

# Fundamentos e aspectos de projeto de sistemas de desinfecção de esgoto sanitário com radiação ultravioleta

**LUIZ ANTONIO DANIEL**

Mestre em Hidráulica e Saneamento, desenvolve pesquisa a nível de doutorado junto à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo-EESC-USP

**JOSÉ ROBERTO CAMPOS**

Professor Associado junto à EESC-USP

*Este artigo apresenta os principais resultados da operação de uma instalação piloto de administração de esgotos sanitários pré-decantados empregando radiação ultravioleta e a aplicação desses resultados como base dos fundamentos e aspectos de projeto de sistemas de desinfecção com radiação ultravioleta.*

O emprego do cloro na desinfecção de esgotos sanitários pode resultar na geração de residual que, mesmo a baixa concentração, tem efeito tóxico à vida aquática, apresentando ainda, como resultado negativo adicional, a potencialidade de gerar subprodutos cancerígenos, como por exemplo organoclorados<sup>(8, 12)</sup>.

A desinfecção pode também ser realizada com ozônio, com eficiência comparável à do cloro e, ainda como vantagem, não apresenta a potencialidade de geração de trihalometanos. Entretanto, certos subprodutos gerados podem ser potencialmente cancerígenos como constatado por BULL<sup>(2)</sup>. Os custos envolvidos, nesse caso, são muito superiores àqueles correspondentes ao uso de cloro.

A radiação ultravioleta é um método alternativo promissor que pode fornecer eficiência de desinfecção superior à do cloro<sup>(20)</sup> com a vantagem de não gerar subprodutos indesejáveis e não manter residual que poderia afetar o equilíbrio do ecossistema no qual o efluente está sendo lançado.

A utilização de radiação ultravioleta como agente desinfetante deve-se a DOWNES E BLUNT (citados em<sup>(10)</sup> que, em 1877, descobriram sua ação germicida. Na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo foram realizadas pesquisas nesta área por Campos e Pizzirane<sup>(3)</sup> Sampaio<sup>(16)</sup> e Daniel<sup>(5)</sup>, com resultados comparáveis aos de outros pesquisadores.

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos por Daniel<sup>(5)</sup> em instalação piloto, utilizando coliformes totais como microrganismos indicadores e também os aspectos construtivos de unidades de pequeno porte de desinfecção com radiação ultravioleta.

A eficiência de inativação na referida instalação variou de 54,17% a 99,99%, mantendo-se constante a intensidade média nominal aplicada em 26,67 mW/cm<sup>2</sup> e variando-se a energia aplicada de 67,34 a 555,6

Wh/cm<sup>3</sup>, mediante controle do tempo de exposição.

Foi também estudada a fotorreação dos coliformes totais parcialmente inativos, mantendo uma amostra exposta à luz solar após a irradiação com ultravioleta. Os resultados indicam que a fotorreativação é maior para doses menores, chegando a ser de até 70%, o que representa densidade de coliformes totais 44 vezes maior do que a densidade medida após irradiação.

## FONTES DE EMISSÃO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

A radiação ultravioleta pode ser emitida por fonte natural, sendo o sol a única fonte emissora de importância, ou por fontes artificiais que compreendem as lâmpadas de fonte incandescente e as que utilizam o efeito arco<sup>(14)</sup>. Para propósitos germicidas, as lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio são as mais adequadas, emitindo maior parte de sua energia, aproximadamente de 85%<sup>(8)</sup> a 90%<sup>(20)</sup> no comprimento de onda de 253,7nm, que é efetivo na inativação de microrganismo.

A intensidade de emissão de radiação ultravioleta é afetada pela temperatura da lâmpada, por flutuações de voltagem na linha de alimentação e pela idade da lâmpada. Dados obtidos por Cortelyou *et alii*<sup>(4)</sup> mostram que quando as lâmpadas estavam imersas diretamente em água à temperatura de 0 a 10 C°, tiveram uma emissão média de aproximadamente 22 a 58% da emissão a 20 C°, respectivamente.

As lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio têm vida útil longa, de 4.000 a 5.000 horas<sup>(8)</sup>. O principal processo de deterioração é o desgaste do eletrodo que é agravado por freqüentes operações de ligar o circuito. Segundo Huff<sup>(8)</sup> as lâmpadas devem ser substituídas após seis meses de uso contínuo.

## MECANISMOS DE INATIVAÇÃO DOS MICRORGANISMOS

A inativação dos microrganismos ocorre quando a radiação ultravioleta penetra a parede celular e é absorvida pelos ácidos nucléicos e, em menor extensão, pelas proteínas e outras moléculas biologicamente importantes<sup>(2,10)</sup>.

A absorção desta energia produz alterações bioquímicas letais pela dissipação por excitação da energia absorvida que rompe as ligações não saturadas, principalmente de purinas e pirimidinas, principais componentes dos ácidos nucléicos, ADN e ARN, que absorvem radiação ultravioleta ao máximo na região de 255 a 260 nm<sup>(19)</sup>.

Os ácidos nucléicos armazenam as informações genéticas necessárias à sobrevivência e reprodução celular. Os fótons de radiação ultravioleta absorvidos pelo ADN e pelo ARN têm a potencialidade de alterar a estrutura molecular destes ácidos, podendo gerar dímeros provenientes de pirimidinas adjacentes de um mesmo fio de cromossomo, que são formados pela ligação com um anel de ciclobutano<sup>(10)</sup>. Os dímeros formados podem resultar em Timina-Timina, Timina-Citosina e Citosina-Citosina.

O resultado final da irradiação dos microrganismos com ultravioleta, is-

to é, a inativação total ou parcial destes, reflete a relação mútua entre a formação de fotoprodutos letais e sua remoção por processo de recuperação. Assim sendo, ao se avaliar a eficiência da desinfecção realizada com radiação ultravioleta, deve-se considerar os microrganismos que são capazes de se recuperar, cessada a irradiação.

São dois os principais mecanismos de recuperação dos microrganismos irradiados com ultravioleta:

■ **Reversão das alterações produzidas pela radiação ultravioleta (fotorreativação).**

A reversão é obtida através de recuperações fotoenzimáticas que monomerizam *in situ* os dímeros de pirimidina pela ação de uma enzima na presença de luz ultravioleta de comprimento maior do que 300 nm ou luz visível de ondas curtas (menor do que 500nm)(9).

Segundo Dulbecco(6), a magnitude da fotorreativação depende, dentre outros fatores da dose de ultravioleta aplicada, da intensidade e do comprimento de onda da luz visível e do tempo de exposição a esta luz.

■ **Substituição dos nucleotídeos lesados pela radiação ultravioleta (recuperação no escuro).**

A substituição pode ser feita por meio de remoção da parte lesada e de uma seqüência de nucleotídeos adjacentes, com posterior ressíntese da seqüência original de nucleotídeos.

## CINÉTICA DE INATIVAÇÃO DOS MICRORGANISMOS

A lesão total produzida em um microrganismo é o resultado da exposição deste microrganismo a uma determinada dose de radiação ultravioleta.

Em populações homogêneas que seguem a cinética de inativação, em que uma única lesão é suficiente para inativar um microrganismo, o logaritmo natural da fração sobrevivente pode ser função linear da dose recebida pelos microrganismos (Chick, Jagger citados em (15)):

$$\ln \frac{N}{N_0} = -kIt \quad (1)$$

ou

$$\frac{N}{N_0} = \exp(-kIt) \quad (2)$$

$N_0$  : densidade inicial de microrganismos;

$N$  : densidade final de microrganismos;

$K$  : velocidade de reação ( $\text{cm}^2/\text{mWs}$ );

$I$  : intensidade de radiação ultravioleta ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ );

$t$  : tempo de exposição (s).

Entretanto, esta relação não se mantém para populações heterogêneas, com cada espécie de microrganismo apresentando diferentes sensibilidades à radiação ultravioleta.

Quanto maior a diversidade de espécies, menor a possibilidade de se obter relação linear.

