efetivo;

#### 3.7.1 - Tempo de Residência Hidráulica

Em condições ideais, o perfil de velocidade de qualquer reator de fluxo contínuo deveria ser conhecido em qualquer ponto. Porém, isto não é possível, assim as características do fluxo podem ser descritas pela curva de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) (Figura 3.8). Pela distribuição normalizada, a área sob esta curva é igual a 1.

$$\int_0^{\infty} E \cdot dt = 1 \quad (3.30)$$

onde E é igual a Distribuição do Tempo de Residência - DTR.

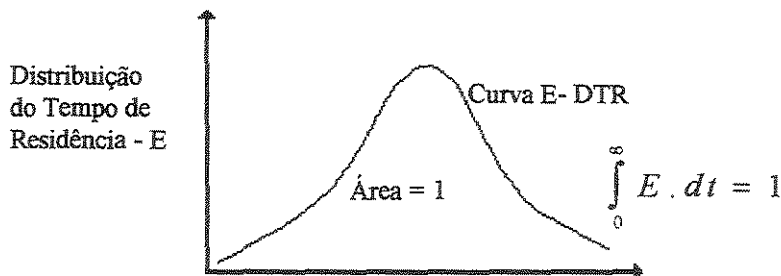


FIGURA 3.8 - Representação da curva da distribuição do tempo de residência.

Para uma dada curva E, o tempo de residência médio ( $\theta$ ) pode ser determinado por:

$$\theta = \int_0^{\infty} t \cdot E \cdot dt \quad (3.31)$$

Para determinar a curva E-DTR, utiliza-se um traçador (inerte) no afluente do reator. O modo como este traçador é introduzido, seja em pulso ou gradativamente, reflete-se na forma da curva de distribuição.

A melhor condição de operação de um reator de desinfecção por ultravioleta, é a do “plug-flow” ideal, onde todos elementos (partículas) residem por um tempo igual. Esta condição ideal não é obtida em condições reais, pois haverá um certo grau de dispersão. Um dos aspectos de se avaliar o comportamento hidráulico do reator é minimizar esta dispersão.

Vários parâmetros numéricos podem ser usados para descrever a curva DTR, que combinados com uma série de outros índices, descrevem o comportamento hidráulico do reator. A seguir, são definidos alguns parâmetros:

$t_f$  = tempo em que aparece o primeiro sinal do traçador;

$t_p$  = tempo em que o pico da concentração do traçador é observado;

$t_{10}$  = tempo em que 10% do traçador passou pelo reator;

$t_{50}$  = tempo em que 50% do traçador passou pelo reator;

$\theta$  = tempo médio (centróide) da curva;

T = tempo teórico de residência (Volume/Vazão);

$t_{90}$  = tempo em que 90% do traçador passou pelo reator.

As relações entre o tempo teórico e os parâmetros acima definidos são:

$t_f/T$  : mede o curto circuito no reator. Para um reator “plug-flow” ideal, a taxa é 1, aproxima-se de 0, com aumento da mistura;

$t_p/T$  : mede a média do grau de curto-circuito e indica a presença de áreas mortas, estimando o volume efetivo. A taxa é de 1 para reator “plug-flow” ideal, e 0 com aumento da mistura;

$t_{90}/t_{10}$  : conhecido como Morrill Dispersion Index, mede a dispersão da curva. O valor de 1 é para reator “plug-flow” ideal, e 21.9 para mistura ideal. Os reatores “plug-flow” bem projetados devem ter índice menor que 2;

$\theta/T$  : para qualquer reator deveria ser igual a 1, isto implica no uso completo de todo o volume. Para valores significativamente menores que 1, implica em volume efetivo muito menor que o real;

$t_{50}/\theta$  : o desvio do valor 1 indica o deslocamento lateral da curva normal de distribuição.

A curva DTR é uma ferramenta importante que fornece o comportamento real do reator. Para um reator “plug-flow” os valores recomendados para estas relações são:

$$\begin{aligned} t_p/T &> 0,5 \\ t_{90}/t_{10} &< 2,0 \\ t_p/T &> 0,9 \\ t_{50}/\theta &= 0,9 \text{ a } 1,1 \end{aligned}$$

### 3.7.2 - Dispersão

O número de dispersão ( $d$ ) é grupo adimensional formado por:

$$d = E/uX \quad (3.32)$$

onde  $E$  é definido como coeficiente de dispersão ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $u$  é a velocidade axial linear, e  $X$  é comprimento (caminho percorrido pelo fluido) (*Kreft et al.*, 1986). Em um reator “plug-flow” os valores do número de dispersão podem variar:

$E/uX = 0$	Sem dispersão;
$E/uX < 0.01$	Baixa dispersão;
$E/uX = 0.01$ a $0.1$	Moderada dispersão;
$E/uX > 0.1$	Alta dispersão.

No caso onde a DTR é a distribuição normal (ou de Gauss), o número de dispersão pode ser estimado através da variância:

$$\sigma_{\theta}^2 = \sigma^2 / \theta^2 \approx 2.(E/uX) \quad (3.33)$$

A variância,  $\sigma_{\theta}^2$ , normalizada para o tempo de distribuição médio, é adimensional.

### 3.7.3 - Turbulência

Em um regime turbulento, todas partículas têm a probabilidade igual de estar em qualquer ponto da seção transversal do reator. A importância da turbulência está no fato de que o campo de intensidade de radiação ultravioleta não é uniforme, assim, fluxo em regime turbulento, força a partícula a passar por todos os níveis de intensidade.

A turbulência pode ser indicada pela perda de carga,  $H$ , relacionado-a com a velocidade,  $u$ :

$$H \cong u^n \quad \text{onde} \quad \begin{array}{l} n = 1 \text{ (laminar)} \\ n = 1.75 \text{ a } 2.0 \text{ (turbulento)} \end{array} \quad (3.34)$$



Além da perda de carga, o Número de Reynolds,  $N_R$ , pode indicar a turbulência, que é um número adimensional, dado por:

$$N_R = L^2 u^2 \rho / Lu\mu = Lu / \nu \quad (3.35)$$

onde:  $u$  = velocidade;  
 $\rho$  = densidade do fluido;  
 $\mu$  = viscosidade;  
 $L$  = dimensão linear típica (diâmetro, profundidade, etc.); e,  
 $\nu$  = viscosidade cinemática.

#### 3.7.4 - Volume Efetivo

É importante que o reator seja projetado para a utilização de todo volume, evitando zonas mortas ou áreas de curto-circuito, que implica no uso ineficiente da potência das lâmpadas, que por sua vez aumenta o custo de implantação do sistema de ultravioleta e os custos de operação.

### 3.8 - Reatores Fotoquímicos

A radiação ultravioleta atua nos ácidos nucleicos dos microrganismos. Desta forma, é considerado que este tipo de reação ocorra em reatores fotoquímicos. Existem vários modelos de reatores utilizados, que são classificados quanto à forma geométrica, modo de operação, e disposição das lâmpadas (emersas ou imersas).

### 3.8.1 - Reatores Fotoquímicos de Lâmpadas Emersas

Este tipo de reator é considerado de grande dimensão com faces paralelas, equipado com refletor parabólico (Figura 3.9). Pode operar com fluxo contínuo ou descontínuo. A fonte luminosa é tipo tubular extensa instalada sob o refletor, fixada sobre a lâmina líquida.

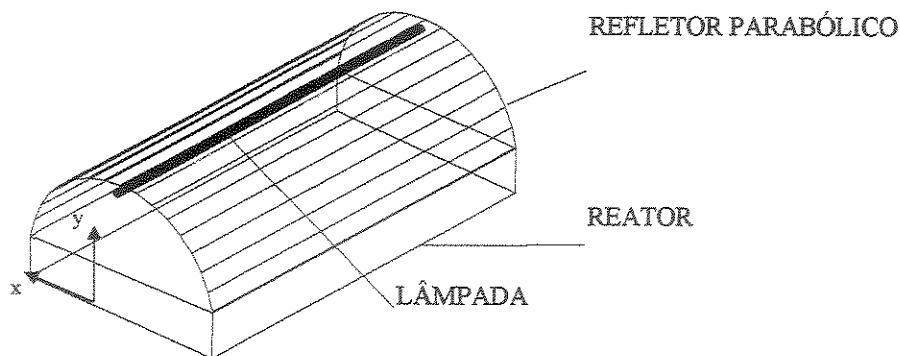


FIGURA 3.9 - Reator fotoquímico de lâmpadas emersas (*Braun et al.*, 1986).

Em refletores onde a seção transversal não é parabólica, o cálculo analítico da intensidade de radiação ultravioleta sobre a lâmina líquida é dificultada pela complexidade do padrão de reflexão destes, principalmente quando se tem mais de uma lâmpada.

Para refletores parabólicos o valor da intensidade de radiação pode ser calculado analiticamente em vários pontos da superfície irradiada (Figura 3.10). Neste cálculo, considera-se a intensidade de radiação como a somatória de dois termos (*Braun et al.*, 1986): intensidade de radiação devido a irradiação direta ( $E_{dir}$ ); e a intensidade devido à radiação refletida ( $E_{ref}$ ). Em um ponto qualquer da superfície irradiada de coordenadas  $(x,y)$ , a intensidade da radiação é dada por:

$$E(x,y) = E_{dir}(x,y) + \rho E_{ref}(x,y) \quad (3.36)$$

onde:

$E_{dir}$ : intensidade de radiação direta;

$E_{ref}$ : intensidade de radiação refletida;

$\rho$ : fator de reflexão.

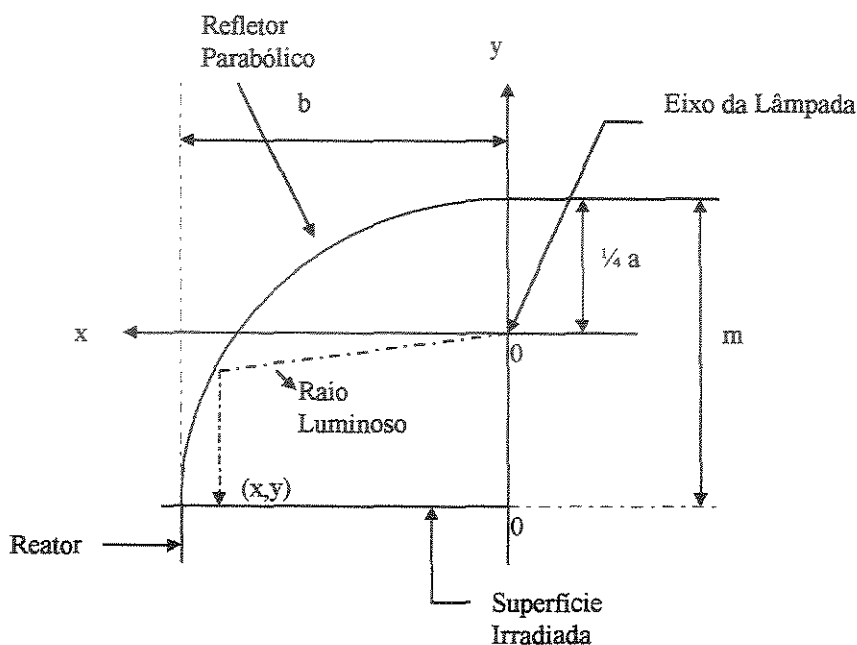


FIGURA 3.10 - Corte transversal de reator de lâmpadas emersas (*Braun et al.*, 1986).

### 3.8.2 - Reatores Fotoquímicos Cilíndricos de Câmaras Luminosas Coaxiais

Os fotorreatores cilíndricos (tubulares) envoltos em uma câmara luminosa coaxial são muito freqüentes (*Braun et al.*, 1986). Esse reator é constituído de um tubo cilíndrico de paredes transparentes com uma ou mais fontes luminosas, dispostos externamente ao tubo, e um refletor para assegurar a homogeneidade da câmara luminosa (Figura 3.11).

Mesmo com a utilização de refletores há uma perda sensível da potência radiante incidente, se comparado com a que seria obtida com uma fonte luminosa equivalente, colocada no interior de reator anular.

O fotorreator do tipo radial é o mais simples dos reatores cilíndricos de câmara luminosa coaxial. O reator é colocado no centro da câmara luminosa (Figura 3.12).

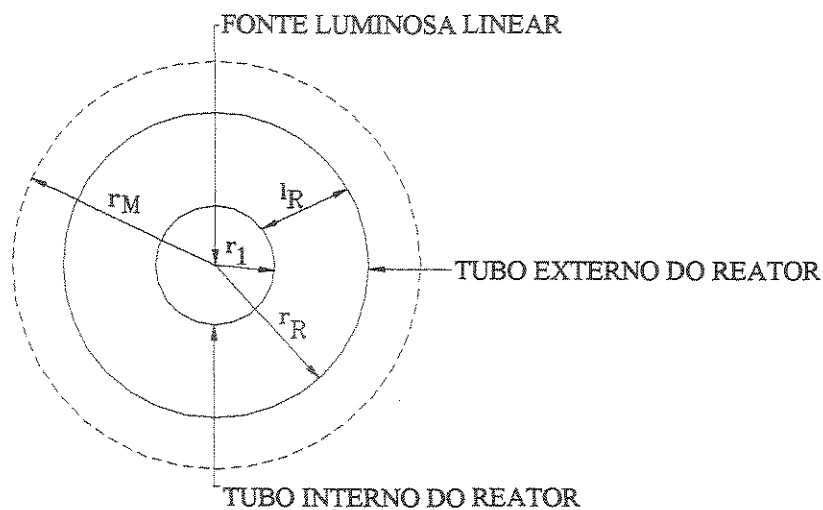


FIGURA 3.11 - Corte transversal do reator fotoquímico anular (*Braun et al.*, 1986).

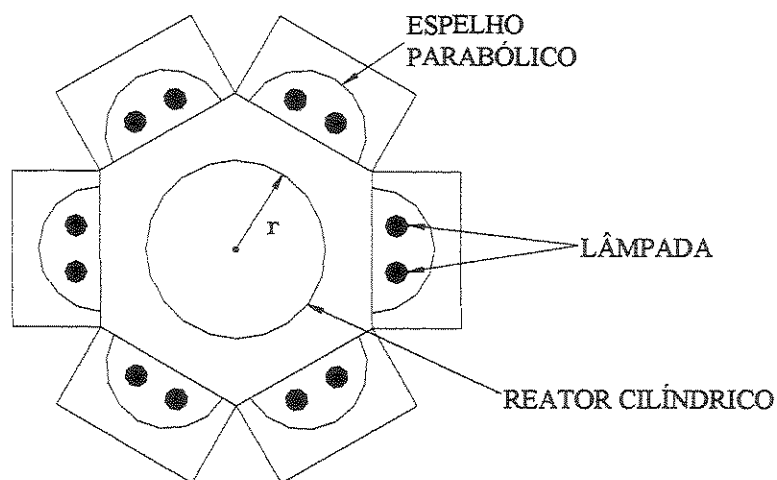


FIGURA 3.12 - Reator fotoquímico tipo radial (*Braun et al.*, 1986).

Este tipo de reator tem algumas vantagens para experiências em laboratórios, entre elas a de que os acessórios dos reatores são facilmente adaptados para condições específicas da reação fotoquímica a realizar.

### 3.9 - Custos do Sistema de Radiação Ultravioleta

O sistema de radiação ultravioleta tem sido comparado com outros sistemas de desinfecção. A radiação ultravioleta tem custos equivalentes em relação ao cloro, principalmente para taxas de vazão mais baixas, e quando comparado com o ozônio, tem custos inferiores. A Figura 3.13, apresenta a comparação dos custos totais de produção, para a cloração (dose de 5 mg/l), ozônio (dose de 1 mg/l), e ultravioleta com doses de 40 e 140 mWs/cm<sup>2</sup> com cloração de 1 mg/l.

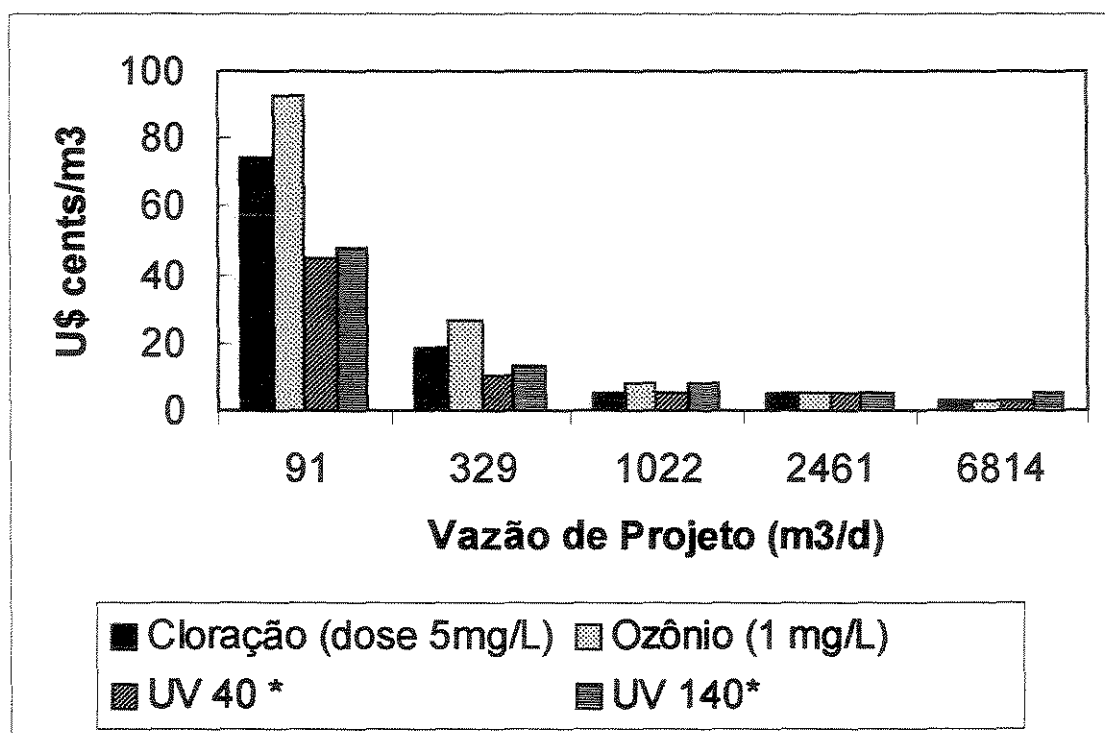


FIGURA 3.13 - Custos totais de produção na desinfecção de efluente secundário tratado com ultravioleta, ozônio e cloração (U.S. EPA, 1996).

Em um estudo comparativo entre os sistemas de radiação ultravioleta e cloração para desinfecção de água de abastecimento, Pires (1997) comparou sistemas de desinfecção com ultravioleta e um equivalente com cloro, para implantação em comunidades rurais ou regiões urbanas periféricas, onde não há abastecimento público de água.

A vazão de tratamento foi de 20 l/min, e tempo de operação de 20 h/dia. O sistema de ultravioleta operou com uma lâmpada de 30 W de potência. Considerando o custo da eletricidade de R\$ 0,08 por kWh (1997), tem-se o custo anual em:  $(20 \text{ h/dia} \times 365 \text{ dias/ano}) \times (0,03 \text{ kW}) \times (\text{R\$ } 0,08/\text{kWh}) = \text{R\$ } 17,52/ \text{ por ano}$ . O volume de água desinfetada foi de:  $(20 \text{ l/min} \times 60 \text{ min}) \times (20 \text{ h/dia} \times 365 \text{ dias/ano}) = 8760 \text{ m}^3 \text{ por ano}$ . O consumo de energia elétrica é de:  $(30 \text{ W}) \times (20 \text{ h/dia}) \times (365 \text{ dias/ano}) = 219 \text{ kWh}$ . Então a relação entre o volume de água desinfetada e consumo de energia elétrica é de:  $8760 \text{ m}^3 / 218 \text{ kWh} = 40 \text{ m}^3/\text{kWh}$ .

Considerando que a indústria consome 3,26 MWh/ton. de energia elétrica na produção do cloro (Abiclor, 1994), a relação entre o volume de água desinfetada e o consumo de energia elétrica em função da dose de cloro aplicada está apresentada na Tabela 3.3.

TABELA 3.3- Relação entre o volume de água desinfetada por cloro e o consumo de energia elétrica em função da dose de cloro.

Dose mg/l	Volume/Consumo (m <sup>3</sup> /kWh)
1	36,81
2	18,40
3	12,27
4	9,20
5	7,36

Fonte: Pires, 1997

É importante ressaltar a energia elétrica é o principal componente de custo na operação de um sistema de desinfecção por radiação ultravioleta. Quando se faz a comparação dos custos de produção entre este sistema e a cloração, o custo da energia elétrica já está incluído no custo final do cloro.

### 3.10 - Desvantagens dos Sistema de Radiação Ultravioleta

A radiação ultravioleta por ser um agente físico de desinfecção, não deixa residual no efluente tratado, necessitando da adição de desinfetante químico, principalmente, quando se trata de desinfecção de água de abastecimento, onde é obrigatório um teor mínimo de residual livre.

Outra desvantagem, é o controle da dose aplicada, pois, como foi apresentado neste capítulo, dependendo do método escolhido para se determinar a dose, há diferenças significativas nos valores. Além disso, nenhum método é direto de determinação da dose, ou seja, só é possível em condições bem controladas de laboratório. Pires (1997) sugere que haja padronização no método de determinação da dose radiação ultravioleta, e a ausência desta padronização dificulta a comparação de resultados (*Lazarova et al.*, 1999).

A fotorreativação é um fator que deve ser investigado para o conhecimento de seus limites, pois como apresentado neste capítulo, é importante conhecer o grau de fotorreativação para ser possível quantificar o seu efeito através do Fator de Redução de Dose (FRD) (*Kelner apud Lindenauer e Darby*, 1994).

Atualmente, há vários modelos de equipamentos de ultravioleta, alguns são projetados para canal aberto, neste casos devem ser tomadas algumas medidas de segurança aos operadores, pois a radiação ultravioleta é nociva a pele, e principalmente a visão, devendo-se evitar a radiação direta.

## **CAPÍTULO 4**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **4.1 - Introdução**

A pesquisa experimental foi realizada em três etapas:

- ✓ **1ª etapa:** caracterização do sistema de ultravioleta que consiste em:
  - a) caracterização física dos reatores de radiação ultravioleta; e,
  - b) comportamento hidrodinâmico dos reatores.
- ✓ **2ª etapa:** eficiência dos reatores de lâmpada emersa e de lâmpada submersa:
  - a) inativação de microrganismos; e,
  - b) fotorreativação.
- ✓ **3ª etapa:** análise da fotorreativação com intensidade de radiação de ultravioleta e luz visível controladas.

#### **4.2 - Caracterização do Sistema de Ultravioleta**

Foram utilizados dois reatores com princípios de funcionamento diferentes. O reator I é composto por lâmpadas emersas, e o reator II é cilíndrico com lâmpada submersa coaxial. Nos sub-itens abaixo apresentam-se as características dos reatores I e II, bem como figuras ilustrativas e fotos.



#### 4.2.1 – Caracterização Física dos Reatores

##### REATOR I

O reator de lâmpadas emersas, denominado de Reator I, é formado por duas partes, a inferior e a superior, em alumínio polido. A parte inferior tem dimensões externa de 120x40x10 cm. Internamente subdivide-se em compartimentos de entrada, saída, e com chicanas. Na saída do reator há um vertedouro retangular de 4 cm de altura, que tem a função de limitar a altura da lâmina d'água. A parte superior é refletora na forma de paralelepípedo reto-retangular, e que recebe as lâmpadas de ultravioleta. Tem as mesmas dimensões externa da parte inferior, porém, internamente têm dois anteparos a 10 cm das extremidades laterais, que servem para delimitar a área exposta a radiação ultravioleta em 100 cm. A Figura 4.1, apresenta o esquema geral do Reator I, e as Figuras 4.2 e 4.3, as fotos do reator. Este reator tem duas lâmpadas de ultravioleta de 30 W.

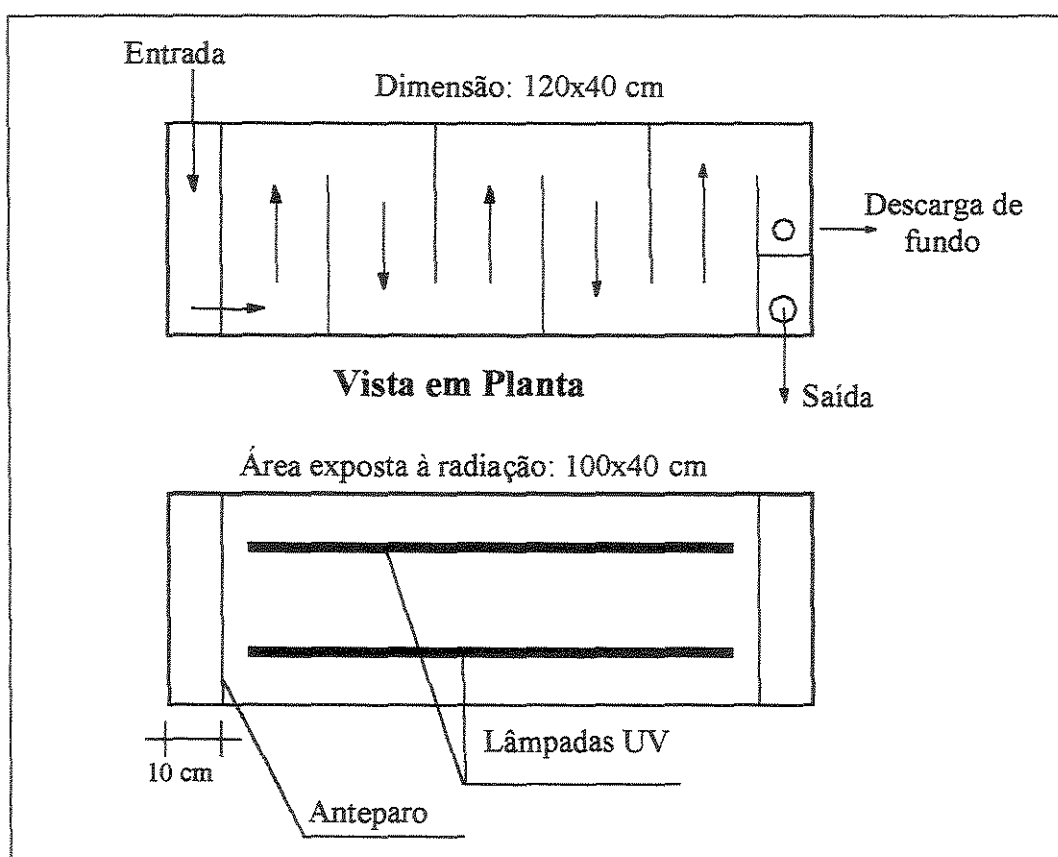


FIGURA 4.1 – Esquema geral do Reator I.

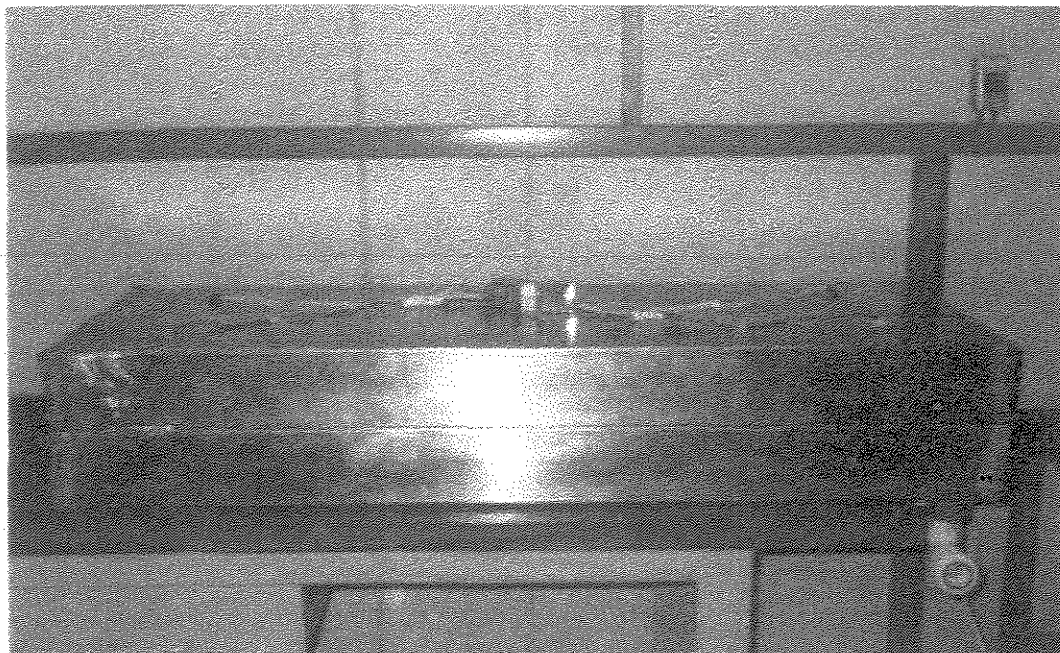


FIGURA 4.2 – Foto do Reator I – vista externa.

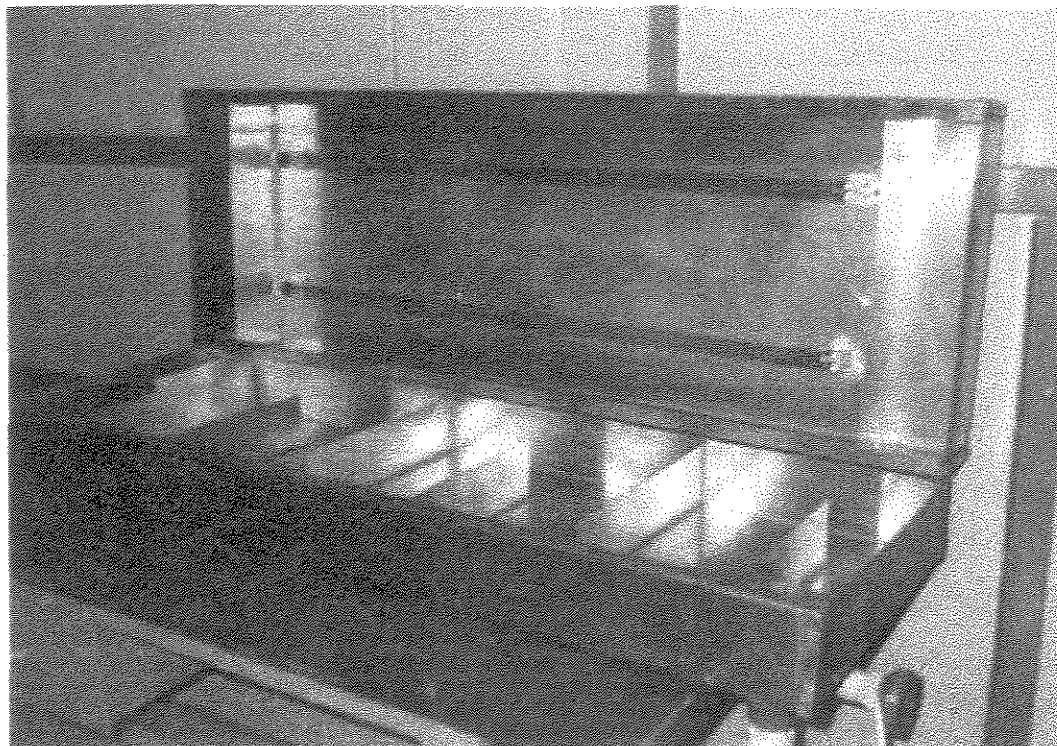


FIGURA 4.3 – Foto do Reator I – vista interna.

## REATOR II

O Reator II é cilíndrico de diâmetro de 4 polegadas ou 10,16 cm e comprimento de 86 cm, construído em aço inox. Está envolvido em uma caixa protetora de dimensões de 100x22x13 cm, em aço inox escovado. O Reator II opera com uma lâmpada de ultravioleta de 30 W instalada no centro do reator. Paralela à lâmpada, 3 tubos perfurados de PVC de ½" de diâmetro que tem a função de fazer a limpeza da lâmpada quando necessário, através de entrada de água externamente. A entrada e saída do afluente é feita pela parte superior do reator a 5 cm de cada extremidade. A Figura 4.4 mostra o esquema geral do Reator II, e as Figuras 4.5 e 4.6, as fotos do reator.

Para o cálculo do volume útil do Reator II, foi levado em consideração o volume ocupado pelos tubos e pela lâmpada. Portanto, o volume interno do reator é de aproximadamente 6,20 litros.

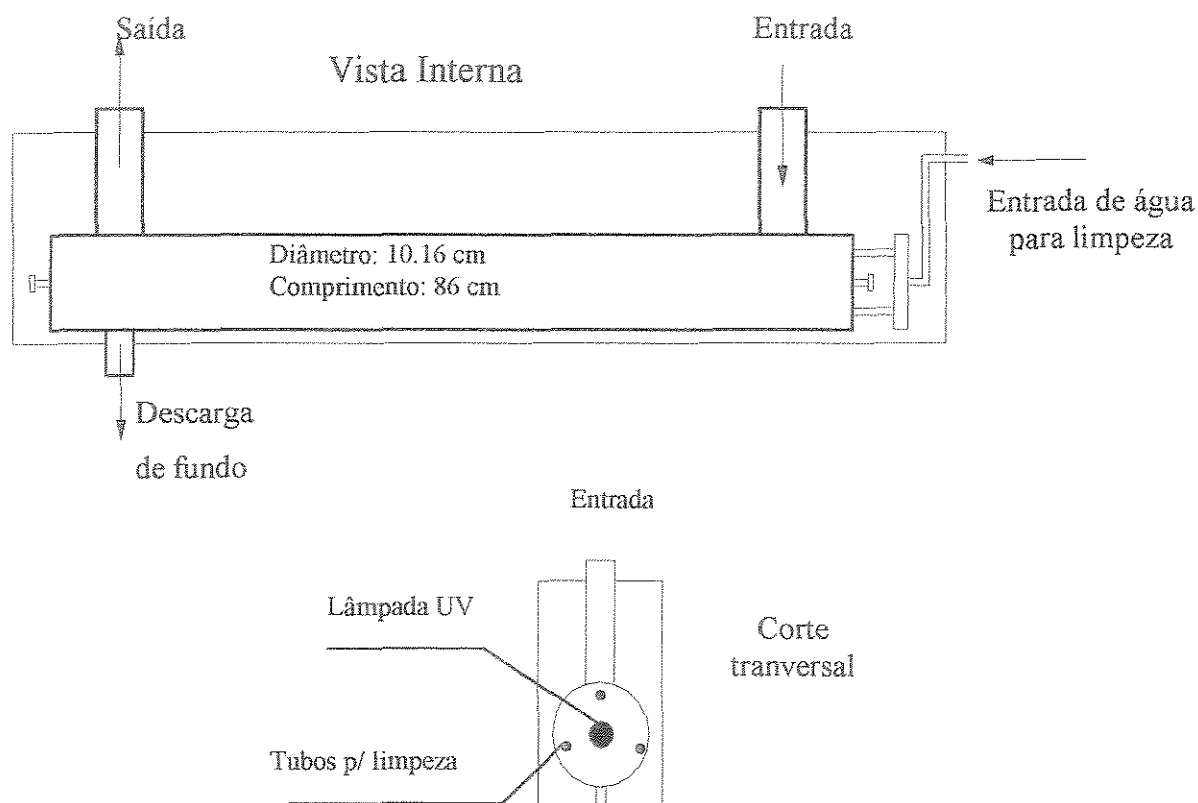


FIGURA 4.4 – Esquema geral do Reator II.

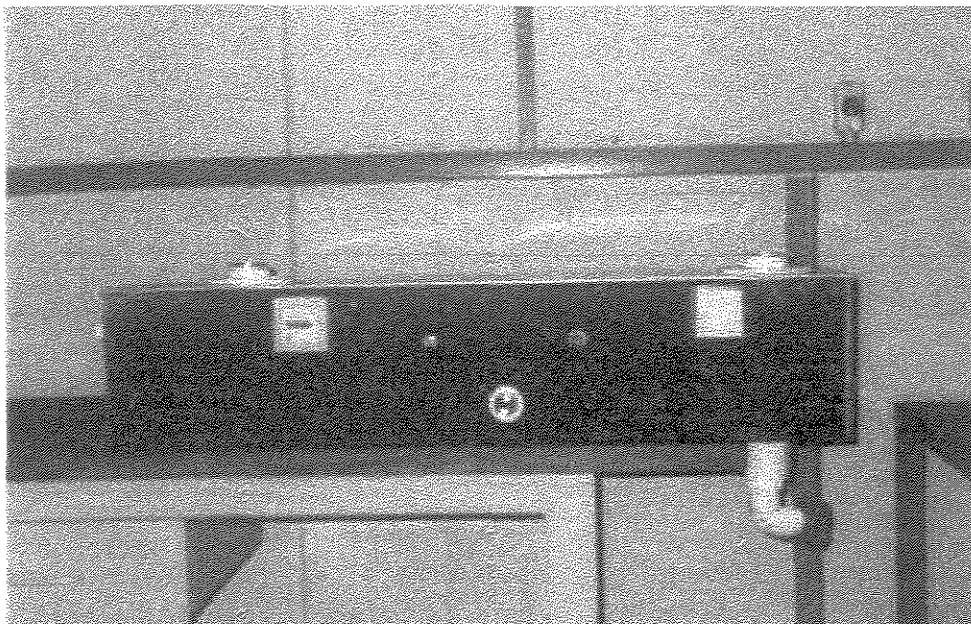


FIGURA 4.5 – Foto do Reator II – vista externa

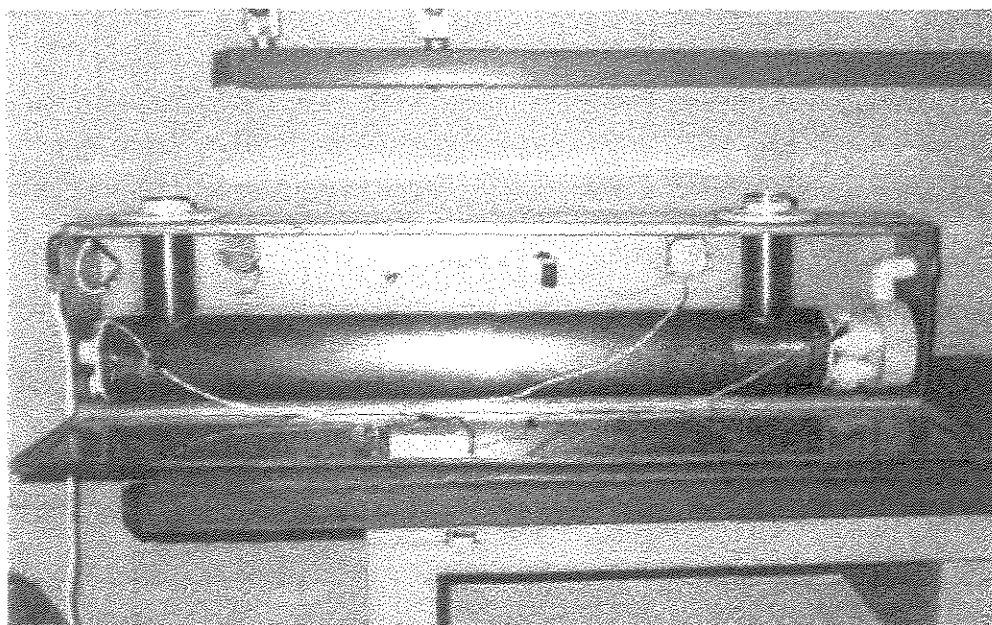


FIGURA 4.6 – Foto do Reator II – vista interna

#### 4.2.2 – Comportamento Hidrodinâmico dos Reatores

Para a análise do comportamento hidrodinâmico dos reatores foi utilizado como traçador a solução de NaCl. Para o Reator I a solução de traçador em 4%, e para o Reator II utilizou-se o traçador em concentrações de 1% e 2% com o objetivo de se determinar a melhor concentração para este tipo de análise. A solução foi introduzida utilizando-se uma seringa exatamente antes da entrada do reator, através da técnica de estímulo-resposta conhecida como pulso. O volume de traçador introduzido foi de 10 mL, quantidade suficiente para que houvesse a variação da condutividade sem alterar a técnica de injeção da solução salina. Na saída do reator, a concentração da solução foi medida através do equipamento condutivímetro, marca Micronal – B330. Ao condutivímetro foi conectado um registrador contínuo com controle de velocidade de arraste em cm/min, o que possibilitou o controle exato da variação da concentração da solução de NaCl em função do tempo. A Figura 4.7 mostra a instalação dos equipamentos para caracterização hidrodinâmica.

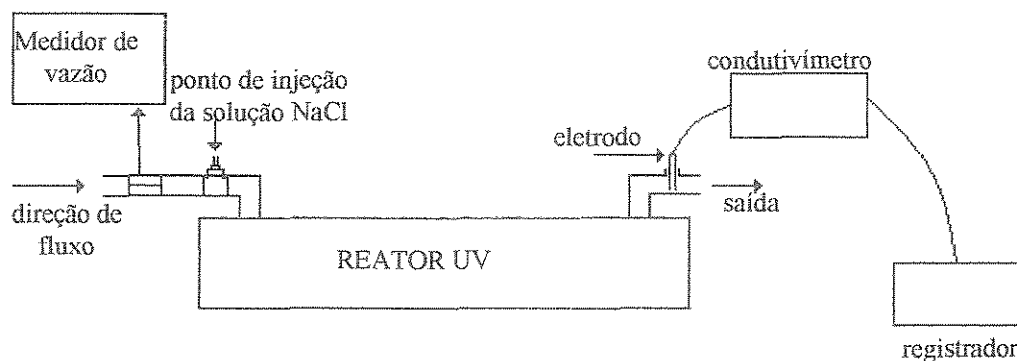


FIGURA 4.7 – Esquema da instalação para os ensaios experimentais de comportamento hidrodinâmico.

Para relacionar a condutividade,  $K$  ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), registrada à correspondente concentração de NaCl da solução, foi feita separadamente uma curva de calibração.

O reator foi testado vazões diferentes, realizando-se 3 repetições para cada vazão. A vazão foi obtida através de medidor ultra-sônico. A variação da vazão possibilitou obter a curva do tempo de residência real em função da vazão.

Para obtenção do tempo de residência,  $\theta$ , relacionou-se o tempo ( $t_i$ ) e a concentração ( $C_i$ ), então o valor de  $\theta$  é dado por:

$$\theta = \frac{\sum t_i \cdot C_i}{\sum C_i} \quad (4.1)$$

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, da UNICAMP.

#### **4.3 – Ensaios de Inativação**

Os reatores de desinfecção por radiação ultravioleta foram testados em ETE selecionadas, de acordo com os sistemas ou processos utilizados para o tratamento de esgoto, possibilitando operar o sistema de ultravioleta com várias qualidades de efluentes. Com este objetivo foram escolhidos seis Pontos de Coletas em estações de tratamento de esgoto com sistemas e processos variados. Na seqüência são apresentados os Pontos de Coleta e suas principais características. Os equipamentos do sistema de radiação ultravioleta foram locados nas ETE e as análises foram realizadas no Laboratório de Saneamento e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil e no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Agrícola, ambos localizados na UNICAMP.

##### **PONTO DE COLETA 1 - Efluente final - ETE Piracicamirim**

Este ponto de coleta refere-se ao efluente final da Estação de Tratamento de Esgoto da Bacia do Piracicamirim – SEMAE, Piracicaba-SP. A estação é composta por três reatores anaeróbios em paralelo – UASB com manta de lodo, considerado o tratamento primário, seguido de uma lagoa aerada, considerada tratamento secundário. No final da lagoa há um decantador secundário de onde foi coletada as amostras.

##### **PONTO DE COLETA 2 - Efluente UASB - ETE Piracicamirim**

O Ponto de Coleta 2 está também localizado na Estação de Tratamento de Esgoto de Piracicamirim, em Piracicaba/SP. Porém as amostras foram coletadas na saída dos reatores, ou seja, do reator anaeróbio - UASB.

### **PONTO DE COLETA 3 - ETE CECAP**

O Ponto 3 de coleta está situado na Estação de Tratamento de Esgoto da CECAP, em Piracicaba. O sistema de tratamento é formado por três lagoas em série, sendo uma anaeróbia (que recebe o esgoto bruto) e duas facultativas. O sistema foi instalado à jusante da terceira lagoa (facultativa).

### **PONTO DE COLETA 4 - ETE Carioba**

A estação de tratamento, que está localizada em Americana/SP, é composta principalmente por dois Filtros Biológicos, em paralelo, com decantadores secundários. Foi utilizado o efluente final para o sistema de desinfecção.

### **PONTO DE COLETA 5 — Lodos Ativados Convencional**

Este ponto de coleta está localizado na ETE de indústria de tecnologia, Campinas/SP. O tratamento de esgoto é feito pelo sistema de Lodos Ativados Convencional. Utilizou-se o efluente final para o sistema de desinfecção. Apesar de estar localizada em uma indústria, o efluente é principalmente sanitário.

### **PONTO DE COLETA 6 - ETE - IAC/Jundiaí**

O ponto de Coleta está localizado na campo experimental do Instituto Agrônomo de Campinas, na cidade de Jundiaí. O tratamento do esgoto pode ser caracterizado como um reator que opera pelo processo anaeróbio.

#### **4.3.1 - Eficiência dos Reatores na Inativação de Microrganismos**

O efluente da unidade de tratamento foi desviado para os dois reatores de ultravioleta. A Figura 4.8 apresenta o esquema geral da instalação piloto.

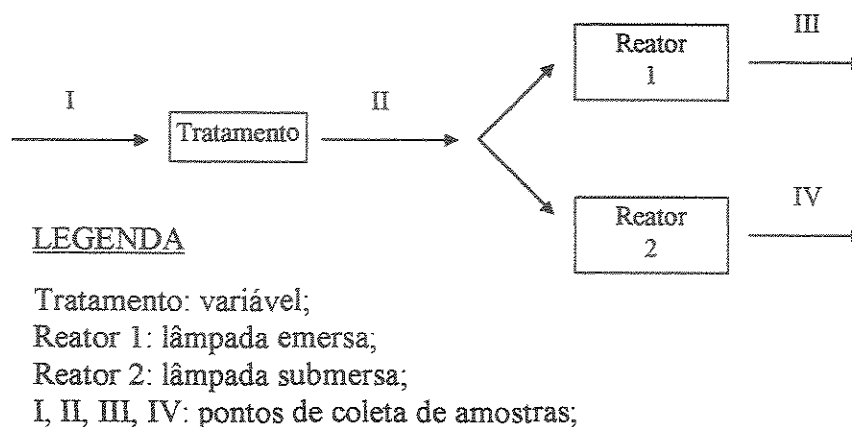


FIGURA 4.8 - Esquema geral da instalação piloto.

O sistema foi operado no regime de fluxo contínuo com vazão monitorada através de medidor instalado na entrada das unidades de tratamento. Com o auxílio de registros, as vazões foram variadas nos afluentes dos reatores de ultravioleta, a fim de se avaliar a eficiência em diferentes tempos de detenção. Para cada vazão foram realizados dois ensaios, coletando-se uma amostra para cada ensaio. Os ensaios foram realizados em 4 vazões diferentes, que estão apresentadas a seguir:

n.	Vazão(L/min)	Tempo de Exposição, $\theta$ (s)	
		Reator I	Reator II
1	15,00	99,07	23,61
2	17,50	86,95	20,90
3	21,00	67,98	17,11
4	24,00	55,43	13,86

As amostras dos pontos II, III e IV foram coletadas em frascos estéreis, de acordo com as exigências para coleta de análises bacteriológicas.



#### 4.3.2 – Fotorreativação dos Microrganismos

As amostras III e IV foram, também, submetidas a avaliação do potencial de fotorreativação. Estas amostras foram colocadas em placas de Petri de profundidade de 10 mm e expostas à luz solar direta por períodos de 1,5 horas para posterior avaliação do grau de fotorreativação. O tempo de escuro, ou seja, antes da exposição à luz visível direta, foi aproximadamente de 2 horas para padronizar todas as análises de fotorreativação, isto devido à diferentes distâncias dos pontos de coleta até o laboratório. As análises dos resultados foram realizados de acordo com as equações desenvolvidas por Lindenaure e Darby (1994).

#### 4.3.3 – Parâmetros Analisados

Os parâmetros que foram analisados em cada ponto de coleta são: i) pH; ii) cor; iii) turbidez; iv) absorvância e transmitância a 254 nm; v) sólidos totais; vi) sólidos em suspensão; vii) DQO; viii) DBO; ix) coliformes total e fecal; e, x) fotorreativação dos coliformes.

Foram analisados todos os parâmetros para cada amostra, exceto DBO, podendo estabelecer inter-relações dos parâmetros. Será coletada uma amostra no início e uma no final do trabalho de cada dia de coleta para análise de DBO, verificando se ocorre variação significativa deste parâmetro. Os resultados experimentais serão analisados de acordo com “*APHA*, 1989”. Para análise dos coliformes utilizou-se o método cromogênico do produto de marca comercial Colilert.

TABELA 4.1 – Parâmetros analisados em cada ponto de coleta.

Parâmetros	Pontos de Coleta			
	I	II	III	IV
pH	-	X	-	-
Cor	-	X	-	-
Turbidez	-	X	-	-
Absorbância	-	X	-	-
Sólidos Totais	-	X	-	-
Sólidos em Suspensão	-	X	-	-
DQO	X	X	-	-
DBO	X	-	-	-
Coliformes Totais	-	X	X	X
Coliformes Fecais – <i>E.coli</i>		X	X	X
Fotorreativação	-	-	X	X

Para esta parte experimental, foi realizado uma análise estatística para auxiliar na avaliação dos resultados com o programa Sanest, em que foi possível determinar diferença significativa entre os reatores, entre as vazões e a interação reator por vazão.

#### 4.4 – Fotorreativação em Condições Controladas

Para realização dos ensaios foram utilizados dois módulos: i) Módulo de Inativação; e, ii) Módulo de Fotorreativação.

Módulo de Inativação: composto por uma lâmpada de ultravioleta de potência nominal de 30 W, e uma base para apoio da placa de “Petri” situada sob o módulo, conforme mostra a Figura

4.9. Utiliza-se um tubo para que o feixe de luz ultravioleta incida diretamente sobre a placa de “Petri”, e na parte não abrangida pelo tubo, são colocados anteparos para vedar a saída de luz ultravioleta para evitar acidentes.

Módulo de Fotorreativação: composto por uma luminária de com duas lâmpadas fluorescente 2X20 W cada, e uma base para apoio da placa de “Petri” situada sob o módulo. O módulo todo é fechado para que as placas recebam apenas a luz das lâmpadas fluorescentes (Figura 4.10).

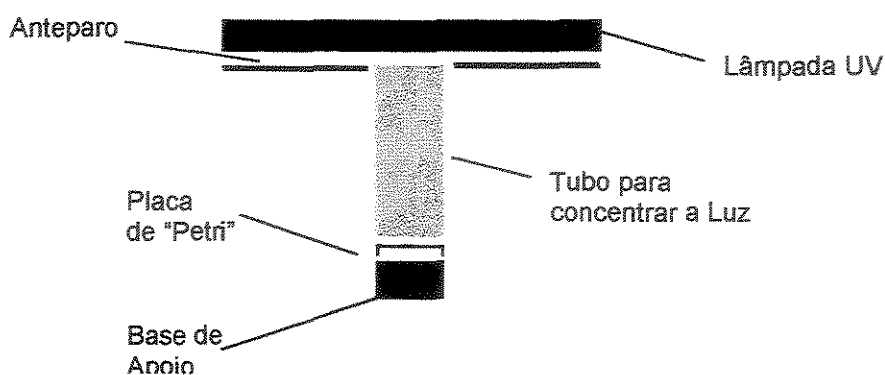


Figura 4.9 – Módulo de Inativação

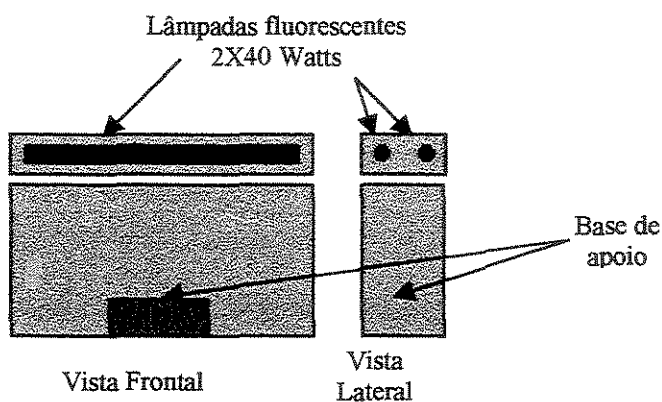


FIGURA 4.10 – Módulo de Fotorreativação

Operação dos Ensaios: A amostra utilizada é o efluente final “Wetland” construída na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, para as análises de coliformes totais e de *E.coli*. O efluente é colocada na placa de “Petri”, levado ao Módulo de Inativação, e exposto à

luz ultravioleta. Foram feitas análises para os tempos de 40 ,50 , 60, 70 e 80 segundos, realizando-se três ensaios para cada tempo de exposição. Então, estas placas são colocadas no Módulo de Fotorreativação por uma hora.

Amostragem: foram coletadas amostras antes e depois da exposição à luz ultravioleta no Módulo de Inativação. No Módulo de Fotorreativação foram coletadas amostras a cada 15 minutos, ou seja, 15, 30, 45 e 60 minutos.

Intensidade de Radiação Ultravioleta: intensidade foi medida para o comprimento de onda de 254 nm, utilizando um radiômetro marca Cole-Parmer, a unidade é dada em  $\text{mW}/\text{cm}^2$ . Para determinar a dose de radiação ultravioleta multiplica-se a intensidade pelo tempo de exposição.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para cada etapa do comportamento hidrodinâmico dos reatores, nos ensaios de inativação nos Pontos de Coleta e dos ensaios de fotorreativação em condições controladas.

#### **5.1 – Comportamento Hidrodinâmico dos Reatores**

Os reatores foram testados para 4 vazões. Para o reator I foi realizado apenas um ensaio para cada vazão (concentração da solução de traçador de 4%), e para o reator II realizaram-se 3 repetições para cada vazão: i) séries A, B e C para concentração de 1%; e, ii) séries D, E e F para concentração de 2%. A vazão foi obtida através de medidor ultra-sônico. As vazões foram: 14,84; 17,62; 20,40; e 23,18 L/min.

Devido ao fluxo ser do tipo canal aberto, a altura da lâmina d'água aumenta com o aumento da vazão, desta forma alterando o volume de água. Então foi realizado ensaios para relacionar estes dois parâmetros. A curva que relaciona a altura da lâmina d'água,  $H$  (cm), com a vazão,  $Q$  (L/min) é dada pela equação 5.1, e a Tabela 5.1 apresenta os valores da altura da lâmina d'água e volume do reator I para as vazões dos ensaios hidráulicos do reator de lâmpadas emersas. Com estes valores, a determinação do tempo de detenção teórico ( $T$ ) foi mais precisa.

$$H = 3,80 + 0,1.Q \quad (r = 0,9999) \quad (5.1)$$

TABELA 5.1 – Valores da altura da lâmina d'água e volume do reator I em função da vazão.

Vazão, Q (L/min)	Altura, H (cm)	Volume (L)
14,84	5,28	21,12
17,62	5,56	22,24
20,40	5,84	23,36
23,18	6,12	24,48

A curva de calibração que relaciona a condutividade com a concentração da solução de NaCl, mostrou-se linear para a faixa de 192 a 334  $\mu\text{S/cm}$  correspondente a faixa de concentração de 80 a 140 mg/L de NaCl. A curva é dada por:

$$C_i = -1,3426 + 0,4236.K_i \quad (r = 0,9999) \quad (5.2)$$

sendo  $C_i$  a concentração de NaCl em mg/L e  $K_i$  a condutividade em  $\mu\text{S/cm}$ .

Houve a necessidade de se analisar a compatibilidade entre 3 fatores, antes de iniciar os ensaios propriamente dito, que são eles: 1) concentração do traçador; 2) escala do condutivímetro; e, 3) escala do registrador. Foram realizados vários testes preliminares até que se atendesse satisfatoriamente os 3 fatores. Foram analisadas as curvas DTR nas concentrações de 1 e 2% para o reator II, possibilitando comparar a influência da concentração do traçador na obtenção de parâmetros hidráulicos de reatores. As Tabelas 5.2 a 5.4 apresentam os resultados finais da caracterização hidráulica, resumidamente, segundo os parâmetros descritos anteriormente, para cada reator. Para comparar os resultados das soluções de 1 e 2%, utilizou-se os valores médios do tempo de detenção hidráulico para cada vazão. A comparação entre os reatores I e II quanto ao tempo de detenção pode ser visto nas Figuras 5.1 e 5.2 que apresenta a variação da concentração do traçador em função do tempo.

TABELA 5.2 – Resultados experimentais do comportamento hidráulico de um reator ultravioleta de lâmpadas emersas (reator I) - traçador na concentração de 4%.

Vazão (L/min)	T (s)	Série	$\theta$ (s)	$t_r / T$	$t_p / T$	Parâmetros Hidráulicos			d
						$t_{90} / t_{10}$	$\theta / T$	$t_{50} / \theta$	
14,84	85,39	A	101,82	0,22	0,36	5,43	1,19	0,82	0,189
17,62	75,73	A	84,44	0,22	0,41	5,28	1,11	0,83	0,187
20,40	68,71	A	70,82	0,21	0,35	5,25	1,03	0,83	0,180
23,18	63,36	A	61,43	0,23	0,61	4,16	0,97	0,87	0,132

TABELA 5.3 – Resultados experimentais do comportamento hidráulico de um reator ultravioleta anular (reator II) - traçador na concentração de 1%.

Vazão (L/min)	T (s)	Série	Parâmetros Hidráulicos						
			$\theta$ (s)	$t_f / T$	$t_p / T$	$t_{90} / t_{10}$	$\theta / T$	$t_{50} / \theta$	d
14,84	24,93	A	24,00	0,54	0,81	1,85	0,96	0,91	0,04
		B	24,69	0,55	0,82	1,81	0,99	0,93	0,03
		C	24,63	0,49	0,83	1,95	0,99	0,91	0,05
17,62	20,99	A	19,85	0,40	0,83	2,40	0,95	0,91	0,06
		B	20,36	0,41	0,86	2,26	0,97	0,92	0,06
		C	19,66	0,39	0,76	2,50	0,94	0,89	0,07
20,40	18,13	A	17,46	0,43	0,83	2,08	0,96	0,90	0,05
		B	17,25	0,43	0,73	2,34	0,95	0,91	0,06
		C	18,17	0,56	0,89	1,83	1,002	0,92	0,04
23,18	15,96	A	15,45	0,49	0,90	2,03	0,97	0,94	0,04
		B	14,91	0,47	0,71	2,28	0,93	0,90	0,07
		C	15,08	0,41	0,86	2,20	0,94	0,92	0,05

TABELA 5.4 – Resultados experimentais do comportamento hidráulico de um reator ultravioleta anular (reator II) - traçador na concentração de 2%.

Vazão (L/min)	T (s)	Série	Parâmetros Hidráulicos						
			$\theta$ (s)	$t_f / T$	$t_p / T$	$t_{90} / t_{10}$	$\theta / T$	$t_{50} / \theta$	d
14,84	24,93	A	23,79	0,50	0,79	1,83	0,95	0,91	0,07
		B	22,62	0,48	0,72	2,02	0,91	0,87	0,08
		C	22,04	0,48	0,72	1,82	0,88	0,90	0,06
17,62	20,99	A	18,18	0,51	0,77	1,77	0,87	0,91	0,05
		B	18,73	0,43	0,77	2,03	0,89	0,89	0,07
		C	19,10	0,37	0,71	2,69	0,91	0,86	0,10
20,40	18,13	A	17,27	0,53	0,83	1,76	0,95	0,92	0,04
		B	17,48	0,53	0,89	1,67	0,96	0,94	0,03
		C	17,66	0,56	0,86	1,74	0,97	0,93	0,03
23,18	15,96	A	15,01	0,52	0,83	1,81	0,94	0,92	0,03
		B	16,17	0,52	0,86	2,01	1,01	0,90	0,05
		C	15,96	0,45	0,83	2,00	1,00	0,93	0,04

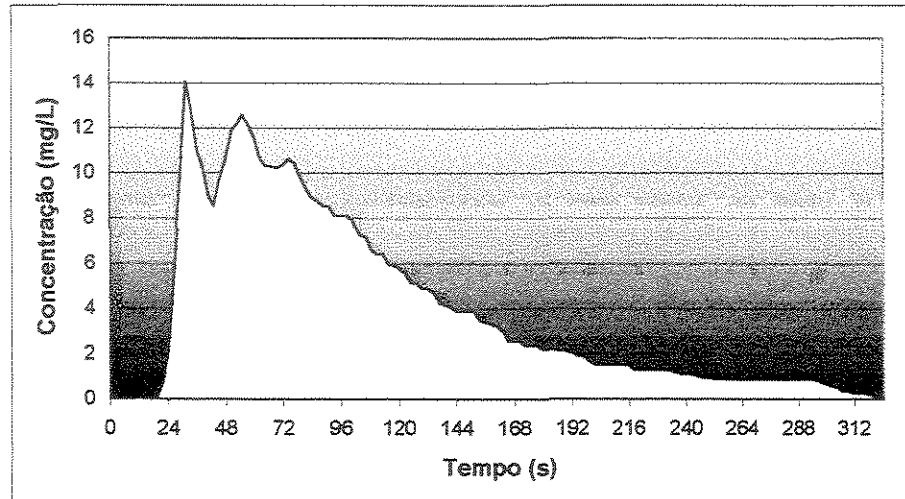


FIGURA 5.1 – Variação da concentração do traçador em função do tempo no Reator I para a vazão de 14,84 L/min.

Para o Reator I, para todas as relações  $t_f/T$  sempre esteve abaixo valor indicado para um “plug-flow” indicando a ocorrência de curto-circuito, fato este que pode ser confirmado pelas outras relações. Estas relações indicaram, também, a presença de volume morto. O Reator I apresentou características tanto de fluxo de mistura completa como de “plug-flow”, porém, considerando o valor ideal para cada fluxo, o reator esteve foi mais próximo de um “plug-flow”.

Segundo os dados, o Reator II apresentados para concentração de 1% (Tabela 5.3), a maioria dos valores da relação  $t_f/T$  está abaixo do valor considerado satisfatório ( $>0,5$ ) pela U.S.EPA (1986), exceto para vazão de 17,62 L/min em que esta relação foi sempre inferior a 0,41, indicando a ocorrência de curto-circuito no interior do reator. Para a concentração de 2%, esta relação esteve mais próxima do valor satisfatório, porém, também indicando ocorrência de curto-circuito. A ocorrência de curto-circuito se confirma quando observada a relação  $t_p/T$ , em que para todos os ensaios, tanto para a concentração de 1% como para a concentração de 2% o valor obtido foi menor de 0,90, com apenas uma exceção. Para a concentração de 1% esses valores estão mais próximos ao recomendado do que para a concentração de 2%, apesar de ambos estarem próximos do recomendado, não comprometendo totalmente a eficiência do reator.



Para a taxa  $t_{90}/t_{10}$  os valores variaram de 1,68 a 2,50 para concentração de 1%, e de 1,67 a 2,69 para concentração de 2%. Pode-se considerar que se referem a reator plug-flow ( $<2,0$ ), considerando a variação de 1,0 para um plug-flow ideal e 21,9 para mistura completa. Porém, esta pequena variação acima de 2,0 em alguns casos, indica a ocorrência de prolongamento ou “cauda” na curva DTR.

Os parâmetros  $\theta/T$  e  $t_{50}/\theta$  estão sempre muito próximos de 1,0 ou dentro da faixa sugerida, indicando que praticamente todo volume do reator é utilizado. Apenas em três ensaios da concentração de 2% para o parâmetro  $t_{50}/\theta$  os valores estiveram abaixo do recomendado.

O número de dispersão,  $d$ , para todas vazões indicou dispersão moderada, segundo a classificação de LEVENSPIEL (1972). Na maioria dos ensaios, os valores estiveram na faixa de 0,02 a 0,05 para concentração de 1%, e entre 0,03 a 0,10, que é considerada normal para um reator tipo plug-flow (U.S.EPA, 1986).

Na Figura 5.2 está apresentada a variação da concentração de NaCl em função do tempo para vazão de 14,84 L/min apenas para a série B da concentração de 1%, onde percebe-se claramente a “cauda” na curva DTR.

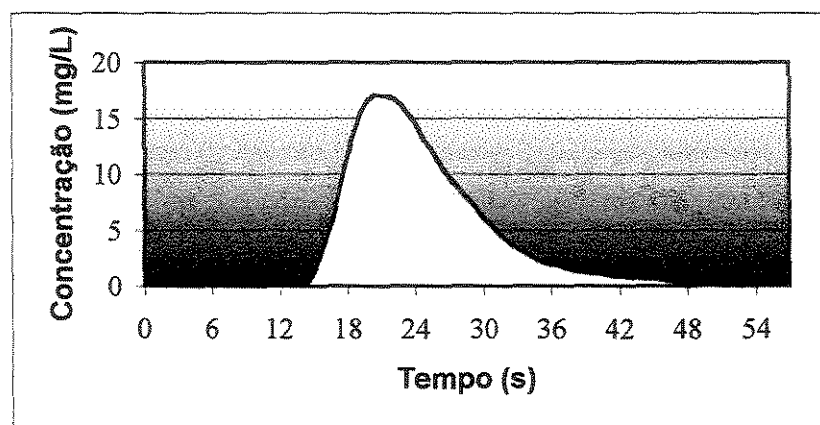


FIGURA 5.2 – Variação da concentração de NaCl em função do tempo para vazão de 14,84 L/min (série B).

A Tabela 5.5 apresenta a comparação dos resultados para as concentrações de 1 e 2%, através da regressão linear dos valores obtidos do tempo de detenção médio,  $\theta$  (s), em função da vazão,  $Q$  (L/min). Foi utilizado o valor médio de  $\theta$  das repetições (A, B e C) para cada vazão. Segundo os resultados e a discussão anterior, nota-se que para a concentração de 1% os valores foram ligeiramente mais próximos do considerado satisfatório, que também está refletido no coeficiente de correlação,  $r$ .

TABELA 5.5 – Comparação dos resultados dos ensaios hidráulicos do Reator II para concentração do traçador em solução de 1 e 2%.

Concentração (%)	Equação (regressão linear)	Coefficiente de Correlação, $r$
1	$\theta = 39,853 - 1,083.Q$	-0,9845
2	$\theta = 34,074 - 0,810.Q$	-0,9620

## 5.2 – Ensaios de Inativação

As análises foram realizadas em seis pontos de coleta distintos. Os resultados estão apresentados separadamente para cada ponto de coleta incluindo a descrição do local e do tipo de tratamento do efluente deste ponto.

Os resultados da inativação, além de serem apresentados nas tabelas, estão apresentados na forma de gráficos da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) e grau de fotorreativação, ambos em função do tempo de exposição. As tabelas ao final de cada ponto de coleta referem-se à análise estatística feita para cada ponto.

### PONTO DE COLETA 1 - Efluente final - ETE Piracicamirim

Este ponto de coleta refere-se ao efluente final da Estação de Tratamento de Esgoto da Bacia do Piracicamirim – SEMAE, Piracicaba-SP. Foram realizados ensaios com 6 tempos de exposição diferentes com uma repetição para cada ensaio. No item de resultados experimentais as amostras serão denominadas de amostra A, para a primeira coleta de cada tempo de exposição, e amostra B, para a segunda coleta ou repetição.

A Tabela 5.6 apresenta a faixa de valores do efluente final da ETE – Piracicaba, da bacia do Piracicamirim, que no caso será o ponto de captação do afluente dos reatores. Os resultados dos ensaios referentes ao Reator I e Reator II estão apresentadas nas Tabelas 5.7 e 5.8, respectivamente. As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os resultados da análise estatística obtidos a partir dos dados experimentais. As Figuras de 5.3 e 5.4 apresentam os resultados da fração de sobrevivência para coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.7 e 5.8. As Figuras 5.5 e 5.6, o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.9 e 5.10.

TABELA 5.6 - Caracterização do efluente no Ponto 1 de coleta.

Parâmetro	Faixa de Valores
Cor – uC	50 a 100
Turbidez – nTU	8 a 15
pH	6 a 8
Sólidos Totais (ST) - mg/l	210 a 250
Sólidos Suspensos Totais (SST) - mg/l	5 a 15
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) - mg/l	3 a 15
DQO - mg/l	10 a 30
DBO - mg/l	5 a 10
Coefficiente de absorvância UV ( $\alpha$ ) - $\text{cm}^{-1}$	0,200 a 0,350
Coliformes Totais - NMP/100ml	$10^5$ a $10^6$
Coliformes Fecais ( <i>E. coli</i> ) - NMP/100ml	$10^5$

## Ponto de Coleta 1 - Reator I

Tabela 5.7 – Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 1.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=99,07$ s		Vazão 2 $\theta=86,95$ s		Vazão 3 $\theta=67,98$ s		Vazão 4 $\theta=55,43$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	60,00	50,00	80,00	70,00	70,00	60,00	80,00	90,00
Turbidez - nTU	13,50	13,60	11,30	11,30	10,60	10,30	7,98	8,35
PH	6,83	6,76	6,95	6,95	6,95	6,94	7,08	7,03
Absorvância (254 nm)	0,1930	0,0880	0,1120	0,0970	0,1370	0,1770	0,1000	0,1240
% Transmitância	64,10	81,67	77,22	79,90	72,88	66,60	79,36	75,09
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,4440	0,2020	0,2580	0,2230	0,3130	0,4070	0,2300	0,2850
DQO - mg/L	28,37	28,37	35,45	35,45	28,92	28,92	26,12	26,12
DBO - mg/L	7,25	7,25	5,89	5,89	5,92	5,92	4,89	4,89
Sólidos Totais - mg/L	242,00	247,00	239,00	225,00	203,00	196,00	203,00	216,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	10,00	11,00	6,00	6,40	10,60	10,80	6,80	9,20
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	8,00	10,50	6,00	6,00	8,80	8,40	6,00	6,80
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,7320	0,0104	0,0005	0,0002	0,0005	0,0011	0,0009	0,0088
Coliformes fecais	0,0046	0,0063	0,0003	0,0001	0,0010	0,0005	0,0215	0,0161
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	0,0000	0,0000	0,1560	0,2110	0,4290	0,5640	0,6590	1,6410
Coliformes fecais	0,0000	0,0000	0,0070	0,0420	0,1770	0,1810	0,0000	0,0000

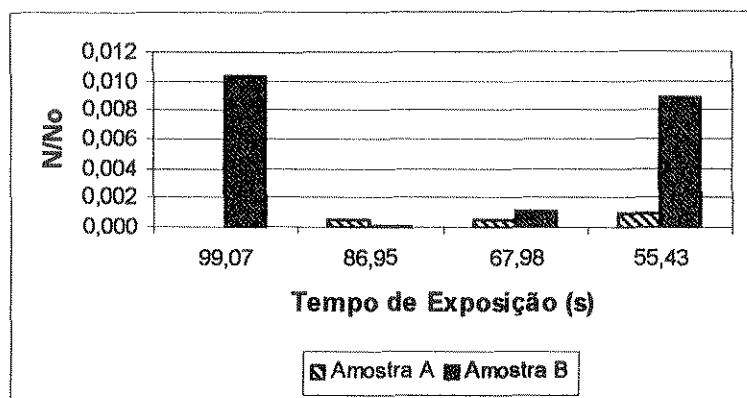


Figura 5.3 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 1 referente ao Reator I.

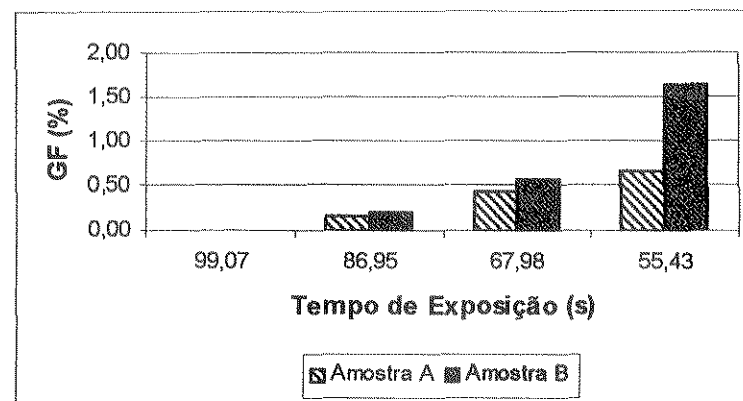


Figura 5.5 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 1 referente ao Reator I.

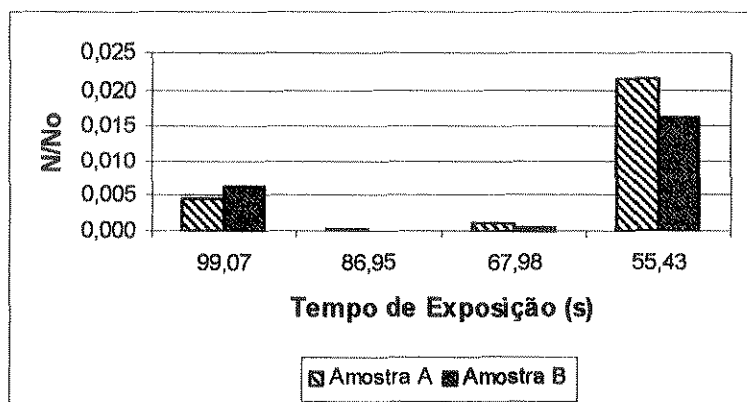


Figura 5.4 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para o ponto de coleta 1 referente ao Reator I.

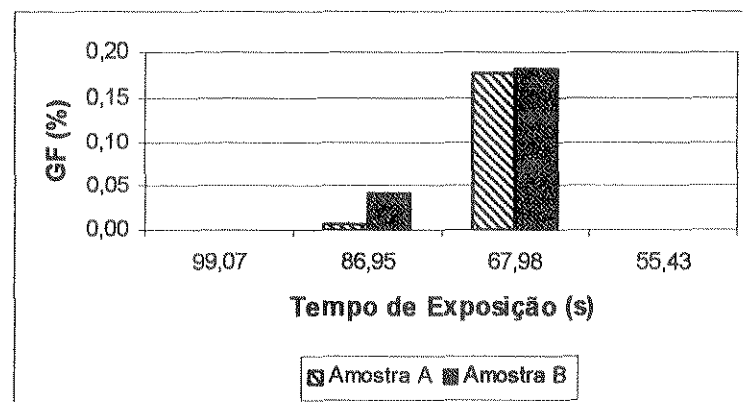


Figura 5.6 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 1 referente ao Reator I.

## Ponto de Coleta 1 - Reator II

Tabela 5.8 – Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 1.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=23,61$ s		Vazão 2 $\theta=20,90$ s		Vazão 3 $\theta=17,11$ s		Vazão 4 $\theta=13,86$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	80,00	70,00	90,00	70,00	90,00	100,00	80,00	80,00
Turbidez - nTU	13,30	13,30	11,00	10,50	12,00	12,20	7,99	9,24
pH	6,72	6,73	6,93	6,96	6,90	6,91	7,04	7,03
Absorvância (254 nm)	0,1030	0,1280	0,0820	0,1230	0,0950	0,0820	0,1440	0,1460
% Transmittância	78,85	74,48	82,76	75,31	80,35	82,79	71,77	71,52
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,2370	0,2970	0,1890	0,2830	0,2180	0,1890	0,3310	0,3360
DQO - mg/L	24,82	24,82	39,18	39,18	29,83	29,83	36,38	36,38
DBO - mg/L	6,00	6,00	5,83	5,83	7,00	7,00	5,68	5,68
Sólidos Totais - mg/L	246,00	242,00	243,00	229,00	188,00	208,00	208,00	208,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	10,50	17,00	9,60	8,40	10,80	11,20	4,00	4,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	10,00	13,50	7,20	7,20	8,80	9,20	4,00	4,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,0105	0,0105	0,0017	0,0012	0,0084	0,0279	0,0452	0,0322
Coliformes fecais	0,0046	0,1090	0,0018	0,0016	0,0055	0,0035	0,0309	0,1020
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	0,0000	0,0000	0,4800	1,0300	1,1700	0,0000	2,5600	1,3100
Coliformes fecais	1,6300	0,0000	0,1200	0,3700	1,5300	0,9200	2,0000	3,2400

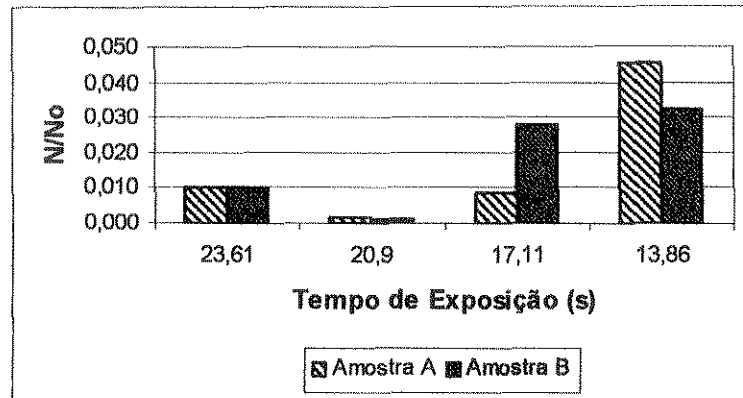


Figura 5.7 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 1 referente ao Reator II.

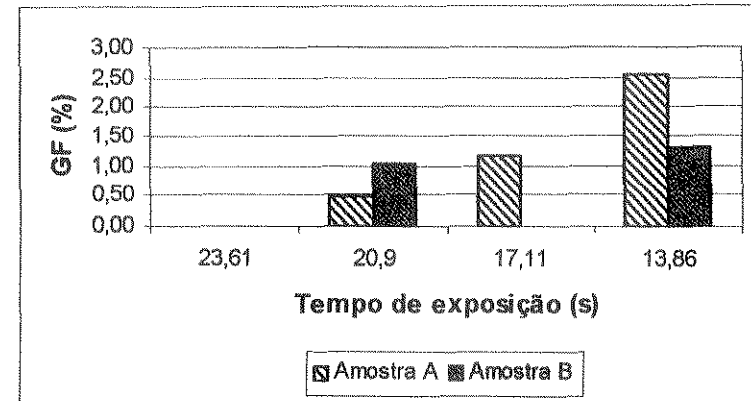


Figura 5.9 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 1 referente ao Reator II.

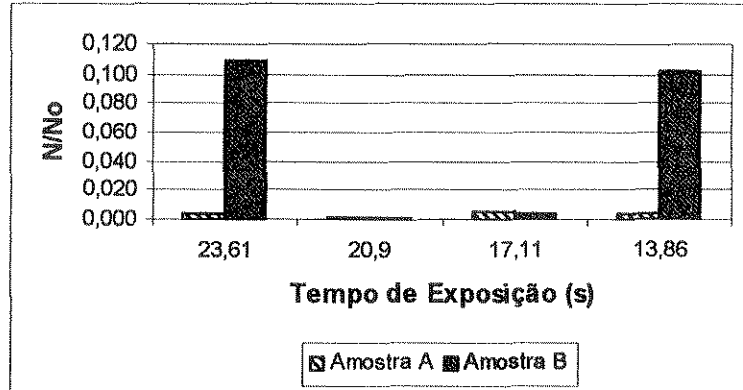


Figura 5.8 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para ponto de coleta 1 referente ao Reator II.

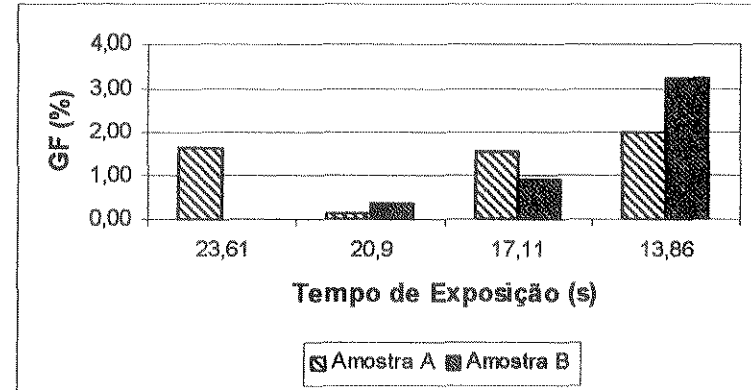


Figura 5.10 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 1 referente ao Reator II.

TABELA 5.9 – Análise de variância da fração de sobrevivência (N/N<sub>0</sub>) de coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 1.

Causas da Variação	Valor de F			
	Coliformes Totais	Coliformes fecais - <i>E.coli</i>	Grau de Fotorreativação Colif. Totais	Grau de Fotorreativação <i>E. coli</i>
Reator	17,7234 **	2,7186	1,9794	19,0950 **
Vazão	10,3370 **	1,7325	6,3861 *	3,5111
Reator X Vazão	5,4030 *	0,7360	0,5418	3,6229

\* e \*\*: indicam valores de F significativos a 5% e 1%, respectivamente.

TABELA 5.10 – Médias por Reator da fração de sobrevivência (N/N<sub>0</sub>) de coliformes totais, coliformes fecais – *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 1.

Vazão	Coliformes Totais		Coliformes Fecais <i>E.coli</i>		Grau de Fotorreativação Coliformes totais		Grau de Fotorreativação <i>E.coli</i>	
	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II
1	0,0089 <sup>aA</sup>	0,0105 <sup>aA</sup>	0,0055 <sup>aA</sup>	0,0568 <sup>aA</sup>	0,0000 <sup>aA</sup>	0,0000 <sup>aA</sup>	0,0000 <sup>aA</sup>	0,8150 <sup>aA</sup>
2	0,0004 <sup>aA</sup>	0,0015 <sup>aA</sup>	0,0002 <sup>aA</sup>	0,0017 <sup>aA</sup>	0,1835 <sup>aA</sup>	0,7550 <sup>aA</sup>	0,0245 <sup>aA</sup>	0,2450 <sup>aA</sup>
3	0,0008 <sup>aA</sup>	0,0182 <sup>bA</sup>	0,0008 <sup>aA</sup>	0,0045 <sup>aA</sup>	0,4965 <sup>aA</sup>	0,5850 <sup>aA</sup>	0,1790 <sup>aA</sup>	1,2250 <sup>aA</sup>
4	0,0090 <sup>aA</sup>	0,0387 <sup>bB</sup>	0,0188 <sup>aA</sup>	0,0665 <sup>aA</sup>	1,1500 <sup>aA</sup>	1,9350 <sup>aA</sup>	0,0000 <sup>aA</sup>	2,6200 <sup>aA</sup>
Média	0,0048 <sup>aA</sup>	0,0172 <sup>bB</sup>	0,0063 <sup>aA</sup>	0,0324 <sup>aA</sup>	0,4575 <sup>aA</sup>	0,8188 <sup>aA</sup>	0,0509 <sup>aA</sup>	1,2263 <sup>aA</sup>

Obs.: valores seguidos por letras minúsculas diferentes na coluna, diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey, e letras maiúsculas, diferem a 1% pelo mesmo teste.



De forma geral, ocorreu a tendência da fração de sobrevivência para coliformes totais e fecais de serem maiores com o aumento da vazão, ou seja, menor tempo de detenção, menor a dose de radiação ultravioleta aplicada, tanto para o Reator I como para o Reator II. Pela Tabela 5.9 pode-se observar que houve diferença significativa apenas para coliformes totais em 5% (pelo teste F) para os fatores reator, vazão e a interação reatorXvazão, sendo para os fatores reator e vazão foi significativo em 1%.

A média obtida para os reatores indicou que o Reator I foi mais eficiente na remoção de coliformes totais e coliformes fecais, porém, apenas para os coliformes totais houve diferença significativa em 5% e em 1%. Porém, a eficiência de remoção de coliformes totais e fecais foi maior na vazão 2 tanto para Reator I como Reator II. Observando os resultados obtidos nas Tabelas 5.7 e 5.8, os valores sólidos totais, sólidos suspensos totais e voláteis são menores para a vazão 2, e a transmitância maior para as amostras A e B, indicando que a qualidade do efluente interfere na eficiência de desinfecção.

Nas Figuras 5.5, 5.6, 5.9 e 5.10 observa-se o aumento do grau de fotorreativação com a diminuição da dose de ultravioleta. O grau de fotorreativação foi maior no Reator II tanto para coliformes totais como fecais, porém, houve diferença significativa em 5% e em 1% apenas para os coliformes fecais (Tabela 5.9) no fator reator e o grau de fotorreativação dos coliformes totais ocorreu diferença significativa em 5% para o fator vazão. Apesar da Figura 5.5 e 5.6 apresentar nítida aumento do grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais do Reator I, esta diferença não foi significativa, segundo a análise estatística.

Tomando-se como base as vazões de 1 a 4 nos reatores I e II (Tabela 5.10), obteve-se valores médios de coliformes totais sempre menores para o Reator I, indicando maior eficiência deste reator, sendo que houve diferença significativa em 5% apenas para as vazões 3 e 4, em 1% para a vazão 4. Para os parâmetros coliformes fecais e grau de fotorreativação total e fecal não ocorreu diferenças significativas, ou seja, para cada vazão os reatores I e II não apresentam diferenças de eficiência quanto a vazão aplicada.

## PONTO DE COLETA 2 - Efluente UASB - ETE Piracicamirim

As atividades desenvolvidas durante o período seguiram com testes realizados no Ponto 2 de coleta, sendo este o efluente de um reator anaeróbio (UASB) da Estação de Tratamento de Esgoto de Piracicamirim, em Piracicaba/SP. As características do efluente do reator anaeróbio estão apresentadas na Tabela 5.11. Os resultados dos ensaios referentes ao Reator I e Reator II estão apresentadas nas Tabelas 5.12 e 5.13, respectivamente. As Tabelas 5.14 e 5.15 apresentam os resultados da análise estatística obtidos a partir dos dados experimentais. As Figuras de 5.11 e 5.12 apresentam os resultados da fração de sobrevivência para coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.15 e 5.16. As Figuras 5.13 e 5.14, o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.17 e 5.18.

TABELA 5.11 – Características do efluente do reator anaeróbio (UASB) da ETE de Piracicamirim, em Piracicaba/SP.

Parâmetro	Faixa de Valores
Cor – uC	108 a 181
Turbidez – nTU	60 a 100
pH	≈ 7,0
Sólidos Totais (ST) - mg/l	410 a 430
Sólidos Suspensos Totais (SST) - mg/l	80 a 120
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) - mg/l	50 a 85
DQO - mg/l	≈ 230,0
DBO - mg/l	≈ 80,0
Coefficiente de absorvância UV ( $\alpha$ ) - $\text{cm}^{-1}$	0,200 a 0,350
Coliformes Totais - NMP/100ml	$10^6$ a $10^7$
Coliformes Fecais ( <i>E. coli</i> ) - NMP/100ml	$10^5$

## Ponto de Coleta 2 - Reator I

Tabela 5.12 – Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 2.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=99,07$ s		Vazão 2 $\theta=86,95$ s		Vazão 3 $\theta=67,98$ s		Vazão 4 $\theta=55,43$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	105,00	107,00	104,00	114,00	104,00	105,00	127,00	104,00
Turbidez - nTU	161,00	163,00	128,00	134,00	139,00	146,00	172,00	168,00
pH	6,78	6,79	6,72	6,67	6,75	6,84	6,71	6,62
Absorvância (254 nm)	0,1760	0,1440	0,1350	0,1290	0,1240	0,1280	0,1390	0,1080
% Transmitância	66,62	71,73	73,77	74,39	75,21	74,42	72,63	78,00
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,4000	0,3300	0,3100	0,3000	0,2800	0,2900	0,3200	0,2500
DQO - mg/L	186,75	214,52	212,10	231,80	239,60	237,20	224,23	345,27
DBO - mg/L	81,00	80,00	82,00	85,00	86,00	84,00	83,00	82,00
Sólidos Totais - mg/L	379,00	380,00	397,00	392,00	438,00	419,00	398,00	373,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	61,00	77,00	88,00	94,00	118,00	114,00	58,00	73,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	47,00	51,00	62,00	66,00	84,00	82,00	45,00	58,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,0100	0,0103	0,0719	0,1160	0,3630	0,1630	0,0322	0,0406
Coliformes fecais	0,0265	0,0227	0,0218	0,0312	0,0165	0,0365	0,0317	0,0686
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	2,8600	1,2200	13,1400	33,2500	3,5000	21,5100	2,5700	3,2700
Coliformes fecais	2,9000	1,5600	3,2900	3,7700	1,8400	2,6300	5,5000	0,0000

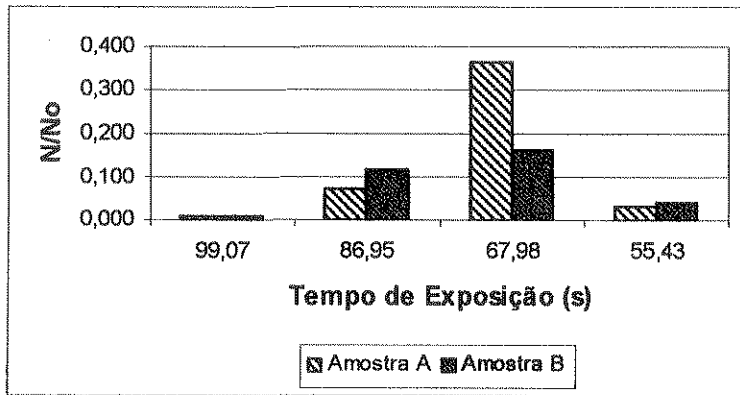


Figura 5.11 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 2 referente ao Reator I.

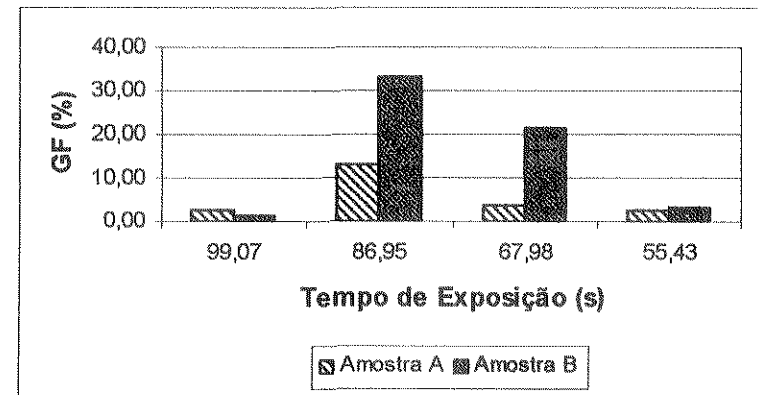


Figura 5.13 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 2 referente ao Reator I.

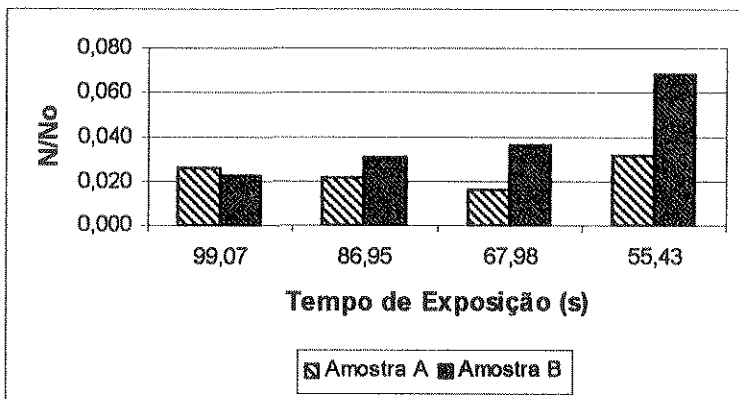


Figura 5.12 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para ponto de coleta 2 referente ao Reator I.

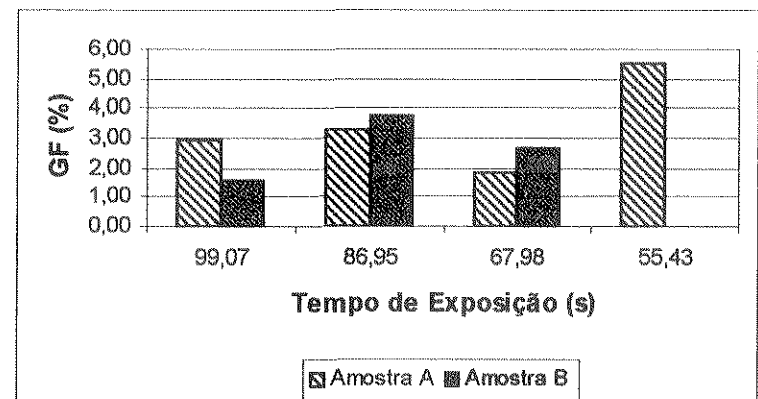


Figura 5.14 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 2 referente ao Reator I.

## Ponto de Coleta 2 - Reator II

Tabela 5.13 – Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 2.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=23,61$ s		Vazão 2 $\theta=20,90$ s		Vazão 3 $\theta=17,11$ s		Vazão 4 $\theta=13,86$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	166,00	131,00	168,00	181,00	157,00	157,00	108,00	159,00
Turbidez - nTU	91,00	116,00	91,00	97,20	68,40	70,40	61,10	86,40
pH	7,12	6,97	6,95	7,10	7,03	7,01	7,07	6,97
Absorvância (254 nm)	0,1420	0,2110	0,2110	0,2210	0,1610	0,2280	0,0890	0,1840
% Transmitância	72,18	61,57	61,57	60,06	69,04	59,14	81,46	65,46
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,3300	0,4800	0,4800	0,5100	0,3700	0,5200	0,2100	0,4200
DQO - mg/L	250,00	268,90	229,50	229,30	227,90	220,60	215,80	233,60
DBO - mg/L	84,00	81,00	85,00	85,00	85,00	82,00	86,00	86,00
Sólidos Totais - mg/L	432,00	430,00	436,00	430,00	432,00	428,00	414,00	410,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	106,00	133,00	116,00	116,00	94,00	90,00	88,00	86,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	73,00	85,00	74,00	80,00	68,00	52,00	64,00	54,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,0486	0,0716	0,0700	0,0375	0,0555	0,0463	0,0459	0,0566
Coliformes fecais	0,0322	0,0839	0,1000	0,0160	0,0484	0,0500	0,0322	0,0084
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	2,8200	2,3100	3,1300	3,5400	0,6100	0,0000	1,0400	0,0000
Coliformes fecais	10,8300	3,8700	3,9400	3,2700	0,0000	0,0000	1,6700	0,0000

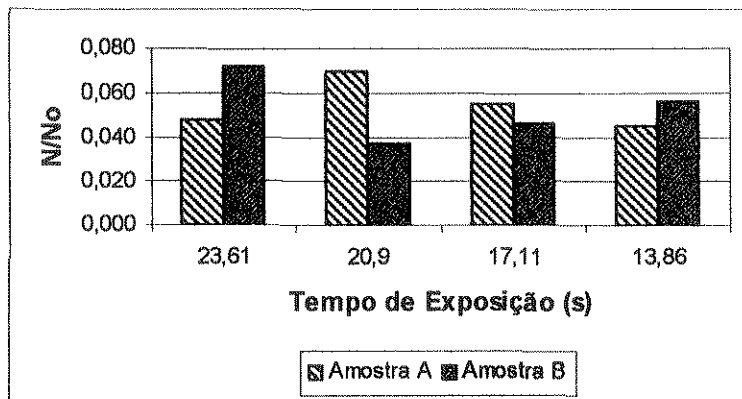


Figura 5.15 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 2 referente ao Reator II.

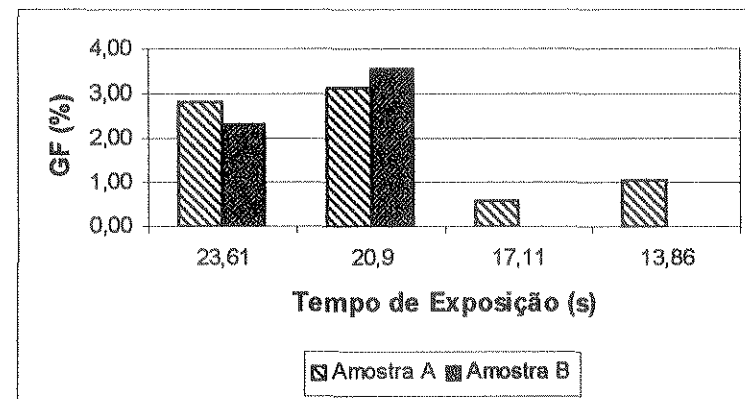


Figura 5.17 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 2 referente ao Reator II.

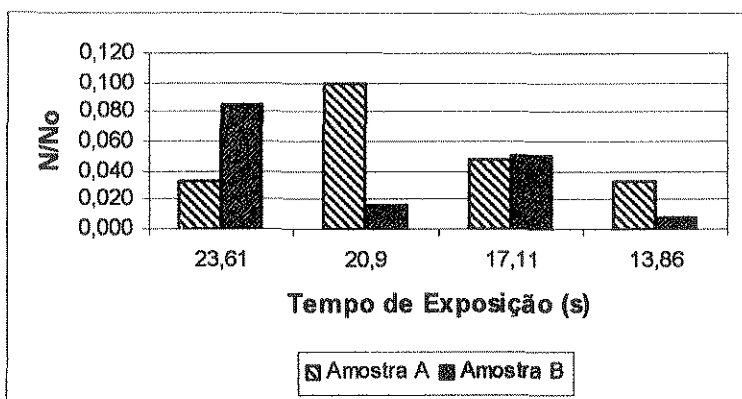


Figura 5.16 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para o ponto de coleta 2 referente ao Reator II.

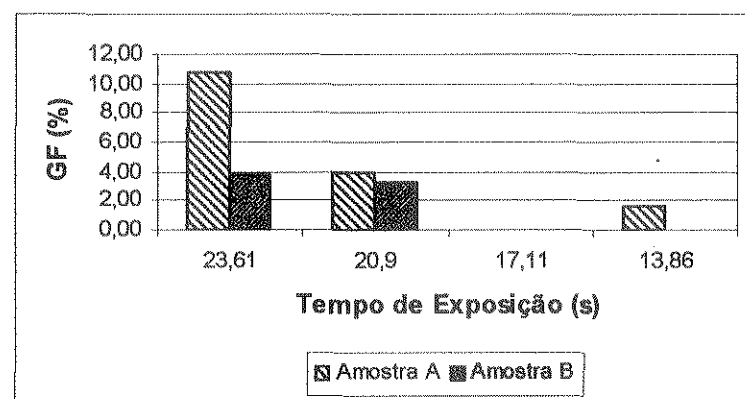


Figura 5.18 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 2 referente ao Reator II.

TABELA 5.14 – Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 2.

Causas da Variação	Valor de F			
	Coliformes Totais	Coliformes fecais - <i>E.coli</i>	Grau de Fotorreativação Colif. Totais	Grau de Fotorreativação <i>E. coli</i>
Reator	3,2106	2,5594	6,2771 *	0,0516
Vazão	4,5079 *	0,2243	2,4684	2,1172
Reator X Vazão	4,9350 *	0,1519	1,8998	2,1824

\* e \*\*: indicam valores de F significativos a 5% e 1%, respectivamente.

TABELA 5.15 – Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 2.

Vazão	Coliformes Totais		Coliformes Fecais <i>E.coli</i>		Grau de Fotorreativação Coliformes totais		Grau de Fotorreativação <i>E. coli</i>	
	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II
1	0,0102 <sup>aA</sup>	0,0601 <sup>aA</sup>	0,0246 <sup>aA</sup>	0,0581 <sup>aA</sup>	2,0400 <sup>aA</sup>	2,5650 <sup>aA</sup>	2,2300 <sup>aA</sup>	7,3500 <sup>aA</sup>
2	0,0939 <sup>aA</sup>	0,0538 <sup>aA</sup>	0,0265 <sup>aA</sup>	0,0581 <sup>aA</sup>	23,195 <sup>aA</sup>	3,3350 <sup>aA</sup>	3,5300 <sup>aA</sup>	3,6050 <sup>aA</sup>
3	0,2630 <sup>aA</sup>	0,0510 <sup>bB</sup>	0,0265 <sup>aA</sup>	0,0492 <sup>aA</sup>	12,505 <sup>aA</sup>	0,3050 <sup>aA</sup>	2,2350 <sup>aA</sup>	0,0000 <sup>aA</sup>
4	0,0364 <sup>aA</sup>	0,0513 <sup>aA</sup>	0,0502 <sup>aA</sup>	0,0581 <sup>aA</sup>	2,9200 <sup>aA</sup>	0,5200 <sup>aA</sup>	2,7500 <sup>aA</sup>	0,8350 <sup>aA</sup>
Média	0,1001 <sup>aA</sup>	0,0540 <sup>aA</sup>	0,0314 <sup>aA</sup>	0,0558 <sup>aA</sup>	10,165 <sup>aA</sup>	1,6813 <sup>bA</sup>	2,6863 <sup>aA</sup>	2,9475 <sup>aA</sup>

Obs.: valores seguidos por letras minúsculas diferentes na coluna, diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey, e letras maiúsculas, diferem a 1% pelo mesmo teste.

Para este ponto de coleta não houve relação entre vazão, eficiência de remoção de coliformes totais e fecais, e grau de fotorreativação. Para fração de sobrevivência de coliformes fecais da amostra B do Reator I ocorreu a perda da eficiência na inativação com a diminuição do tempo de exposição, o mesmo ocorrendo para os coliformes totais do mesmo reator, porém esta relação é válida até a vazão 3 (Figuras 5.11 e 5.12). Não houve diferenças significativas para os coliformes totais e fecais no fator reator, ou seja, a eficiência é similar dos reatores (Tabela 5.14). Porém, para os fatores vazão e reator $\times$ vazão houve diferença significativa apenas para o parâmetro coliformes totais, indicando que a vazão exerceu influência na eficiência dos reatores.

Para o grau de fotorreativação de coliformes totais ocorreu diferença significativa em 5% apenas para o fator reator, sendo no Reator I onde obtiveram-se os maiores valores deste parâmetro, que pode ser observado, principalmente na vazão 2 e 3, e pela média (Tabela 5.15). Para o grau de fotorreativação de coliformes fecais não ocorreu diferença significativa em 5% em nenhum dos fatores.

Comparando-se os resultados dos reatores em função dos coliformes totais, o Reator I foi mais eficiente que o Reator II nas vazões 1 e 4, e o Reator II foi mais eficiente nas vazões 2 e 3. Porém, apenas para a vazão 3 ocorreu diferença significativa em 5% e em 1%.

Para o Reator I, obtiveram-se valores mais baixos da fração de sobrevivência de coliformes totais para a vazão 1, sendo esta a mais eficiente, e a vazão 3 como a menos eficiente. Para o Reator II, a vazão 3 foi a mais eficiente, e a vazão 1 a menos. Esta inversão de eficiência de resultados esperados, pode ser explicada pela média de valores sólidos suspensos voláteis que foi menor para a vazão 3.

Para o Reator I o valor médio de sólidos totais esteve próximo de 400 mg/L, sólidos suspensos totais foi próximo de 85,0 mg/L, a cor esteve sempre acima de 100,0 uC e turbidez acima de 130,0 nTU. Para o Reator II estes valores estiveram próximos aos observados para o Reator I. Importante notar que os valores de transmitância quase sempre estiveram abaixo de 75%, considerado como mínimo para o uso da radiação ultravioleta (USEPA, 1986).



De forma geral, pode-se observar que os valores de fração de sobrevivência tanto de coliformes totais como de fecais, e o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais não obedecem a nenhum padrão de resultados esperado como, por exemplo, a diminuição da eficiência com o aumento da vazão, que pode ser chamado de inversão de resultados esperados. A qualidade do efluente do Ponto 2 de coleta é muito inferior se comparado com o Ponto 1, apesar de que no Ponto 1 tenha ocorrido algumas inversões, a queda na qualidade no Ponto 2 sugere que seja a explicação para a inversão dos resultados.

### PONTO DE COLETA 3 - Efluente final - ETE CECAP

O Ponto 3 de coleta está situado na Estação de Tratamento de Esgoto da CECAP, em Piracicaba. O sistema de tratamento é formado por três lagoas em série, sendo uma anaeróbia (que recebe o esgoto bruto) e duas facultativas. O sistema foi instalado à jusante da terceira lagoa (facultativa). As características do efluente da lagoa estão apresentadas na Tabela 5.16. Os resultados dos ensaios referentes ao Reator I e Reator II estão apresentadas nas Tabelas 5.17 e 5.18, respectivamente. As Tabelas 5.19 e 5.20 apresentam os resultados da análise estatística obtidos a partir dos dados experimentais. As Figuras de 5.19 e 5.20 apresentam os resultados da fração de sobrevivência para coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.23 e 5.24. As Figuras 5.21 e 5.22, o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.25 e 5.26.

TABELA 5.16 - Características do efluente da segunda lagoa facultativa da ETE CECAP, em Piracicaba/SP.

Parâmetro	Faixa de Valores
Cor – uC	100 a 190
Turbidez – nTU	18 a 30
pH	≈ 7,0
Sólidos Totais (ST) - mg/l	≈ 450
Sólidos Suspensos Totais (SST) - mg/l	50 a 70
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) - mg/l	5 a 20
DQO - mg/l	≈ 150,0
DBO - mg/l	20 a 50
Coefficiente de absorvância UV ( $\alpha$ ) - $\text{cm}^{-1}$	0,200 a 0,300
Coliformes Totais - NMP/100ml	$10^5$ a $10^6$
Coliformes Fecais ( <i>E.coli</i> )- NMP/100ml	$10^4$

### Ponto de Coleta 3 - Reator I

Tabela 5.17 – Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 3.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=99,07$ s		Vazão 2 $\theta=86,95$ s		Vazão 3 $\theta=67,98$ s		Vazão 4 $\theta=55,43$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	105,00	130,00	119,00	110,00	106,00	112,00	126,00	144,00
Turbidez - nTU	27,40	26,30	27,40	27,80	30,10	34,60	17,10	16,70
pH	7,42	7,32	7,19	7,37	7,43	7,83	7,80	7,83
Absorvância (254 nm)	0,1700	0,2060	0,1420	0,1790	0,1040	0,1240	0,1120	0,1420
% Transmittância	67,42	62,63	72,16	66,20	78,78	75,24	77,26	72,11
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,3910	0,4740	0,3270	0,4120	0,2390	0,2850	0,2570	0,3270
DQO - mg/L	149,66	176,76	211,26	184,15	154,58	157,05	149,66	149,66
DBO - mg/L	45,00	46,00	50,00	46,0	20,00	21,00	20,00	23,00
Sólidos Totais - mg/L	470,00	470,00	450,00	445,00	475,00	480,00	390,00	380,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	85,00	75,00	85,00	75,00	65,00	80,00	35,00	25,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	10,00	15,00	15,00	15,00	10,00	25,00	10,00	10,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,110	0,012	0,019	0,023	0,058	0,031	0,042	0,033
Coliformes fecais	0,013	0,025	0,026	0,017	0,091	0,031	0,100	0,011
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	0,000	1,620	4,630	9,130	7,950	9,300	19,880	24,820
Coliformes fecais	2,460	4,450	4,360	6,610	6,160	5,940	11,110	10,380

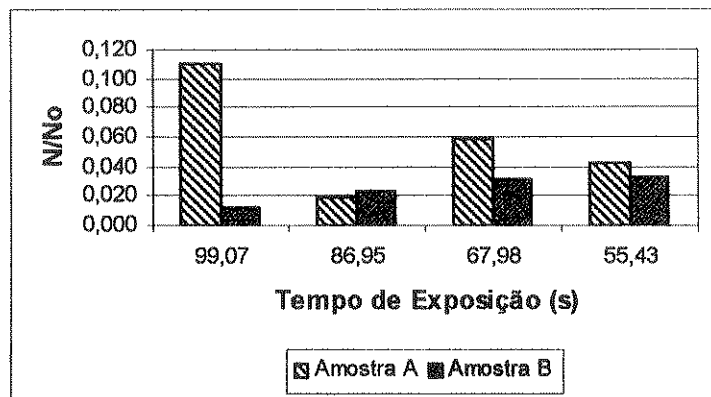


Figura 5.19 – Fração de sobrevivência (N/N<sub>0</sub>) de coliformes totais para o ponto de coleta 3 referente ao Reator I.

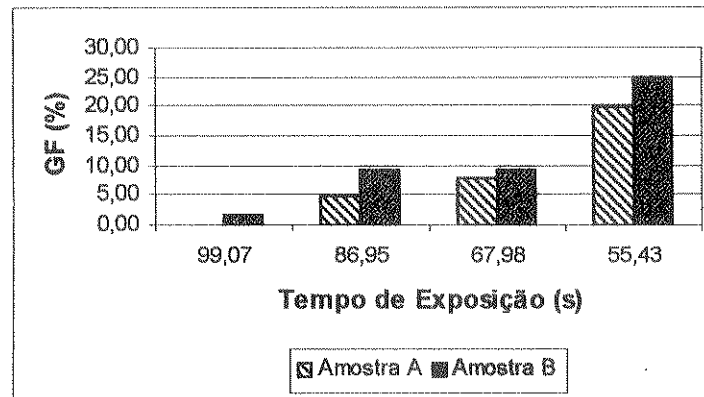


Figura 5.21 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 3 referente ao Reator I.

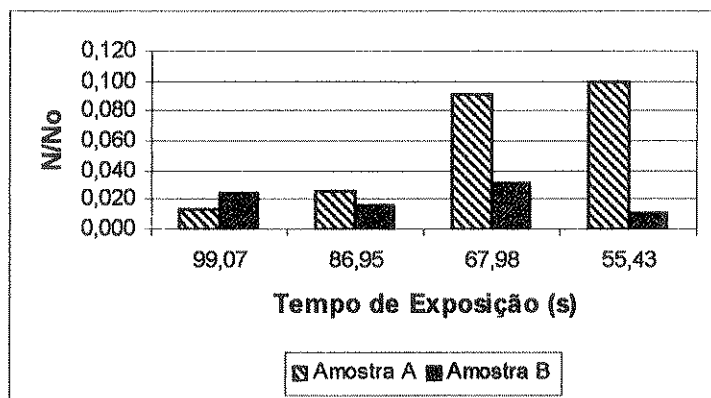


Figura 5.20 – Fração de sobrevivência (N/N<sub>0</sub>) de coliformes fecais para o ponto de coleta 3 referente ao Reator I.

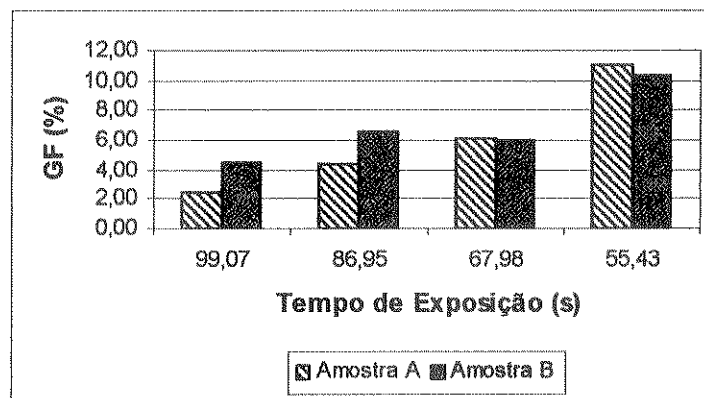


Figura 5.22 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 3 do referente ao Reator I.

## Ponto de Coleta 3 - Reator II

Tabela 5.18 – Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 3.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=23,61$ s		Vazão 2 $\theta=20,90$ s		Vazão 3 $\theta=17,11$ s		Vazão 4 $\theta=13,86$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
	Cor - uC	112,00	117,00	191,00	144,00	134,00	102,00	131,00
Turbidez - nTU	34,10	32,90	32,60	32,10	30,30	27,90	18,10	17,80
pH	7,36	7,27	7,24	7,32	7,76	7,76	7,83	7,84
Absorvância (254 nm)	0,1160	0,0920	0,1370	0,1310	0,1160	0,1180	0,1610	0,1470
% Transmitância	76,56	80,91	72,95	73,96	76,57	76,15	69,03	71,33
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,2670	0,2120	0,3150	0,3010	0,2670	0,2710	370,00	0,3380
DQO - mg/L	181,69	179,22	164,44	159,51	147,20	164,44	147,19	144,73
DBO - mg/L	29,00	32,00	32,00	34,00	21,00	23,00	20,00	23,00
Sólidos Totais - mg/L	440,00	440,00	450,00	450,00	475,00	470,00	400,00	390,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	55,00	60,00	50,00	60,00	70,00	65,00	35,00	30,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	10,00	10,00	5,00	5,00	20,00	15,00	10,00	5,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,990	0,890	0,940	0,440	0,177	0,040	0,141	0,050
Coliformes fecais	0,055	0,114	0,082	0,131	0,076	0,028	0,410	0,030
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	0,000	0,000	92,750	32,660	15,140	16,240	29,490	5,290
Coliformes fecais	8,440	14,320	44,640	7,450	11,240	8,840	37,290	0,840

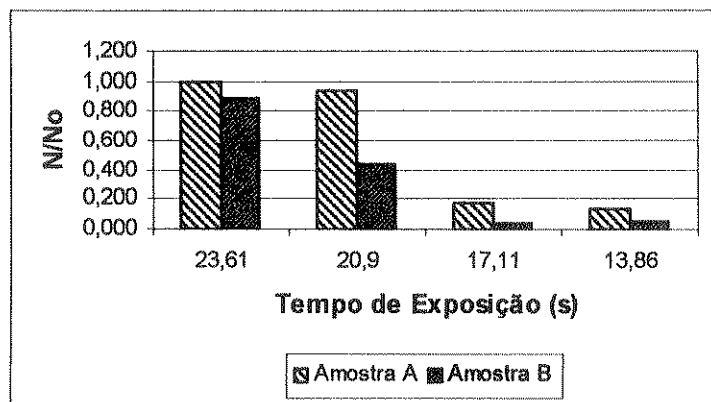


Figura 5.23 – Fração de sobrevivência (N/N<sub>0</sub>) de coliformes totais para o ponto de coleta 3 referente ao Reator II.

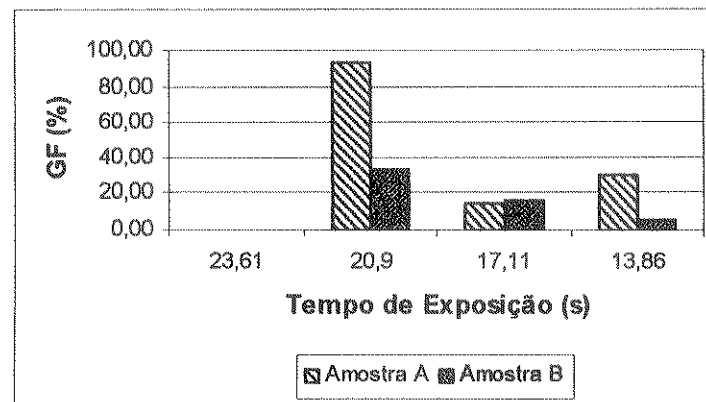


Figura 5.25 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 3 referente ao Reator II.

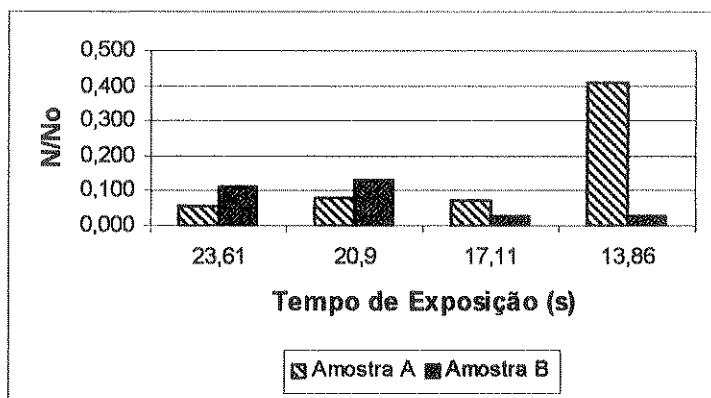


Figura 5.24 – Fração de sobrevivência (N/N<sub>0</sub>) de coliformes fecais para o ponto de coleta 3 referente ao Reator II.

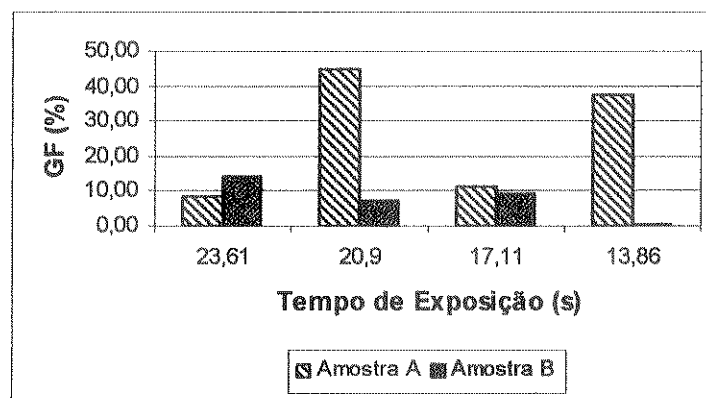


Figura 5.26 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 3 referente ao Reator II.

TABELA 5.19 – Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 3.

Causas da Variação	Valor de F			
	Coliformes Totais	Coliformes fecais - <i>E.coli</i>	Grau de Fotorreativação Colif. Totais	Grau de Fotorreativação <i>E. coli</i>
Reator	37,5120 **	2,2864	3,0731	2,4105
Vazão	9,8749 **	0,06410	3,1321	0,4510
Reator X Vazão	9,5080 **	0,4969	2,9838	0,2986

\* e \*\*: indicam valores de F significativos a 5% e 1%, respectivamente.

TABELA 5.20 – Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais – *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 3.

Vazão	Coliformes Totais		Coliformes Fecais <i>E.coli</i>		Grau de Fotorreativação Coliformes totais		Grau de Fotorreativação <i>E.coli</i>	
	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II
1	0,0610 <sup>aA</sup>	0,9400 <sup>bB</sup>	0,0190 <sup>aA</sup>	0,0845 <sup>aA</sup>	0,8100 <sup>aA</sup>	0,0000 <sup>aA</sup>	3,4550 <sup>aA</sup>	11,380 <sup>aA</sup>
2	0,0210 <sup>aA</sup>	0,6900 <sup>bB</sup>	0,0215 <sup>aA</sup>	0,1065 <sup>aA</sup>	6,8800 <sup>aA</sup>	62,705 <sup>aA</sup>	5,4850 <sup>aA</sup>	26,045 <sup>aA</sup>
3	0,0443 <sup>aA</sup>	0,1085 <sup>aA</sup>	0,0610 <sup>aA</sup>	0,0520 <sup>aA</sup>	8,6250 <sup>aA</sup>	15,690 <sup>aA</sup>	6,0500 <sup>aA</sup>	10,040 <sup>aA</sup>
4	0,0375 <sup>aA</sup>	0,0955 <sup>aA</sup>	0,0555 <sup>aA</sup>	0,2202 <sup>aA</sup>	22,350 <sup>aA</sup>	17,390 <sup>aA</sup>	10,745 <sup>aA</sup>	19,065 <sup>aA</sup>
Média	0,0410 <sup>aA</sup>	0,4585 <sup>bB</sup>	0,0393 <sup>aA</sup>	0,1158 <sup>aA</sup>	9,6663 <sup>aA</sup>	23,946 <sup>aA</sup>	6,4338 <sup>aA</sup>	16,633 <sup>aA</sup>

Obs.: valores seguidos por letras minúsculas diferentes na coluna, diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey, e letras maiúsculas, diferem a 1% pelo mesmo teste.

Neste ponto a eficiência de remoção para coliformes totais foi maior para a vazão 1 (amostra B), para coliformes fecais foi maior também na vazão 4 (amostra B) ambos para o Reator I. A eficiência de remoção de coliformes para vazão 4 esteve próxima da obtida para vazão 1, tal fato pode ter sido originado pela baixa concentração de sólidos suspensos totais e turbidez. Para o Reator I, com aumento da vazão ocorreu o aumento do grau de fotorreativação para os coliformes totais e fecais, apesar de ambos os casos não serem significativos. Ocorreram diferenças significativas em 5% e 1% apenas para os coliformes totais nos fatores reator, vazão e reatorXvazão (Tabela 5.19), isto é, houve diferenças entre os reatores e entre as vazões quanto a eficiência na apenas inativação de coliformes totais. Para os outros parâmetros estas diferenças não foram significativas.

Novamente, para o Reator II não houve relação entre vazão, eficiência de remoção e grau de fotorreativação, na realidade ocorreu a inversão completa dos resultados de coliformes totais, ou seja, a vazão que deveria ser a mais eficiente foi a de menor eficiência. Pela Figura 5.23, fica muito evidente que com a diminuição da dose (tempo de exposição) a fração de sobrevivência diminuir, quando o esperado seria aumentar. Aparentemente, não há explicação para o fato, exceção feita para a vazão 4 em que a concentração de sólidos suspensos totais é mais baixa. Os resultados de coliformes fecais e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais que estão representados nas Figuras 5.24, 5.25 e 5.26 demonstra claramente a ausência de coerência nos resultados para estes parâmetros

As médias obtidas das vazões para cada reator, indica que o Reator I foi mais eficiente com diferença significativa em 5% e em 1% para os coliformes totais. As médias obtidas para cada vazão, individualmente, indicaram que o Reator I foi o mais eficiente nas quatro vazões com diferença significativa em 5% e em 1% para as vazões 1 e 2 (Tabela 5.20).

Ao analisar a vazão mais eficiente para cada reator no parâmetro coliformes totais, revelou que a vazão 1 em se esperava que fosse a mais eficiente, foi a que obteve as maiores médias de valores da fração de sobrevivência, sendo que a vazão 2 foi a mais eficiente para o Reator I. Aparentemente, isto pode ser explicado pelo valor de transmitância na vazão 1 ser menor do que nas outras vazões, com valor abaixo de 75%. O fato da vazão 4 ser a segunda mais



eficiente pode ser explicado pelos sólidos suspensos totais terem sido muito menores do que nas outras vazões.

Porém, o grau de fotorreativação de coliformes totais para o Reator I a ordem foi crescente em função da vazão, de acordo com que se esperava; para o Reator II na vazão 2 que ocorreu o maior grau de fotorreativação, depois seguiu a ordem crescente que normalmente se esperava. Já para o grau de fotorreativação de coliformes fecais não houve alteração na ordem crescente dos valores, ou seja, a vazão 1 foi a que obteve a menor média e a vazão 4 que se obteve a maior média, como esperado. Lembrando que não ocorreu diferença significativa para os coliformes totais e fecais em nenhum dos fatores.

#### PONTO DE COLETA 4 - Efluente Final - ETE Carioba

A estação de tratamento, que está localizada em Americana/SP, é composta principalmente por dois Filtros Biológicos, em paralelo, com decantadores secundários. Foi utilizado o efluente final para o sistema de desinfecção. As características do efluente dos decantadores estão apresentadas na Tabela 5.21. Os resultados dos ensaios referentes ao Reator I e Reator II estão apresentadas nas Tabelas 5.22 e 5.23, respectivamente. As Tabelas 5.24 e 5.25 apresentam os resultados da análise estatística obtidos a partir dos dados experimentais. As Figuras de 5.27 e 5.28 apresentam os resultados da fração de sobrevivência para coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.31 e 5.32. As Figuras 5.29 e 5.30, o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.33 e 5.34.

TABELA 5.21 - Características do efluente final da ETE Carioba, em Americana/SP.

Parâmetro	Faixa de Valores
Cor – uC	500 a 900
Turbidez – nTU	150 a 190
pH	≈ 7,0
Sólidos Totais (ST) - mg/l	≈ 900
Sólidos Suspensos Totais (SST) - mg/l	100 a 150
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) - mg/l	25
DQO - mg/l	550 a 580
DBO - mg/l	160 a 190
Coefficiente de absorvância UV ( $\alpha$ ) - $\text{cm}^{-1}$	0,400 a 0,600
Coliformes Totais - NMP/100ml	$10^7$ a $10^9$
Coliformes Fecais ( <i>E. coli</i> )- NMP/100ml	$10^6$ a $10^8$

## Ponto de Coleta 4 - Reator I

Tabela 5.22 – Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 4.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=99,07$ s		Vazão 2 $\theta=86,95$ s		Vazão 3 $\theta=67,98$ s		Vazão 4 $\theta=55,43$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
	Cor - uC	640,00	620,00	900,00	890,00	700,00	700,00	1320,00
Turbidez - nTU	164,00	157,00	165,00	165,00	152,00	152,00	184,00	183,00
pH	7,02	7,02	7,14	7,17	7,01	7,05	7,05	7,07
Absorvância (254 nm)	0,5130	0,4480	0,5100	0,4670	0,4330	0,4770	0,6440	0,5690
% Transmitância	30,69	35,64	30,93	34,14	36,86	33,38	22,70	26,98
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	1,1800	1,0300	1,1730	1,0740	0,9960	1,0970	1,4810	1,3090
DQO - mg/L	536,51	524,19	583,33	556,23	519,26	511,87	536,51	543,90
DBO - mg/L	175,00	177,00	178,00	180,00	171,00	172,00	178,00	182,00
Sólidos Totais - mg/L	1455,00	945,00	860,00	865,00	910,00	910,00	935,00	845,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	105,00	105,00	90,00	85,00	115,00	115,00	120,00	130,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	25,00	25,00	20,00	20,00	30,00	25,00	20,00	25,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,228	0,245	0,216	0,277	0,265	0,252	0,238	0,398
Coliformes fecais	0,137	0,152	0,289	0,344	0,027	0,026	0,325	0,234
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	3,540	58,080	9,200	62,450	12,300	11,510	10,410	9,680
Coliformes fecais	1,670	56,340	44,420	20,520	20,090	9,190	0,000	62,070

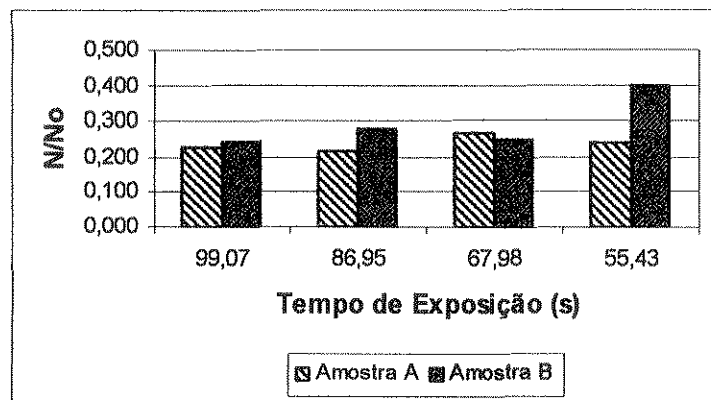


Figura 5.27 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 4 referente ao Reator I.

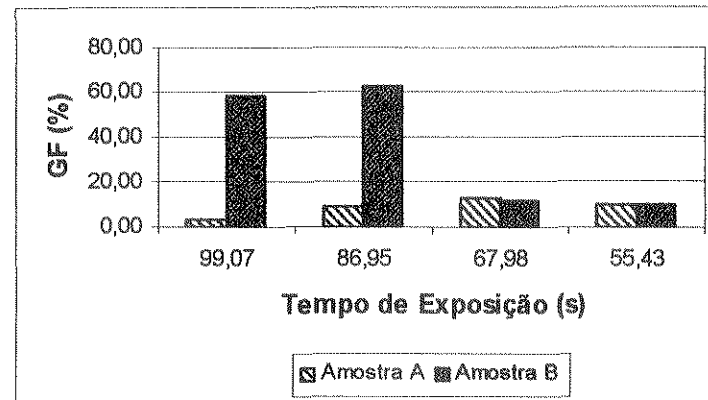


Figura 5.29 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 4 referente ao Reator I.

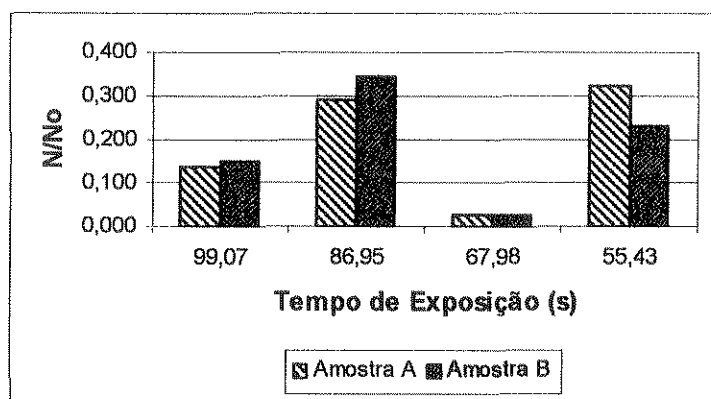


Figura 5.28 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para o ponto de coleta 4 referente ao Reator I.

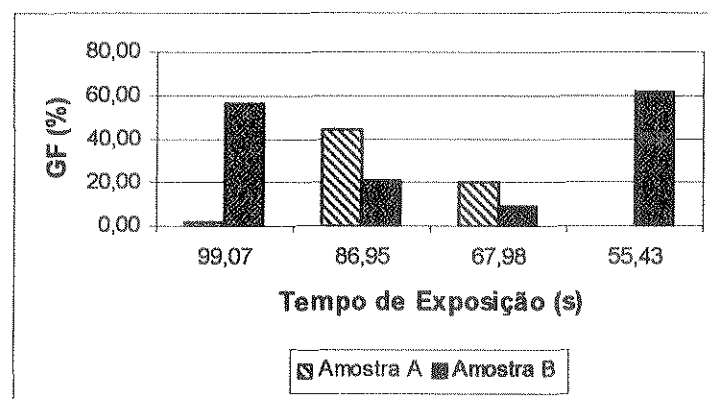


Figura 5.30 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 4 referente ao Reator I.

## Ponto de Coleta 4 - Reator II

Tabela 5.23 – Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 4.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=23,61$ s		Vazão 2 $\theta=20,90$ s		Vazão 3 $\theta=17,11$ s		Vazão 4 $\theta=13,86$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	540,00	530,00	770,00	770,00	850,00	1030,00	760,00	800,00
Turbidez - nTU	156,00	151,00	164,00	165,00	150,00	150,00	181,00	183,00
pH	7,00	7,01	7,15	7,14	7,04	7,02	7,08	7,14
Absorvância (254 nm)	0,3920	0,3390	0,5630	0,4470	0,5230	0,5150	0,4820	0,3210
% Transmitância	40,55	45,81	27,36	35,76	30,00	30,52	32,96	47,75
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,9010	0,7800	1,2950	1,0280	1,2030	1,1850	1,0860	0,7380
DQO - mg/L	534,05	573,47	556,23	585,79	534,05	529,12	568,24	548,83
DBO - mg/L	174,00	176,00	180,00	184,00	171,00	172,00	180,00	182,00
Sólidos Totais - mg/L	1050,00	915,00	880,00	890,00	900,00	910,00	925,00	855,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	105,00	105,00	95,00	105,00	90,00	85,00	130,00	160,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	25,00	25,00	20,00	25,00	20,00	20,00	20,00	30,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,871	0,695	0,308	0,913	0,362	0,299	0,328	0,529
Coliformes fecais	0,642	0,397	0,600	0,420	0,891	0,180	0,534	0,207
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	0,000	100,000	17,610	0,000	4,240	14,970	19,290	0,000
Coliformes fecais	9,810	0,000	34,030	0,000	1,380	6,480	0,000	34,110

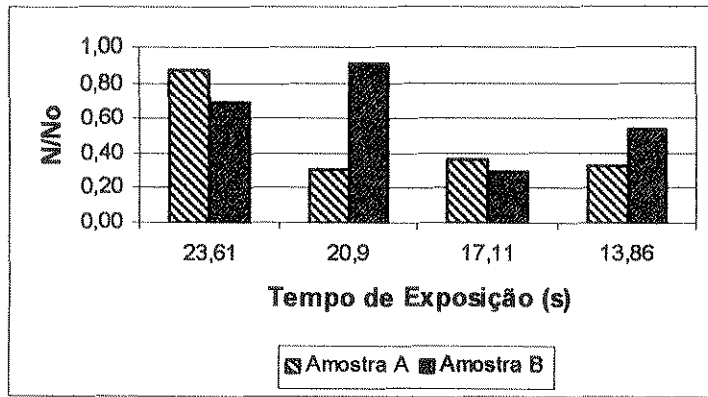


Figura 5.31 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 4 referente ao Reator II.

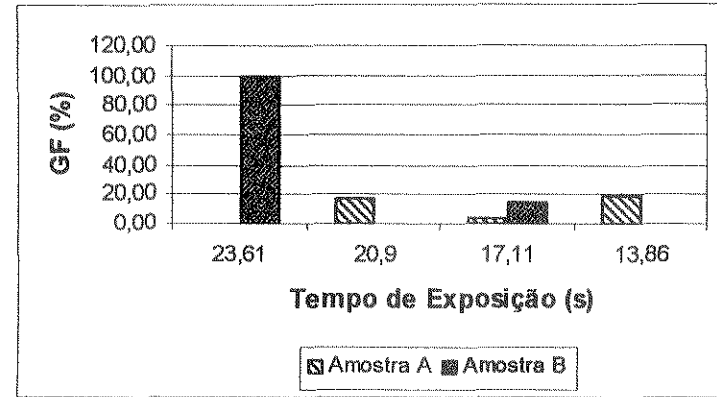


Figura 5.33 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 4 referente ao Reator II.

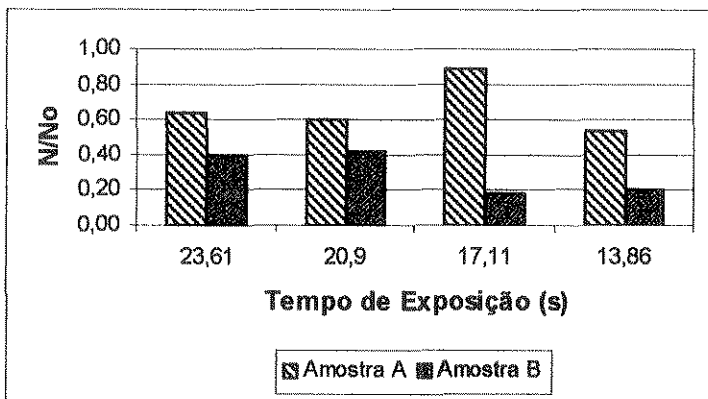


Figura 5.32 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para o ponto de coleta 4 referente ao Reator II.

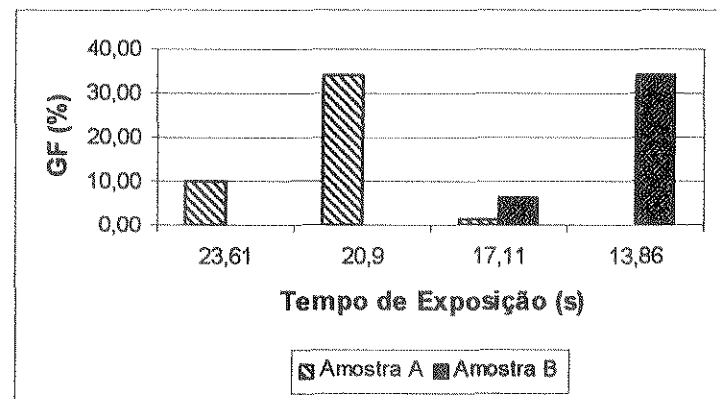


Figura 5.34 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 4 referente ao Reator II.

TABELA 5.24 – Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 4.

Causas da Variação	Valor de F			
	Coliformes Totais	Coliformes fecais - <i>E.coli</i>	Grau de Fotorreativação Colif. Totais	Grau de Fotorreativação <i>E. coli</i>
Reator	10,1424 *	7,6236 *	0,0267	1,6551
Vazão	1,1181	0,2715	0,7804	0,3352
Reator X Vazão	1,6967	0,7748	0,3455	0,0524

\* e \*\*: indicam valores de F significativos a 5% e 1%, respectivamente.

TABELA 5.25 – Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 4.

Vazão	Coliformes Totais		Coliformes Fecais <i>E.coli</i>		Grau de Fotorreativação Coliformes totais		Grau de Fotorreativação <i>E.coli</i>	
	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II
1	0,2365 <sup>aA</sup>	0,7830 <sup>aA</sup>	0,1445 <sup>aA</sup>	0,5195 <sup>aA</sup>	30,810 <sup>aA</sup>	50,000 <sup>aA</sup>	29,005 <sup>aA</sup>	4,9050 <sup>aA</sup>
2	0,2465 <sup>aA</sup>	0,6105 <sup>aA</sup>	0,3165 <sup>aA</sup>	0,5100 <sup>aA</sup>	35,825 <sup>aA</sup>	8,8050 <sup>aA</sup>	32,470 <sup>aA</sup>	17,015 <sup>aA</sup>
3	0,2585 <sup>aA</sup>	0,3305 <sup>aA</sup>	0,0265 <sup>aA</sup>	0,5355 <sup>aA</sup>	11,905 <sup>aA</sup>	9,6050 <sup>aA</sup>	14,640 <sup>aA</sup>	3,9300 <sup>aA</sup>
4	0,3180 <sup>aA</sup>	0,4285 <sup>aA</sup>	0,2795 <sup>aA</sup>	0,3075 <sup>aA</sup>	10,045 <sup>aA</sup>	9,6450 <sup>aA</sup>	31,035 <sup>aA</sup>	17,055 <sup>aA</sup>
Média	0,2649 <sup>aA</sup>	0,5381 <sup>bA</sup>	0,1918 <sup>aA</sup>	0,4839 <sup>bA</sup>	22,146 <sup>aA</sup>	19,514 <sup>aA</sup>	26,788 <sup>aA</sup>	10,726 <sup>aA</sup>

Obs.: valores seguidos por letras minúsculas diferentes na coluna, diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey, e letras maiúsculas, diferem a 1% pelo mesmo teste.

O afluente à Estação de Tratamento de Esgotos recebe uma grande quantidade de efluente industrial, sendo a indústria têxtil a principal contribuinte. Como resultado da parcela de descarga industrial desta natureza, tem-se um afluente com concentração de pigmentos que conferem cor e turbidez que em um sistema convencional de tratamento de esgoto compromete significativamente a qualidade deste efluente final. Isto pode ser observado pelos valores elevados de cor (530 a 1300 uC), turbidez (150 a 183 nTU) e sólidos totais ( $\approx 900,00$  mg/L).

No que se refere à aplicação de um sistema de desinfecção com radiação ultravioleta, a baixa qualidade do efluente pode ser notada também pelo baixo valor da porcentagem de transmitância para o comprimento de onda de 254 nm. Desta forma, os valores obtidos de  $N/N_0$  não apresentam correlação com os tempos de exposição ou dose aplicada.

Observa-se que houve diferença significativa em 5% para o fator reator para as variáveis coliformes totais e fecais (Tabela 5.24). O reator I foi o mais eficiente na remoção destes parâmetros tanto para os coliformes totais como fecais (Tabela 5.25). Através da análise estatística é possível constatar que a baixa qualidade do efluente interfere significativamente no processo de desinfecção por radiação ultravioleta apresentando valores muito baixos para F.

Para o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais os valores de F foram muito baixos dificultando muito a análise dos dados.



### PONTO DE COLETA 5 – Lodos Ativados Convencional

Este ponto de coleta está localizado na ETE de indústria de tecnologia em Campinas/SP. O tratamento é realizado pelo sistema de Lodos Ativados Convencional, utilizando o efluente final para o sistema de desinfecção. Apesar de estar localizada em uma indústria, o efluente é principalmente sanitário. As características do efluente da ETE estão apresentadas na Tabela 5.26. Os resultados dos ensaios referentes ao Reator I e Reator II estão apresentadas nas Tabelas 5.27 e 5.28, respectivamente. As Tabelas 5.29 e 5.30 apresentam os resultados da análise estatística obtidos a partir dos dados experimentais. As Figuras de 5.35 e 5.36 apresentam os resultados da fração de sobrevivência para coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.39 e 5.40. As Figuras 5.37 e 5.38, o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.41 e 5.42.

TABELA 5.26 - Características do efluente final da ETE de indústria tecnológica, em Campinas/SP.

Parâmetro	Faixa de Valores
Cor – uC	60 a 80
Turbidez – nTU	20 a 30
pH	≈ 7,0
Sólidos Totais (ST) - mg/l	320 a 400
Sólidos Suspensos Totais (SST) - mg/l	≈ 50
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) - mg/l	≈ 5
DQO - mg/l	80 a 100
DBO - mg/l	70 a 80
Coefficiente de absorvância UV ( $\alpha$ ) - $\text{cm}^{-1}$	0,060 a 0,100
Coliformes Totais - NMP/100ml	$10^3$ a $10^5$
Coliformes Fecais ( <i>E.coli</i> ) - NMP/100ml	$10^2$ a $10^4$

## Ponto de Coleta 5 - Reator I

Tabela 5.27 – Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 5.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=99,07$ s		Vazão 2 $\theta=86,95$ s		Vazão 3 $\theta=67,98$ s		Vazão 4 $\theta=55,43$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
	Cor - uC	80,00	93,00	83,00	83,00	121,00	80,00	38,00
Turbidez - nTU	22,00	20,30	34,90	29,30	23,80	24,10	92,40	79,10
pH	7,43	7,38	7,44	7,39	7,11	7,15	4,65	4,66
Absorvância (254 nm)	0,0610	0,1110	0,0880	0,0970	0,0940	0,0570	0,0740	0,0640
% Transmitância	86,87	77,51	81,64	79,90	80,62	87,60	84,25	86,27
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,1400	0,2550	0,2020	0,2230	0,2160	0,1310	0,1700	0,1470
DQO - mg/L	120,09	115,16	139,80	129,94	181,69	139,80	275,32	253,14
DBO - mg/L	74,00	73,00	83,00	80,00	92,00	76,00	35,00	37,00
Sólidos Totais - mg/L	390,00	385,00	410,00	400,00	505,00	515,00	735,00	725,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	55,00	50,00	60,00	65,00	45,00	50,00	110,00	140,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	10,00	20,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,005	0,005	0,022	0,029	0,068	0,027	0,122	0,132
Coliformes fecais	0,005	0,004	0,015	0,011	0,085	0,043	0,216	0,048
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	4,390	2,850	7,700	3,200	10,430	9,040	14,920	5,800
Coliformes fecais	2,280	0,440	3,260	3,060	12,930	12,140	2,240	3,660

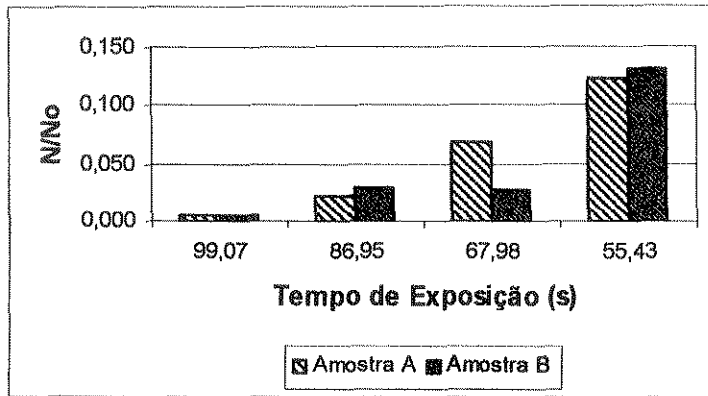


Figura 5.35 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 5 referente ao Reator I.

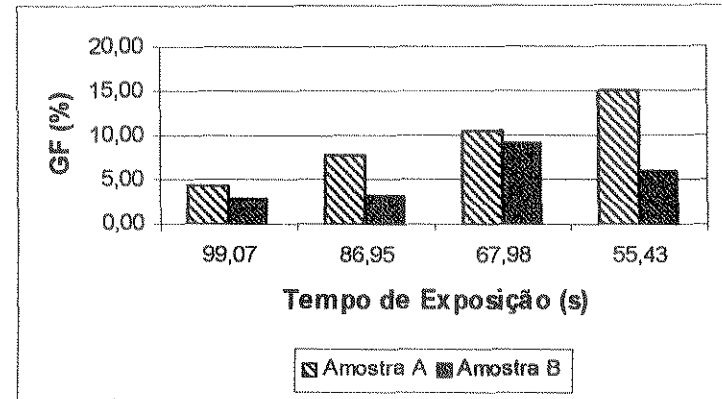


Figura 5.37 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 5 referente ao Reator I.

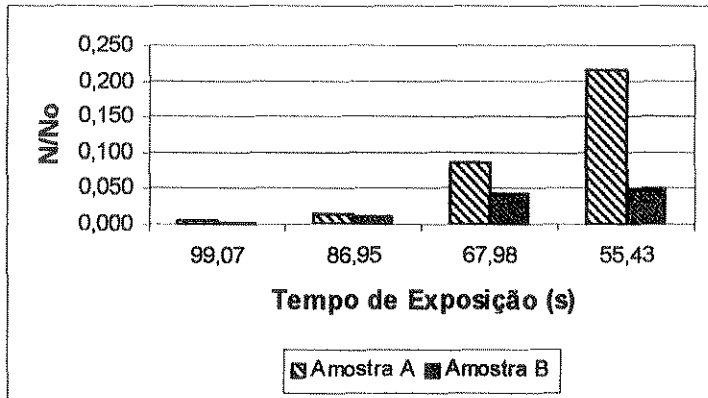


Figura 5.36 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para o ponto de coleta 5 referente ao Reator I.

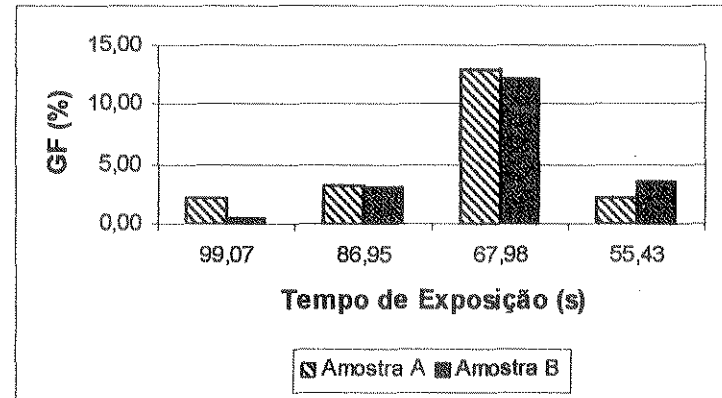


Figura 5.38 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 5 referente ao Reator I.

## Ponto de Coleta 5 - Reator II

Tabela 5.28 – Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 5.

Parâmetros	Vazão 1		Vazão 2		Vazão 3		Vazão 4	
	$\theta=23,61$ s		$\theta=20,90$ s		$\theta=17,11$ s		$\theta=13,86$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	88,00	88,00	86,00	85,00	150,00	74,00	37,00	43,00
Turbidez - nTU	16,60	16,80	18,50	17,70	28,20	24,40	72,10	70,70
pH	7,45	7,34	7,45	7,39	7,13	7,14	4,55	4,66
Absorvância (254 nm)	0,0930	0,1300	0,0990	0,1110	0,1070	0,0560	0,0600	0,0960
% Transmittância	80,71	73,41	77,51	79,54	78,24	87,93	87,09	80,14
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,2140	0,2990	0,2280	0,2550	0,2460	0,1290	0,1380	0,2210
DQO - mg/L	95,45	132,41	105,00	100,30	139,80	142,26	233,43	272,86
DBO - mg/L	70,00	79,00	73,00	72,00	78,00	82,00	37,00	39,00
Sólidos Totais - mg/L	380,00	380,00	385,00	385,00	590,00	565,00	730,00	705,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	40,00	45,00	50,00	40,00	50,00	50,00	140,00	140,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	20,00	20,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,006	0,012	0,017	0,019	0,093	0,119	0,248	0,420
Coliformes fecais	0,003	0,006	0,005	0,009	0,061	0,093	0,362	0,294
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	3,580	3,410	2,580	4,930	6,640	3,790	0,000	12,240
Coliformes fecais	0,340	1,270	2,120	4,210	5,500	12,270	14,180	28,760

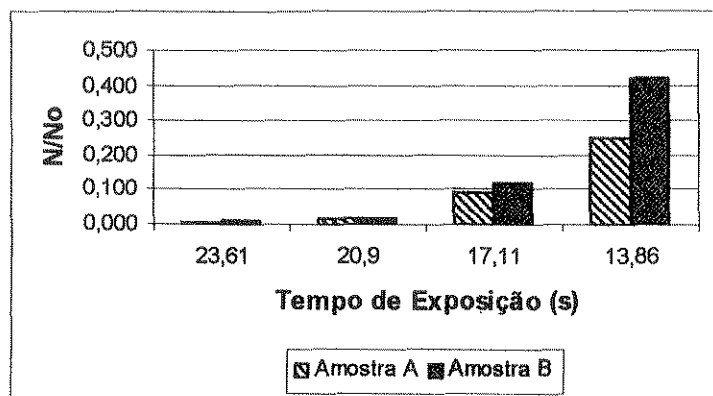


Figura 5.39 – Fração de sobrevivência (N/N<sub>0</sub>) de coliformes totais para o ponto de coleta 5 referente ao Reator II.

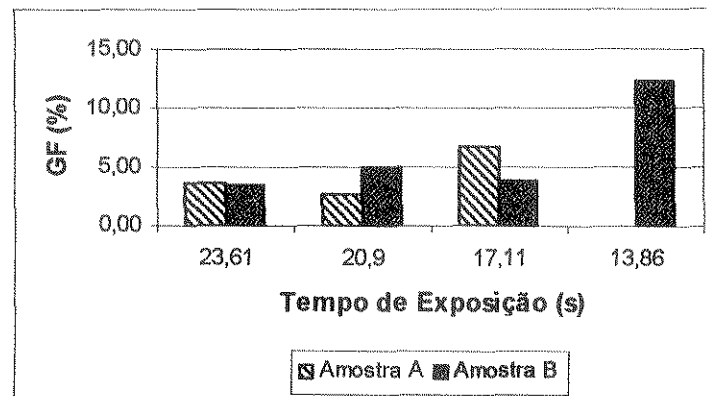


Figura 5.41 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 5 referente ao Reator II.

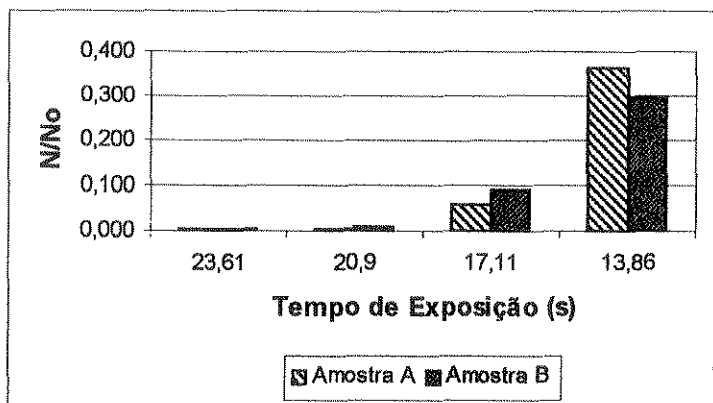


Figura 5.40 – Fração de sobrevivência (N/N<sub>0</sub>) de coliformes fecais para o ponto de coleta 5 referente ao Reator II.

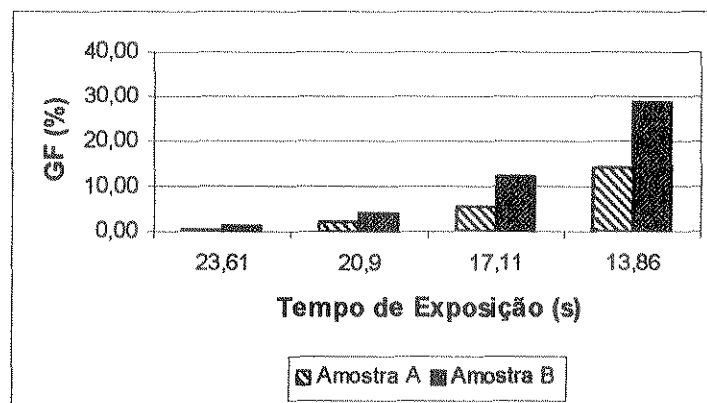


Figura 5.42 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 5 referente ao Reator II.

TABELA 5.29 – Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 5.

Causas da Variação	Valor de F					
	Coliformes Totais		Coliformes fecais - <i>E.coli</i>		Grau de Fotorreativação Colif. Totais	Grau de Fotorreativação <i>E. coli</i>
Reator	8,5458	*	4,6201		1,6509	3,0412
Vazão	20,7948	**	19,8422	**	1,1884	7,1565 *
Reator X Vazão	4,8441	*	4,2332	*	0,2618	6,0382 *

\* e \*\*: indicam valores de F significativos a 5% e 1%, respectivamente.

TABELA 5.30 – Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 5.

Vazão	Coliformes Totais		Coliformes Fecais <i>E.coli</i>		Grau de Fotorreativação Coliformes totais		Grau de Fotorreativação <i>E.coli</i>	
	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II
1	0,0050 <sup>aA</sup>	0,0090 <sup>aA</sup>	0,0045 <sup>aA</sup>	0,0045 <sup>aA</sup>	3,6200 <sup>aA</sup>	3,4950 <sup>aA</sup>	1,3600 <sup>aA</sup>	0,8050 <sup>aA</sup>
2	0,0255 <sup>aA</sup>	0,0180 <sup>aA</sup>	0,0130 <sup>aA</sup>	0,0070 <sup>aA</sup>	5,4500 <sup>aA</sup>	3,7550 <sup>aA</sup>	3,1600 <sup>aA</sup>	3,1650 <sup>aA</sup>
3	0,0475 <sup>aA</sup>	0,1060 <sup>aA</sup>	0,0640 <sup>aA</sup>	0,0770 <sup>aA</sup>	9,7350 <sup>aA</sup>	5,1250 <sup>aA</sup>	12,535 <sup>aA</sup>	8,8850 <sup>aA</sup>
4	0,1270 <sup>aA</sup>	0,3340 <sup>bB</sup>	0,1320 <sup>aA</sup>	0,3280 <sup>bB</sup>	10,360 <sup>aA</sup>	6,1200 <sup>aA</sup>	2,9500 <sup>aA</sup>	21,470 <sup>bB</sup>
Média	0,5125 <sup>aA</sup>	0,1168 <sup>bA</sup>	0,0534 <sup>aA</sup>	0,1041 <sup>aA</sup>	7,2913 <sup>aA</sup>	4,6463 <sup>aA</sup>	5,0013 <sup>aA</sup>	8,5813 <sup>aA</sup>

Obs.: valores seguidos por letras minúsculas diferentes na coluna, diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey, e letras maiúsculas, diferem a 1% pelo mesmo teste.

No caso do efluente tipicamente sanitário da indústria tecnológica situada em Campinas observou-se uma melhor correlação entre o tempo de exposição e a fração de sobrevivência e o grau de fotorreativação. A qualidade do efluente pode ser observada pelos valores baixos dos parâmetros analisados com destaque para a porcentagem de transmitância, que sempre foi maior que 75%.

Para este ponto de coleta houve diferença significativa em 5% para os fatores reator, vazão, reatorXvazão, sendo que para o fator vazão a diferença foi significativa em 1% para coliformes totais (Tabela 5.29). Para os coliformes fecais ocorreu o mesmo do que nos coliformes totais, exceção feita para o fator reator, que não houve diferença significativa.

Basicamente, até o momento, mostrou-se que a qualidade do efluente exercia influência através de sua má qualidade, em que os resultados não apresentavam correlação ou coerência. No caso deste ponto de coleta, mostra-se que efluente com qualidade boa, ou seja, sólidos, turbidez, cor, e principalmente, transmitância (valores sempre acima dos 75%, exceção para amostra B da vazão 1 do Reator II) a inativação de microrganismos torna-se uma função direta dose de ultravioleta aplicada. Desta forma, é válido afirmar que o efluente a partir de uma certa qualidade não é confiável para aplicação de radiação ultravioleta, pois os resultados obtidos para inativação são aleatórios quanto a dose aplicada.

Para o grau de fotorreativação de coliformes fecais houve diferença significativa em 5 % para o fator vazão e reatorXvazão, sendo que para o fator vazão foi significativo em 1% (Tabela 5.29).

As médias obtidas para a fração de sobrevivência de coliformes totais e fecais indicaram que o reator I foi mais eficiente. Porém, para ambas as variáveis houve diferenças significativas em 5% e 1% entre os reatores para a vazão 4 (Tabela 5.30). O grau de fotorreativação de coliformes fecais também foram menores no reator I, porém para o grau de fotorreativação de coliformes totais foi menor no reator II, apesar de não ser significativo.

A fração de sobrevivência para os coliformes totais e fecais seguiram em ordem crescente com relação a vazão, isto, é quanto maior foi a vazão (tempo de exposição menor) maior a fração de sobrevivência tanto para Reator I como para o Reator II, que pode ser observado claramente nas Figuras 5.35, 5.36, 5.39 e 5.40. Para o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais também ocorreu a relação de que quanto maior a vazão maior o grau de fotorreativação, exceção feita para o Reator I em relação ao grau de fotorreativação de coliformes fecais.



### PONTO DE COLETA 6 - ETE - IAC/Jundiaí

O tratamento do esgoto pode ser caracterizado como um reator que opera pelo processo anaeróbio. As características do efluente do reator estão apresentadas na Tabela 5.31. Os resultados dos ensaios referentes aos tempo de exposição de 13,86, 17,11, 20,90 e 23,61 s estão apresentados na Tabela 5.31. Os resultados dos ensaios referentes ao Reator I e Reator II estão apresentadas nas Tabelas 5.32 e 5.33, respectivamente. As Tabelas 5.34 e 5.35 apresentam os resultados da análise estatística obtidos a partir dos dados experimentais. As Figuras de 5.43 e 5.44 apresentam os resultados da fração de sobrevivência para coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.47 e 5.48. As Figuras 5.45 e 5.46, o grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais, respectivamente, para o Reator I, e para o Reator II, as Figuras 5.49 e 5.50.

TABELA 5.31 - Características do efluente final da ETE IAC/Jundiaí, em Jundiaí/SP.

Parâmetro	Faixa de Valores
Cor - uC	230 a 280
Turbidez - nTU	70 a 80
pH	≈ 7,0
Sólidos Totais (ST) - mg/l	450 a 480
Sólidos Suspensos Totais (SST) - mg/l	80 a 90
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) - mg/l	10 a 20
DQO - mg/l	250 a 300
DBO - mg/l	70 a 90
Coefficiente de absorvância UV ( $\alpha$ ) - $\text{cm}^{-1}$	0,200 a 0,300
Coliformes Totais - NMP/100ml	$10^5$ a $10^6$
Coliformes Fecais ( <i>E.coli</i> ) - NMP/100ml	$10^4$ a $10^5$

## Ponto de Coleta 6 - Reator I

Tabela 5.32 – Resultados experimentais obtidos para o Reator I no ponto de coleta 6.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=99,07$ s		Vazão 2 $\theta=86,95$ s		Vazão 3 $\theta=67,98$ s		Vazão 4 $\theta=55,43$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	210,00	210,00	192,00	206,00	205,00	207,00	210,00	209,00
Turbidez - nTU	79,00	78,20	73,80	81,00	78,00	94,00	115,00	126,00
pH	6,99	7,00	7,01	6,96	7,01	6,96	6,99	6,95
Absorvância (254 nm)	0,1610	0,1420	0,1120	0,2380	0,1890	0,1870	0,1630	0,2720
% Transmitância	68,96	72,10	77,21	57,79	64,75	65,02	68,72	53,41
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,3700	0,3270	0,2570	0,5470	0,4380	0,4300	0,3730	0,6260
DQO - mg/L	223,58	221,34	196,47	195,68	218,65	219,20	196,47	309,82
DBO - mg/L	72,00	71,00	67,00	67,00	69,00	69,00	64,00	88,00
Sólidos Totais - mg/L	390,00	390,00	410,00	405,00	580,00	580,00	580,00	590,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	80,00	80,00	90,00	90,00	80,00	90,00	130,00	140,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	10,00	5,00	20,00	20,00	15,00	20,00	30,00	60,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,067	0,211	0,179	0,133	0,128	0,177	0,356	0,394
Coliformes fecais	0,048	0,177	0,089	0,219	0,178	0,152	0,371	0,491
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	13,200	23,670	7,250	4,320	19,250	27,870	0,000	0,000
Coliformes fecais	2,990	7,010	3,310	0,000	7,100	24,070	3,460	0,000

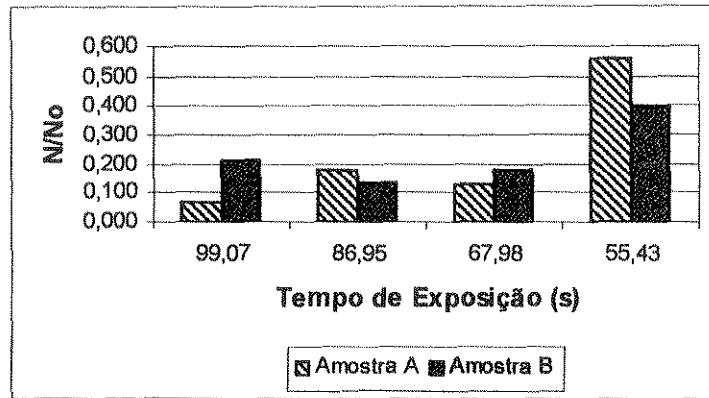


Figura 5.43 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 6 referente ao Reator I.

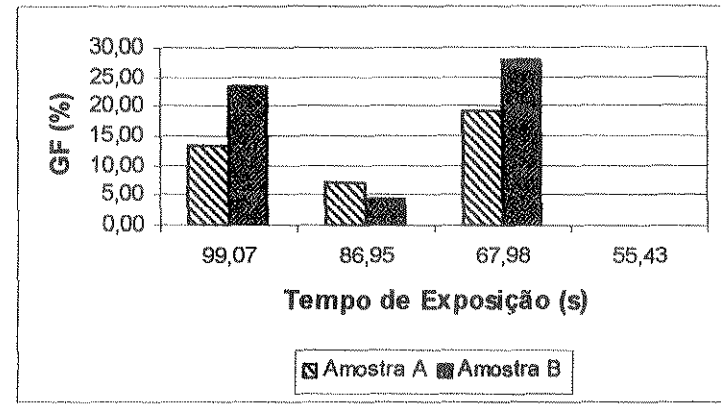


Figura 5.45 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 6 referente ao Reator I.

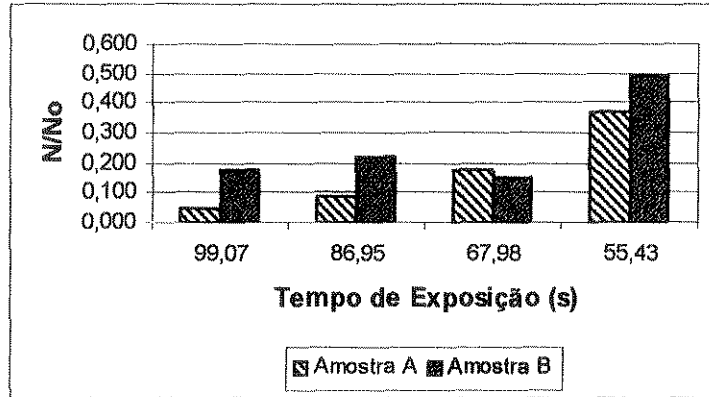


Figura 5.44 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para o ponto de coleta 6 referente ao Reator I.

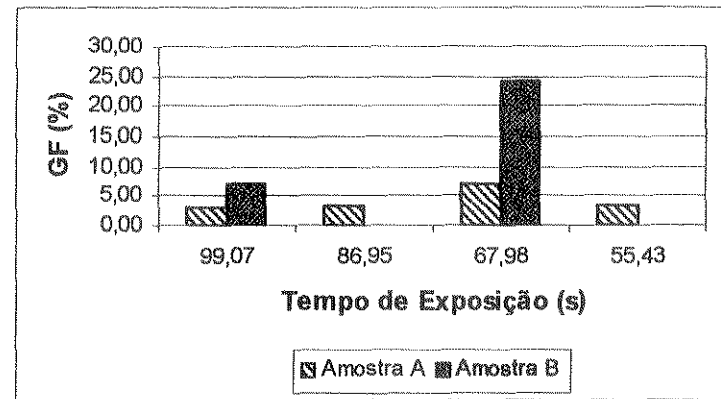


Figura 5.46 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 6 referente ao Reator I.

## Ponto de Coleta 6 - Reator II

Tabela 5.33 – Resultados experimentais obtidos para o Reator II no ponto de coleta 6.

Parâmetros	Vazão 1 $\theta=23,61$ s		Vazão 2 $\theta=20,90$ s		Vazão 3 $\theta=17,11$ s		Vazão 4 $\theta=13,86$ s	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
Cor - uC	305,00	268,00	233,00	284,00	245,00	253,00	271,00	273,00
Turbidez - nTU	77,20	70,80	72,40	75,30	73,20	76,10	72,60	76,50
pH	7,03	7,02	7,09	7,03	7,06	7,01	7,07	6,98
Absorvância (254 nm)	0,3030	0,2810	0,2820	0,2020	0,1930	0,2390	0,2860	0,2840
% Transmittância	49,81	52,36	52,21	62,78	64,05	57,68	51,77	51,97
Coefficiente de Absorvância (1/cm)	0,6970	0,6460	0,6490	0,4650	0,4440	0,5490	0,6580	0,6530
DQO - mg/L	263,00	256,34	275,32	271,43	307,36	289,64	248,22	249,11
DBO - mg/L	77,00	76,00	79,00	78,00	92,00	86,00	73,00	73,00
Sólidos Totais - mg/L	470,00	470,00	490,00	490,00	460,00	450,00	470,00	470,00
Sólidos Suspensos Totais - mg/L	80,00	80,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Sólidos Suspensos Voláteis - mg/l	10,00	10,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Fração de Sobrevivência - N/No								
Coliformes Totais	0,012	0,026	0,028	0,014	0,030	0,026	0,049	0,045
Coliformes fecais	0,013	0,022	0,026	0,014	0,020	0,033	0,036	0,033
Grau de Fotorreativação (%)								
Coliformes Totais	2,380	2,600	0,344	1,260	0,175	0,530	0,400	0,810
Coliformes fecais	1,430	1,180	0,000	0,540	0,000	0,000	0,030	0,610

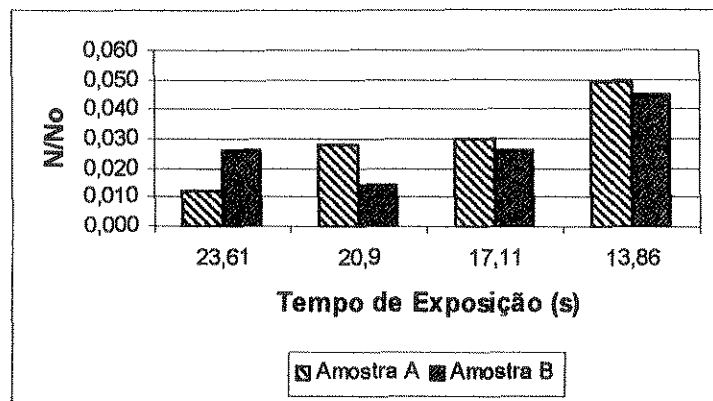


Figura 5.47 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais para o ponto de coleta 6 referente ao Reator II.

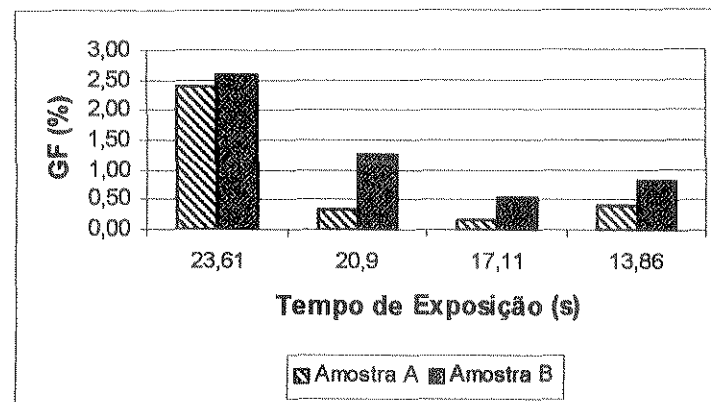


Figura 5.49 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes totais no ponto de coleta 6 referente ao Reator II.

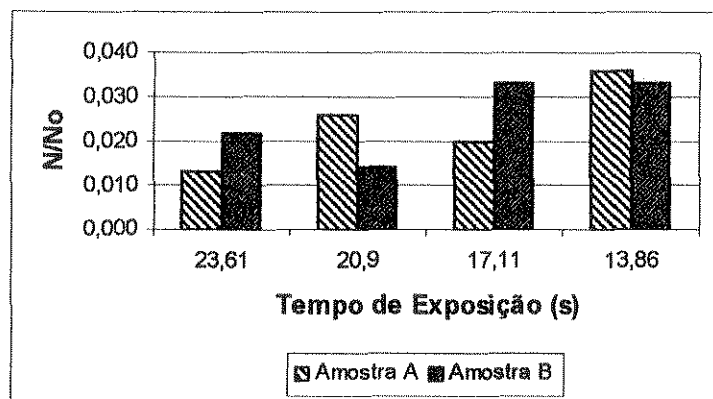


Figura 5.48 – Fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes fecais para o ponto de coleta 6 referente ao Reator II.

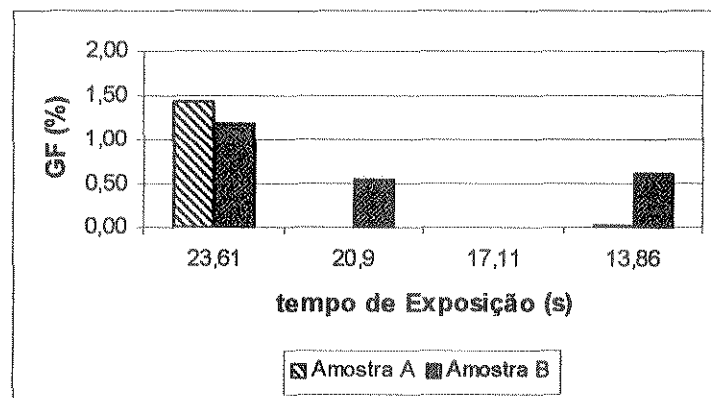


Figura 5.50 – Grau de Fotorreativação (%) de coliformes fecais no ponto de coleta 6 do referente ao Reator II

TABELA 5.34 – Análise de variância da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 6.

Causas da Variação	Valor de F							
	Coliformes Totais		Coliformes fecais - <i>E.coli</i>		Grau de Fotorreativação Colif. Totais		Grau de Fotorreativação <i>E. coli</i>	
Reator	50,2345	**	47,6292	**	39,1307	**	5,9471	*
Vazão	9,4765	**	7,5788	**	10,3731	**	2,0064	
Reator X Vazão	7,0153	*	6,2507	*	9,4779	**	2,2557	

\* e \*\*: indicam valores de F significativos a 5% e 1%, respectivamente.

TABELA 5.35 – Médias por Reator da fração de sobrevivência ( $N/N_0$ ) de coliformes totais, coliformes fecais - *E.coli*, e grau de fotorreativação de coliformes totais e fecais para o Ponto de Coleta 6.

Vazão	Coliformes Totais		Coliformes Fecais <i>E.coli</i>		Grau de Fotorreativação Coliformes totais		Grau de Fotorreativação <i>E. coli</i>	
	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II	Reator I	Reator II
1	0,1390 <sup>aA</sup>	0,0190 <sup>aA</sup>	0,1125 <sup>aA</sup>	0,0175 <sup>aA</sup>	18,435 <sup>aA</sup>	2,4900 <sup>bB</sup>	5,0000 <sup>aA</sup>	1,3050 <sup>aA</sup>
2	0,1560 <sup>aA</sup>	0,0210 <sup>aA</sup>	0,1540 <sup>aA</sup>	0,0200 <sup>bA</sup>	5,7850 <sup>aA</sup>	0,8000 <sup>aA</sup>	1,6550 <sup>aA</sup>	0,2700 <sup>aA</sup>
3	0,1525 <sup>aA</sup>	0,0280 <sup>aA</sup>	0,1650 <sup>aA</sup>	0,0265 <sup>bA</sup>	23,560 <sup>aA</sup>	0,3550 <sup>bB</sup>	15,858 <sup>aA</sup>	0,0000 <sup>aA</sup>
4	0,4750 <sup>aA</sup>	0,0470 <sup>bB</sup>	0,4310 <sup>aA</sup>	0,0345 <sup>bB</sup>	0,6050 <sup>aA</sup>	0,0000 <sup>aA</sup>	1,7300 <sup>aA</sup>	0,3200 <sup>aA</sup>
Média	0,0231 <sup>aA</sup>	0,0288 <sup>aA</sup>	0,2156 <sup>aA</sup>	0,0246 <sup>bB</sup>	11,945 <sup>aA</sup>	1,0625 <sup>bB</sup>	5,9925 <sup>aA</sup>	0,4737 <sup>bA</sup>

Obs.: valores seguidos por letras minúsculas diferentes na coluna, diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey, e letras maiúsculas, diferem a 1% pelo mesmo teste.

A qualidade do efluente pode ser observada pelos valores apresentados nas Tabelas 5.32 e 5.33 que é baixa. Porém, observou-se que houve correlação entre o tempo de exposição e a fração de sobrevivência. A porcentagem de transmitância esteve acima de 50% atingindo a 64% o que pode explicar a correlação dos resultados.

Para as variáveis coliformes totais e fecais houve diferença significativas em 5% para os fatores reator, vazão e reatorXvazão, e em 1% para os fatores reator e vazão (Tabela 5.34). Apesar de valores altos de F para estas variáveis a eficiência do Reator I foi menor do que para o Reator II, invertendo a tendência mostrada nos pontos de coleta (Tabela 5.35). Os parâmetros de qualidade do efluente obtidos apresentam-se similares entre os reatores, desta forma, não justificam a diferença de eficiência.

Apesar de ocorrer diferenças significativas em 5% e 1% para o grau de fotorreativação de coliformes totais os resultados demonstraram ser inconsistentes para as diferentes vazões, isto é, o maior valor desta variável que deveria ser para a vazão 4, ocorreu para a vazão 3 no caso do Reator I.

### Considerações Finais da Investigação Experimental

É importante ressaltar as tabelas da análise estatística referentes às médias da fração de sobrevivência de coliformes totais e fecais, e do grau de fotorreativação trazem os valores médios para cada vazão, ou seja, a média entre as amostras A e B.

Como pode ser observado pelos resultados obtidos, o processo de desinfecção é muito sensível à qualidade do efluente. Em muitos casos apresentados neste trabalho, a qualidade do efluente foi mais importante do que a dose aplicada, invertendo várias vezes os resultados previamente esperados, isto é, esperava-se que a eficiência diminuísse com o aumento da vazão.

Como foi apresentado no Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica, a estimativa da dose de radiação ultravioleta é complicada por vários fatores como o método a ser seguido que dependendo da escolha pode superestimar ou subestimar a dose, os métodos de determinação são indiretos, nem sempre é possível retratar a situação real em escala de bancada. Como já foi mencionado, a qualidade do efluente interfere muito na desinfecção por radiação ultravioleta, sendo este mais um complicador para a determinação da dose. Quando é feita a estimativa da dose a qualidade do efluente pode ser controlada, porém em ETE a qualidade do efluente é variável, ou seja, a dose que é efetivamente aplicada varia com a qualidade do efluente.

Seria muito importante estabelecer critérios bem controlados para o uso da radiação ultravioleta na desinfecção para aumentar a confiança deste tipo de sistema. Uma alternativa para tentar melhorar a aplicação do ultravioleta, seria estabelecer critérios de qualidade de efluente associada a dose desejada. Os principais parâmetros de qualidade para a utilização da radiação ultravioleta são a cor, turbidez, sólidos em suspensão e transmitância (em 254 nm).

Desta forma, tentou-se estabelecer critérios de valores mínimos de qualidade do efluente segundo os parâmetros de sólidos totais, cor, turbidez e porcentagem de transmitância para obtenção de três faixas de eficiência de desinfecção, em função da fração de sobrevivência utilizando os coliformes totais e fecais (*E.coli*) como parâmetros de controle. Foram definidos



os valores de  $N/N_0 \leq 0,1$ , para eficiência maior ou igual a 90 %;  $N/N_0 \leq 0,01$ , para eficiência maior ou igual a 99 %; e,  $N/N_0 \leq 0,001$ , para eficiência maior ou igual a 99,9 %. Analisando os resultados finais para todas as ETEs, foram montadas as Tabelas 5.36, 5.37, 5.38 e 5.39.

TABELA 5.36 – Valores mínimos exigidos para obtenção de eficiência de desinfecção utilizando coliformes totais como parâmetro de controle no Reator I.

	Coliformes Totais			
	Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	Cor (uC)	Turbidez (nTU)	% Transmitância
$N/N_0 \leq 0,1$	$\leq 110$	$\leq 210$	$\leq 130$	$\geq 62$
$N/N_0 \leq 0,01$	$\leq 77$	$\leq 107$	$\leq 20$	$\geq 71$
$N/N_0 \leq 0,001$	$\leq 10$	$\leq 60$	$\leq 11$	$\geq 77$

TABELA 5.37 – Valores mínimos exigidos para obtenção de eficiência de desinfecção utilizando coliformes totais como parâmetro de controle para Reator II.

	Coliformes Totais			
	Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	Cor (uC)	Turbidez (nTU)	% Transmitância
$N/N_0 \leq 0,1$	$\leq 133$	$\leq 305$	$\leq 116$	$\geq 50$
$N/N_0 \leq 0,01$	$\leq 40$	$\leq 90$	$\leq 16$	$\geq 64$
$N/N_0 \leq 0,001$	$\leq 8$	$\leq 90$	$\leq 10$	$\geq 75$

TABELA 5.38 – Valores mínimos exigidos para obtenção de eficiência de desinfecção utilizando coliformes fecais (*E.Coli*) como parâmetro de controle para o Reator I.

	Coliformes Fecais ( <i>E.Coli</i> )			
	Sólidos Suspensos	Cor	Turbidez	%
	Totais (mg/L)	(uC)	(nTU)	Transmitância
$N/N_0 \leq 0,1$	$\leq 118$	$\leq 144$	$\leq 150$	$\geq 62$
$N/N_0 \leq 0,01$	$\leq 55$	$\leq 93$	$\leq 20$	$\geq 64$
$N/N_0 \leq 0,001$	$\leq 10$	$\leq 70$	$\leq 11$	$\geq 77$

TABELA 5.39 – Valores mínimos exigidos para obtenção de eficiência de desinfecção utilizando coliformes fecais (*E.Coli*) como parâmetro de controle para o Reator II.

	Coliformes Fecais ( <i>E.Coli</i> )			
	Sólidos Suspensos	Cor	Turbidez	%
	Totais (mg/L)	(uC)	(nTU)	Transmitância
$N/N_0 \leq 0,1$	$\leq 133$	$\leq 305$	$\leq 116$	$\geq 50$
$N/N_0 \leq 0,01$	$\leq 80$	$\leq 100$	$\leq 16$	$\geq 64$
$N/N_0 \leq 0,001$	$\leq 8$	$\leq 90$	$\leq 11$	$\geq 83$

Observando as Tabelas 5.36 a 5.39 pode-se constatar que existe correlação entre a eficiência desejada e a qualidade do efluente a ser desinfetado. Por exemplo, para uma maior eficiência do sistema, deve-se ter uma água com maior porcentagem de transmitância. Da mesma forma, valores decrescentes dos parâmetros sólidos suspensos totais, cor e turbidez, levam a uma maior eficiência do sistema.

A legislação brasileira não cita especificamente os limites para coliformes totais ou fecais em efluentes de estações de tratamento de esgotos. Dessa forma, pelo CONAMA 20, devem ser observados alguns limites nas águas dos corpos receptores, de acordo com a classe dos mesmos. Por exemplo, para um rio de classe II, pelo artigo 5º da mesma legislação, os coliformes fecais são limitados em 1000/100 mL, enquanto que para coliformes totais, o limite é de 5000/100 mL. A questão se resume na relação de vazões entre o despejo e o corpo receptor, isto é, no fator de diluição.

### **5.3 – Ensaio de Fotorreativação em Condições Controladas**

Os ensaios de fotorreativação sob condições controladas foram propostos, principalmente, pelo fato dos resultados obtidos durante a investigação experimental não terem sido consistentes devido a vários fatores como:

- intensidade de luz não ser constante: a exposição à luz solar varia ao longo do dia e dos meses, tornando-se inviável a comparação efetiva dos resultados;
- tempo de espera para as amostras serem colocadas para fotorreativar variava, pois a distância entre os pontos de coleta e o laboratório eram diferentes; e,
- tempo gasto para regular a vazão variou de um ponto de coleta para outro, desta forma o tempo gasto entre a primeira e última amostra coletada foi diferente nos vários dias de amostragem, conseqüentemente o tempo de escuro da primeira amostra coletada e a última variou dentro do mesmo ponto de coleta e nos diferentes Pontos de Coleta.

Com base nos fatos citados anteriormente, fez-se necessário a realização de ensaios de fotorreativação em que se pudesse controlar de forma segura e constante a intensidade de luz visível para fotorreativação. Desta forma, os ensaios foram realizados em escala de bancada no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Agrícola – Feagri, Unicamp.

A intensidade de radiação ultravioleta,  $I$ , medido com o radiômetro da marca Cole-Parmer foi  $0,150 \text{ mW/cm}^2$ . O sensor do radiômetro foi colocado sob a luz ultravioleta na mesma base de apoio onde foram colocadas as placas de “Petri”.

Para cada novo ensaio ou nova sessão de análise foi verificada a intensidade de radiação ultravioleta para ratificar o valor da intensidade. Antes de iniciar os ensaios, esperava-se em torno de 20 minutos para que ocorre a estabilização da lâmpada de radiação ultravioleta e fluorescente. Desta forma, a dose de radiação ultravioleta para os ensaios foi obtido multiplicando a intensidade pela tempo de exposição,  $\theta$ . Os valores da dose estão apresentados na Tabela 5.40.

Tabela 5.40 – Valores da dose de radiação ultravioleta aplicada para os ensaios de fotorreativação.

$\theta$ (s)	Dose UV (mW.s/cm <sup>2</sup> )
40	6,0
50	7,5
60	9,0
70	10,5
80	12,0

Os resultados obtidos para os ensaios de fotorreativação estão apresentados nas Tabelas de 5.41 a 5.50 para os coliformes totais e fecais, segundo a equação (3.29) apresentada no Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica. As Figuras de 5.51 a 5.60 ilustram os resultados na forma gráfica.

Tabela 5.41 – Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 6,0 mW.s/cm<sup>2</sup> ( $\theta$ = 40 segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de Coliformes Totais			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	8,47	23,20	14,68	15,45
30 min	37,77	55,23	23,27	28,76
45 min	54,00	60,47	14,68	43,05
60 min	49,08	66,03	17,39	44,17

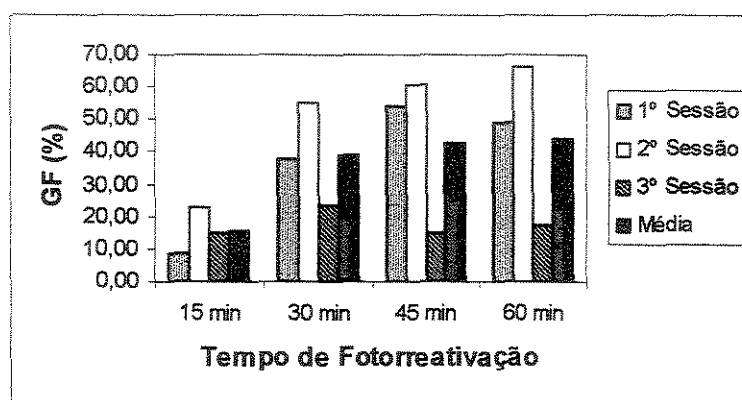


Figura 5.51 – Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 6,0 mW.s/cm<sup>2</sup> ( $\theta$ = 40 segundos).

Segundo a Tabela 5.29 e a Figura 5.51, o grau de fotorreativação para coliformes totais na 1ª e 2ª sessões cresceu com o aumento do tempo de fotorreativação, enquanto que para a 3ª sessão o grau de fotorreativação diminuiu após os 30 min. Porém, o valor médio obtido para as três sessões demonstrou que quanto maior o tempo de exposição no módulo de fotorreativação maior é o grau de fotorreativação. Neste caso, o grau de fotorreativação médio após 60 min foi maior que 40 %.

Pela 2ª sessão, observa-se que a fotorreativação ainda pode ser maior, apesar que a partir dos 30 min indicar que o aumento do grau de fotorreativação tende a se estabilizar. Esta tendência também ocorre para média dos valores. Pode-se inferir que no tempo de 60 min a fotorreativação atinge o valor máximo, isto é claro considerando a dose de  $6,0 \text{ mW.s/cm}^2$  e coliformes totais.

Tabela 5.42 – Grau de Fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $6,0\text{mW.s/cm}^2$  ( $\theta= 40$  segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de E.coli			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	45,34	24,06	24,29	31,23
30 min	69,58	37,29	24,59	43,82
45 min	88,92	43,16	5,14	45,74
60 min	55,24	40,15	20,57	38,65

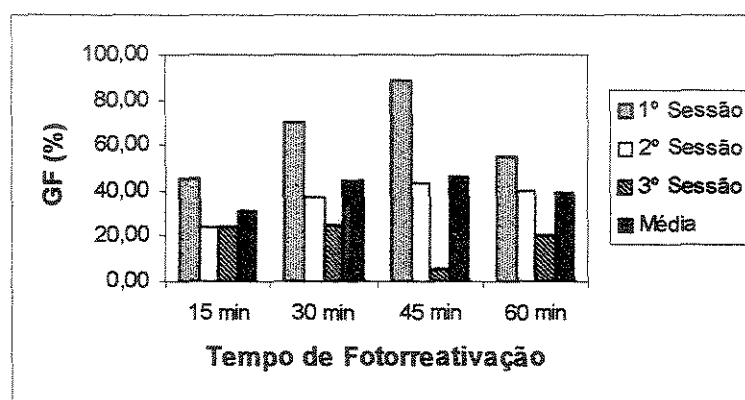


Figura 5.52 – Grau de Fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $6,0\text{mW.s/cm}^2$  ( $\theta= 40$  segundos).

Para os coliformes fecais - E.coli, a ocorrência máxima de fotorreativação foi após 45 min para as três sessões e, conseqüentemente, para a média. Porém, é importante notar que os valores foram crescentes para a 1ª e 2ª sessão, e sempre superior aos valores observados para os coliformes totais. Na 1ª sessão com 30 min de fotorreativação o percentual foi de quase 70%, chegando aos 89 % com 45 min, ou seja, valores do grau de fotorreativação muito mais altos do que para as outras duas sessões.

Como ocorreu para os coliformes totais, aqui também, ocorreu a tendência de estabilização do grau de fotorreativação após os 45 min. A 2ª sessão e a média dos valores refletem esta mesma tendência. A 3ª sessão apresenta-se de forma incompatível com a tendência de fotorreativação demonstrada, pois indica que a fotorreativação completa ocorreu já nos primeiros 15 min. Desta forma, se desconsiderar os valores da 3ª para média, a tendência de estabilização após 45 min se mantém, porém em patamar de valores mais altos.

Nota-se, também, que o grau de fotorreativação de coliformes fecais para a dose de 6,0 mW.s/cm<sup>2</sup> demonstrou ser muito alta.



Tabela 5.43 – Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose uv de  $7,5 \text{ mW.s/cm}^2$  ( $\theta = 50$  segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de Coliformes Totais			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	17,06	12,66	19,28	16,33
30 min	22,41	32,73	26,13	27,09
45 min	52,82	75,13	59,08	62,35
60 min	69,68	33,18	43,71	48,86

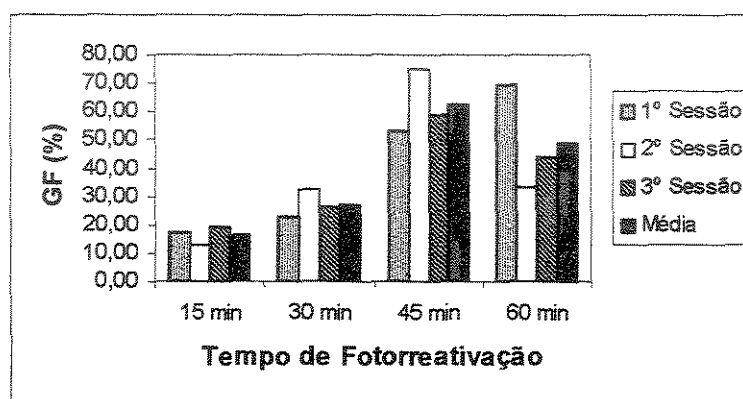


Figura 5.53 – Grau de Fotorreativação para coliformes totais para dose uv de  $7,5 \text{ mW.s/cm}^2$  ( $\theta = 50$  segundos).

Neste ensaio, o grau de fotorreativação foi crescente até aos 45 min de fotorreativação para a 2ª e 3ª sessão, para a 1ª sessão o valor foi crescente até aos 60 min. Observa-se que houve a relação entre o grau de fotorreativação e tempo de fotorreativação. O comportamento dos coliformes totais para a dose de  $7,5 \text{ mW.s/cm}^2$  foi similar ao da dose de  $6,0 \text{ mW.s/cm}^2$ , inclusive nos valores médios e máximos.

Tabela 5.44 – Grau de fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $7,5\text{mW.s/cm}^2$  ( $\theta= 50$  segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de E.coli			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	17,48	10,09	18,35	15,31
30 min	38,54	56,24	59,63	51,47
45 min	56,88	74,78	21,83	51,16
60 min	87,54	44,14	41,65	57,77

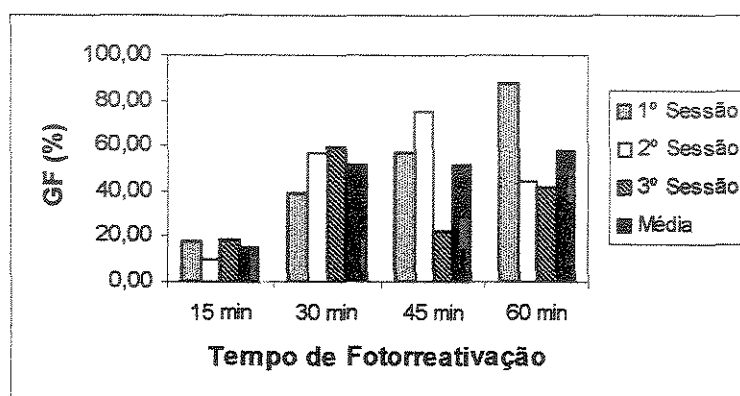


Figura 5.54 – Grau de fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $7,5\text{mW.s/cm}^2$  ( $\theta= 50$  segundos).

Para os coliformes fecais - E.coli ocorreu, também a similaridade de comportamento entre as doses de  $6,0$  e  $7,5 \text{ mW.s/cm}^2$ . A média dos valores indica que a fotorreativação aumentou pouco após os 30 min de fotorreativação, sendo que a média para 60 min de fotorreativação houve acréscimo em relação aos 45 min devido, exclusivamente, à 1ª sessão. O grau de fotorreativação para esta dose apresenta comportamento similar ao da dose de  $6,0 \text{ mW.s/cm}^2$ .

Tabela 5.45 – Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de  $9,0 \text{ mW.s/cm}^2$  ( $\theta = 60$  segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de Coliformes Totais			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	0,78	2,31	11,97	5,02
30 min	14,03	6,71	13,88	11,54
45 min	22,78	16,79	18,11	19,23
60 min	28,09	22,52	32,36	27,66

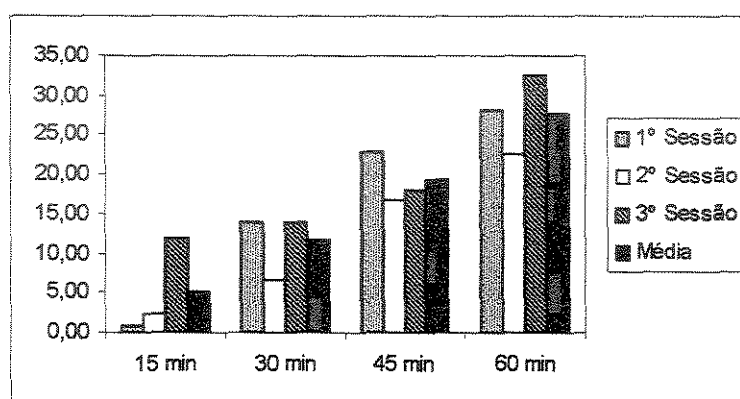


Figura 5.55 – Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de  $9,0 \text{ mW.s/cm}^2$  ( $\theta = 60$  segundos).

O grau de fotorreativação foi sempre crescente até os 60 min de fotorreativação, indicando que pode não ter atingido o valor máximo. Porém, pode-se observar que os valores sempre foram muito menores quando comparado com os casos da dose de  $6,0$  e  $7,5 \text{ mW.s/cm}^2$ , sendo que o valor máximo observado foi de aproximadamente 32 % para a 3ª sessão, e para a média de valores máximo foi em torno de 28 %.

De forma geral, o grau de fotorreativação para a dose de  $9,0 \text{ mW.s/cm}^2$  nos primeiros 30 min foi muito menor quando comparado com as doses de  $6,0$  e  $7,5 \text{ mW.s/cm}^2$ . Então, pode-se inferir que quanto maior a dose aplicada o grau de fotorreativação nos primeiros minutos é menor, porém a fotorreativação ocorre em um tempo maior, ou seja, para atingir o grau máximo de fotorreativação, tempo de 60 min não é suficiente.

Tabela 5.46 – Grau de fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $9,0\text{mW.s/cm}^2$  ( $\theta= 60$  segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de E.coli			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	-8,58	-2,92	30,96	6,48
30 min	21,74	4,06	30,47	18,76
45 min	34,78	33,63	30,96	33,12
60 min	80,71	-2,16	43,92	40,83

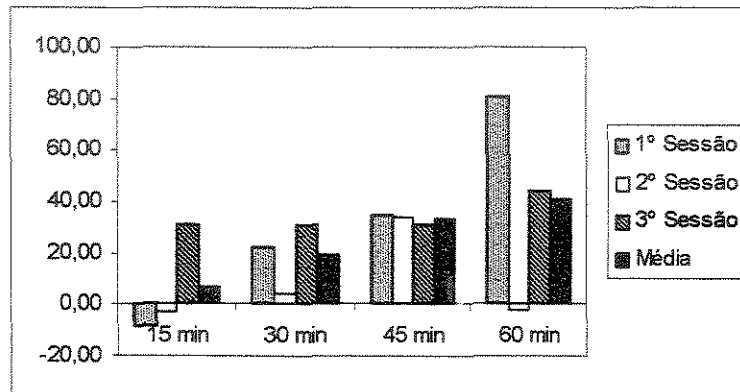


Figura 5.56 – Grau de fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $9,0\text{mW.s/cm}^2$  ( $\theta= 60$  segundos).

Os valores negativos indicados na Tabela 5.34 indicam que a quantidade de coliformes após 15 min foi menor do que na inativação, o mesmo ocorrendo para o caso da 2ª sessão nos 60 min. Isto pode ser causado por fatores como a precisão da metodologia, contaminação no momento do ensaio. Porém, o valor médio indicou que o grau de fotorreativação cresceu até os 60 min, possivelmente também não atingiu o valor máximo, como ocorreu para a mesma dose de coliformes totais. Como ocorreu com os coliformes totais, a média de valores e máximos também foram menores quando comparados com as doses de  $6,0$  e  $7,5\text{mW.s/cm}^2$ .

Considerando a 3ª sessão, observa-se que o grau de fotorreativação não acompanhou a tendência indicada para as 1ª e 2ª sessões e observado para os coliformes totais que apresenta valores baixos para o início da fotorreativação. Por outro lado, a 1ª sessão apresenta o valor final (aos 60 min) muito alto de fotorreativação, apesar de que até os 45 min indicar que a tendência do grau de fotorreativação foi de estabilização. Para o caso da amostras dos 60 min da 1ª sessão, pode ter ocorrido os mesmos problemas na análise, como contaminação das amostras coletas.

Tabela 5.47 – Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de  $10,5\text{mW.s/cm}^2$  ( $\theta = 70$  segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de Coliformes Totais			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	9,21	2,66	1,37	4,41
30 min	11,52	11,39	7,78	10,23
45 min	10,22	20,71	15,95	15,63
60 min	22,20	18,93	20,92	20,68

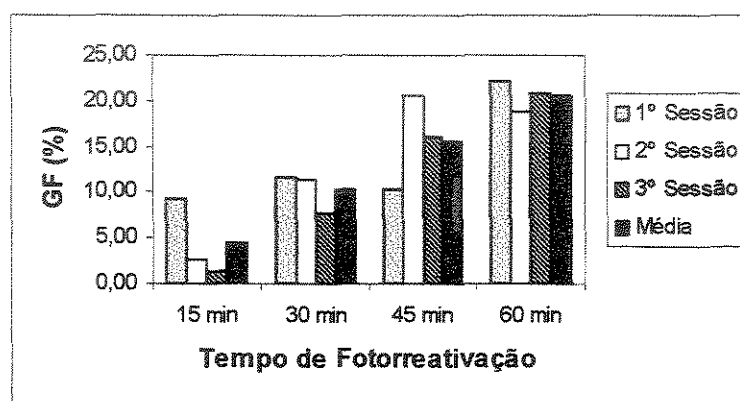


Figura 5.57 – Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de  $10,5\text{mW.s/cm}^2$  ( $\theta = 70$  segundos).

Para esta dose, manteve-se a tendência de diminuição do grau de fotorreativação, obtendo-se valores máximos e médios sempre menores que para os casos com dose menores. Nota-se também a relação do grau de fotorreativação com o tempo de exposição.

O valor máximo foi de 22,20 %, e a media de valores máximo foi de 20,7 %. Observa-se que a diferença entre o valor máximo e médio diminui com o aumento da dose. A diferença nos valores observados do grau de fotorreativação nos intervalos de tempo, isto é, de 15 para 30 min, de 30 para 45 min, e sucessivamente, diminuiu com aumento da dose aplicada.

Neste caso, manteve-se também, a tendência de valores baixos para o grau de fotorreativação nos primeiros 30 min, assim como de atingir o grau máximo de fotorreativação, considerando as 1ª e 3ª sessões, e para a 2ª sessão o grau de fotorreativação ocorreu aos 45 min.

Tabela 5.48 – Grau de fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $10,5\text{mWs/cm}^2$  ( $\theta= 70$  segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de E.coli			Média
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	
15 min	32,12	5,95	1,89	2,61
30 min	28,33	9,92	13,25	17,17
45 min	15,30	20,66	6,20	14,05
60 min	36,97	23,47	16,01	25,48

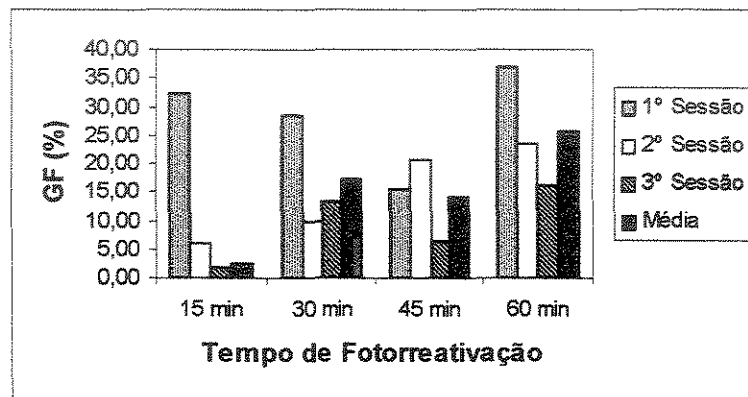


Figura 5.58 – Grau de fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $10,5\text{mWs/cm}^2$  ( $\theta= 70$  segundos).

Para a 1ª sessão os valores foram muito discrepantes se comparado com as outras duas sessões, além da inconsistência dos resultados desta sessão. Considerando apenas as outras duas sessões observa-se a mesma tendência demonstrada para os coliformes totais com valores mais baixos no início da fotorreativação, sem atingir o grau máximo de fotorreativação ao final de 60 min.



Tabela 5.49 – Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 12,0mWs/cm<sup>2</sup> ( $\theta$ = 80 segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de Coliformes Totais			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	4,62	10,94	9,34	8,30
30 min	12,00	13,83	20,54	15,46
45 min	14,19	16,52	38,00	22,90
60 min	15,33	27,84	38,00	27,06

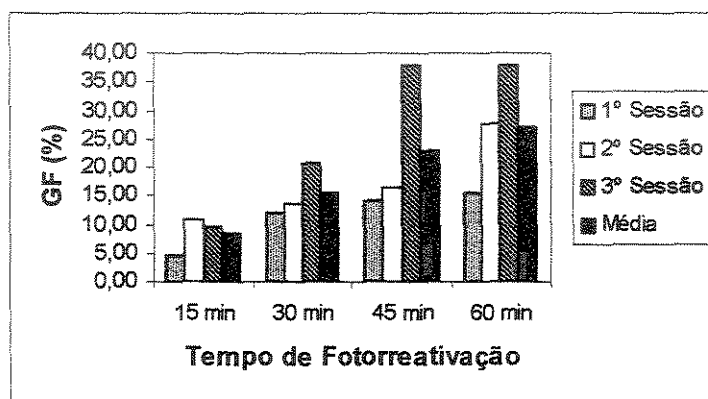


Figura 5.59 – Grau de fotorreativação para coliformes totais para dose uv de 12,0mWs/cm<sup>2</sup> ( $\theta$ = 80 segundos).

O grau de fotorreativação médio foi superior para dose de 12,0 mW.s/cm<sup>2</sup> do que para a dose de 10,5 mW.s/cm<sup>2</sup>. Considerando apenas a 1ª sessão e a 2ª sessão, a tendência da diminuição do grau de fotorreativação com o aumento da dose e tempo de exposição à luz visível crescente para fotorreativação final, permanecem inalteradas.

Tabela 5.50 – Grau de fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $12,0\text{mWs/cm}^2$  ( $\theta= 80$  segundos).

Tempo de Fotorreativação	Grau de Fotorreativação de E.coli			
	1ª Sessão	2ª Sessão	3ª Sessão	Média
15 min	14,54	8,18	22,80	15,17
30 min	28,05	11,82	11,62	17,16
45 min	11,01	17,42	9,69	12,71
60 min	19,82	21,52	24,89	22,08

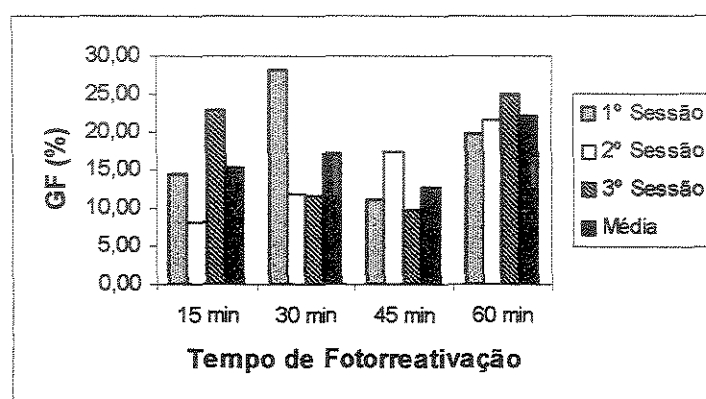


Figura 5.60 – Grau de fotorreativação para coliformes fecais - E.coli para dose uv de  $12,0\text{mWs/cm}^2$  ( $\theta= 80$  segundos).

De forma geral, a média dos valores do grau de fotorreativação permanece dentro da tendência da diminuição com aumento da dose, porém neste caso, os coliformes fecais não apresentam uma boa correlação entre o tempo de exposição para fotorreativação e grau de fotorreativação para cada sessão isoladamente. Para a 2ª sessão os valores obtidos são compatíveis com a tendência apresentada para as doses anteriores, isto é, valor final mais baixo do que para doses mais baixas, porém, também sem atingir o grau máximo de fotorreativação.

### Considerações Finais dos Ensaio de Fotorreativação

Como foram apresentados nas tabelas e figuras, há uma relação entre a dose de radiação ultravioleta, tempo de exposição à luz visível e grau de fotorreativação. Observou-se que quanto maior a dose uv aplicada ocorre a diminuição da grau de fotorreativação final.

Para valores mais baixos de dose o grau máximo de fotorreativação tende a se estabilizar, apesar de atingir valores altos de fotorreativação. Enquanto que com doses mais altas, o grau de fotorreativação inicial (primeiros 30 min) e final são mais baixos, porém, aos 60 min indica que ainda não atingiu ou valor máximo.

De forma geral, pode-se afirmar que quanto maior a dose aplicada menor será o grau de fotorreativação.

Alguns resultados para coliformes fecais (*E.coli*) - estiveram fora da tendência geral da relação entre dose uv e grau de fotorreativação, esta tendência ficou mais evidente para os coliformes totais.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

As principais conclusões que podem ser tiradas são:

#### **Comportamento Hidrodinâmico dos Reatores**

- A variação da condutividade elétrica é linear em relação a variação de concentração de NaCl na faixa de 80 a 140 mg/L;
- O Reator I tem características de “plug-flow” e mistura completa, com ocorrência de curto-circuito e volume morto.
- O Reator II apresenta ocorrência de curto-circuito para concentração de 1 e 2% o que pode reduzir a eficiência do mesmo;
- O Reator II demonstrou ter comportamento hidráulico satisfatório para as condições de operação de um plug-flow, para ambas concentrações;
- A concentração de 1% demonstrou-se mais eficiente para ensaios de caracterização hidráulica para o reator testado, com resultados dos parâmetros mais próximos do recomendado, e apresentando correlação superior a dos dados obtidos; e,
- A metodologia aplicada apresentou-se de fácil operação e de boa sensibilidade para aquisição de dados desta natureza.

### **Ensaio de Inativação**

- A radiação ultravioleta pode ser utilizada no processo de desinfecção de efluentes de estações de tratamento de esgotos, desde que observados alguns parâmetros, tais como o tempo de detenção hidráulico, a intensidade da lâmpada e a qualidade do efluente líquido;
- Resultados da etapa experimental indicam que a concentração de sólidos suspensos, a cor e a turbidez do efluente, que levam à porcentagem de são os principais parâmetros de qualidade que podem afetar a eficiência do sistema de desinfecção por radiação ultravioleta;
- Em geral, o Reator I foi mais eficiente que o Reator II, porém nem sempre as diferenças entre os reatores foram significativas. Considerando que o tempo de detenção do Reator II é muito menor do que para o Reator I, e utiliza apenas uma lâmpada, é possível afirmar que o sistema de lâmpadas imersas pode ser mais eficiente;
- Para os Pontos de Coleta 2, 3, 4 e 6 a porcentagem de transmitância sempre esteve abaixo dos 75 % que influenciou no baixo índice de inativação; e,
- Em grande parte dos dados obtidos, a qualidade do efluente foi mais importante que a dose de radiação ultravioleta.

### **Fotorreativação em Condições Controladas**

- Para doses de radiação ultravioleta mais baixas o grau de fotorreativação é atingido com o tempo próximo de 60 min, apesar de valores altos de fotorreativação;
- Doses de radiação ultravioleta implicam em valores iniciais e finais de fotorreativação menores, porém para atingir o grau máximo de fotorreativação necessita de mais tempo;
- Quanto maior a dose de radiação ultravioleta aplicada menor é grau de fotorreativação; e,
- Os coliformes totais tem melhor correlação para análises desta natureza quanto comparado com a *E.coli*.

## **SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS**

Um trabalho que seria de fundamental importância é a padronização da estimativa da dose de radiação ultravioleta, que possibilitaria a comparação direta dos resultados.

Avaliação de outros microrganismos indicadores que possa ser de fácil detecção com boa sensibilidade à radiação ultravioleta, e com baixo custo de análise.

Avaliação da desinfecção pelo método natural, isto é, inativação de microrganismo através da radiação ultravioleta solar que pode ser muito útil para localidades remotas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ÁLCALIS E CLORO - ABICLOR, Relatório Estadual de 1994. São Paulo, 1994. 24p.

AWWA, WPCF, APHA, Standard methods for examination of water and wastewater. Washington: APHA, 17 ed. 1989.

BLATCHLEY, E.R.III, HUNT, B.A., Bioassay for full-scale uv disinfection systems. **Water Science and Technology**. v.30, n.4, p.115-123. 1994.

BRAUN, A.M., MAURETTE,M.T., OLIVEROS, E. **Technologie photochimique**. Lausanne: Presses Polytechniques, 1986. 542p.

CHICK, H. An Investigation of the law of disinfection. **J. Hyg.** v.8, p. 92-158, 1908 apud QUALLS, R.G., JOHNSON, J.D. Modeling and efficiency of ultraviolet disinfection systems. **Water Research**. v.19, n.8, p. 1039-1046, 1985.

CRAIK,S.A., WELDON,D., FINCH,G.R., BOLTON,J.R., BELOSEVIC,M., Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts using medium - and low-pressure ultraviolet radiation. **Water Research**. v.35, n.6, p.1387-1398, 2001.

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

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** v.II. Rio de Janeiro: ABES, 1993. 503p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - U.S.EPA (1986) - **Design manual: municipal wastewater disinfection.** EPA/625/1-86/021. Oct. 1986.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - U.S.EPA (1996) - **Ultraviolet light disinfection technology in drinking water - an overview.** EPA/811-R-96-002. Sep. 1996.

HARM, W. **Biological effects of ultraviolet radiation.** New York: Cambridge University Press, 1980. 216p.

HARM, W. **Molecular mechanisms for repair of DNA, Part A.** New York: Plenum Press, 1975 apud LINDENAUER, K.G., DARBY, J.L. Ultraviolet disinfection of wastewater: effect of dose on subsequent photoreactivation. **Water Reseach.** v.28, n4, p. 805-817, 1994.

HARRIS, G.D., ADAMS, D.L, MOORE, W.M., SORENSEN, D.L. Potassium ferrioxalate as chemical actinometer in ultraviolet reactors. **Journal of the Environmental Engineering Division - American Society of Civil Engineers,** v.113, n.3, p. 612-625. jun., 1987

HUNT, B.A. **Ultraviolet dosimetry using microbial indicators and theoretical modelling,** M.S. Thesis, School of Civil Engineering, Purdue University, W.Lafayette, IN. 1992. 126p apud BLATCHLEY, E.R.III, HUNT, B.A., Bioassay for full-scale uv disinfection systems. **Water Science and Technology.** v.30, n.4, p.115-123. 1994.

JACOB, S.M., DRANOFF, J.S. Light intensity profiles in a perfectly mixed photoreactor. **Am. Inst. Chem. Eng. J.** 16: 359-363. 1970 apud QUALLS, R.G, JOHNSON, J.D. Bioassay



and dose measurement in uv disinfection. **Applied and Environmental Microbiology**. v.45, n.3, p.872-877. Mar 1983.

JAGGER, J.H. **Introduction to research in UV photobiology**. New York: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1967 apud QUALLS, R.G., JOHNSON, J.D. Modeling and Efficiency of ultraviolet disinfection systems. **Water Research**. v.19, n.8, p. 1039-1046, 1985.

JOLIS, D., LAM, C., PITT, P. Particle effects os ultraviolet disinfection of coliform bacteria in recycled water. **Water Environment Research**. v.73, n.2, p.233-236. March/April. 2001.

KASHIMADA, K. KAMIKO,N., YAMAMOTO, K., OHGAKI, S.. Assessment of photoreactivation following ultraviolet light disinfection. **Water Science Technology**. v.33, n.10-11, p. 261-269, 1996.

KREFT, P., SCHEIBLE, O.K., VENOSA, A. Hydraulic studies and cleaning evaluations of ultraviolet disinfection units. **Journal of Water Pollution Control Federation**. v.58, n.12. Dec. 1986.

KELNER, A. Action spectra for photoreactivation of ultraviolet-irradiated *Escherichia coli* and *Streptomyces griseus*. **J. gen. Physiol**. v.34, p. 835-852, 1951 apud LINDENAUER, K.G., DARBY, J.L. Ultraviolet disinfection of wastewater: effect of dose on subsequent photoreactivation. **Water Research**. v.28, n4, p. 805-817, 1994.

KELNER, A. Photoreactivation of ultraviolet-irradiated *Escherichia coli* with special reference to the dose-reduction principle and to ultraviolet-induced mutation. **J. Bact**. v.58, p. 511-522, 1949 apud LINDENAUER, K.G., DARBY, J.L. Ultraviolet disinfection of wastewater: effect of dose on subsequent photoreactivation. **Water Research**. v.28, n4, p. 805-817, 1994.

LAZAROVA, V., SAVOYE, P., JANEX, M.L., BLATCHLEY III, E.R., POMMEPUY, M. Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. **Water Science and Technology**. V. 40, n. 4-5, p. 203-213. 1999.

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

LOGE, F.J., BRAUNSTEIN, J.L., TCHOBANOGLOUS, G., DARBY, J.L. Ultraviolet disinfection of filtered activated sludge effluent for reuse applications. **Water Environment Research**. Virginia: v.68, n.2, p. 152-161, mar/abr. 1996.

PIRES, M.R. **Desinfecção de água para abastecimento com radiação ultravioleta: eficiência bactericida e uma análise econômica e energética**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM UNICAMP. Maio de 1997. 87p.

QUALLS, R.G, JOHNSON, J.D. Bioassay and dose measurement in uv disinfection. **Applied and Environmental Microbiology**. v.45, n.3, p.872-877. Mar 1983.

QUALLS, R.G., JOHNSON, J.D., FLYNN, M.P. The role of suspended particles in ultraviolet disinfection. **Journal Water Pollution Control Federation**. v.55, n.10, p. 1280-1285, out. 1983.

QUALLS, R.G., JOHNSON, J.D. Modeling and efficiency of ultraviolet disinfection systems. **Water Research**. v.19, n.8, p. 1039-1046, 1985.

SEVERIN, B.F. Disinfection of municipal wastewater effluents with ultraviolet lights. **Journal Water Pollution Control Federation**. v. 52, n.7, p. 2007-2018, jul. 1980.

SEVERIN, B.F., SUIDAN, M.T., ENGELBRECHT, R.S. Kinetic modeling of U.V. disinfection of water. **Water Research**. v.17, n.11, p. 1669-1678, nov. 1983.

SEVERIN, B.F., SUIDAN, M.T., RITTMANN, B.E., ENGELBRECHT, R.S. Inactivation kinetics in a flow-through UV reactor. **Journal Water Pollution Control Federation.** v.56, n.2, p. 164-169, fev. 1984.

SEVERIN, B.F., SUIDAN, M.T., ENGELBRECHT, R.S. Mixing effects in UV disinfection. **Journal Water Pollution Control Federation.** v.56, n.7, p. 881-888, July. 1984.

SOBOTKA, J. The efficiency of water treatment and disinfection by means of ultraviolet radiation. **Water Science Technology.** v.27, n.3-4, p.343-346, 1993.

SOMMER, R., HAIDER, T., CABAJ, A., PRIBIL, W., LHOTSKY, M. Time dose reciprocity in UV disinfection of water. **Water Science and Technology.** v.38, n.12, p.145-150. 1998.

WHITBY, G.E., PALMATEER, G. The effects of UV transmission, suspended solids and photoreactivation on microorganism in wastewater treated with UV light. **Water Science Technology.** v.27, n.3-4, p. 379-385, 1993.

WOLFE, R.L. Ultraviolet disinfection of potable water. **Environment Science Technology.** v. 24, n.6, p. 768-773, 1990.

ZUKOVIS, G., KOLLAR, J., MONTEITH, H.D., HO, K.W.A., ROSS, S.A. Disinfection of low quality wastewaters by ultraviolet light irradiation. **Journal Water Pollution Control Federation.** v.58, n.3, p.199-206, mar. 1986.