Morowitz(11), considerando o efeito da absorção, substituiu a intensidade de radiação ultravioleta,  $I$ , na equação (2) por um valor médio calculado a partir da Lei de Lambert:

$$N = N_0 \exp \left\{ -KIt_0 \left[ \frac{1 - \exp(-aL)}{aL} \right] \right\} \quad (3)$$

$I_0$  : intensidade da radiação ultravioleta na superfície  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ;

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

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

Scheible(17), considerando a influência da matéria particulada em suspensão e os efeitos da dispersão axial, obteve a equação (4).

$$N = N_0 \exp \left\{ \frac{vx}{2D} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{4KD}{v} \right)^{1/2} \right] \right\} + N_p \quad (4)$$

$x$  : comprimento característico do reator (cm);

$v$  : velocidade média do líquido (cm/s);

$D$  : coeficiente de dispersão axial ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );

$K$  : constante de inativação dos microrganismos ( $\text{s}^{-1}$ );

$N_0$  : densidade total de microrganismos;

$N_p$  : densidade de microrganismos associados à matéria particulada;

$N$  : densidade final de microrganismos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Instalação Piloto

Todos os experimentos foram realizados em uma instalação piloto (Figura 1) constituída por um canal sobre o qual foi fixada uma cúpula refletora. Nesta cúpula foram instaladas, paralelamente ao fluxo, 4 lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio, com potência nominal de 15 W (lâmpadas GT15T8 Sankyo Denki — Japão). Essa instalação também foi utilizada em trabalho anterior desenvolvido por Sampaio(16).

### Metodologia dos Ensaio Despejo Líquido Estudado

O despejo utilizado na pesquisa era constituído de esgoto sanitário proveniente de rede pública próxima ao Campus da Universidade de São Paulo, em São Carlos, pré-decantado por período de 20 minutos para sedimentação de sólidos grosseiros. Da unidade de decantação, o esgoto sanitário era bombeado para um reservatório onde era diluído com água bruta que apresentava, conjuntamente, valores relativamente pequenos de cor, turbidez, concentração de sólidos totais e densidade de coliformes totais. A diluição era variável de 1:1 a 1:1,5 (água:esgoto) e foi feita com o objetivo de obter despejo líquido com características próximas às de efluentes secundários no que se refere à concentração de sólidos totais.

O despejo líquido preparado era bombeado do reservatório para a câmara de desinfecção, utilizando-se bomba centrífuga de eixo horizontal.

Foram realizados ensaios com lâminas líquidas de 2,0; 3,0; 4,0; e 6,0 cm e tempo de exposição de 40, 60, 80 e 120 segundos para cada espessura de lâmina.

Os ensaios de fotorreativação foram feitos mantendo uma amostra exposta indiretamente à luz solar por 3 horas em temperatura ambiente, e colocadas em frascos de pyrex. Uma outra amostra mantida no escuro, também por 3 horas e sob as mesmas condições de temperatura, foi utilizada como controle.

## Exames e Análises

A eficiência de desinfecção foi medida através da contagem de coliformes totais, a nível confirmatório, do afluente e do efluente da instalação piloto, empregando a técnica dos tubos múltiplos, conforme descrito em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*<sup>(18)</sup>, utilizando-se 3 tubos por diluição aos invés de 5.

A determinação de sólidos totais e de sólidos suspensos totais foi feita conforme ainda descrito em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*

## Resultados e Discussão

Os principais resultados dos ensaios encontram-se nas Tabelas 1 a 4. Pela equação (2), a fração de microrganismos não inativados tende a zero quando a dose aplicada tende a valores elevados.

Entretanto, este comportamento não ocorreu nos ensaios realizados que apresentaram tendências em manter residual constante de microrganismos ativos, mesmo para doses elevadas (Figuras 2 a 5).

Possivelmente esse fato possa ser atribuído, em parte, à presença de sólidos em suspensão, que de certa forma protegem da ação da radiação ultravioleta parte dos microrganismos, como pode ser observado nos seguintes resultados:

- para a lâmina de 2,0 cm e tempo de exposição de 40 segundos a amostra com SST de 25,0 mg/l apresenta inativação de coliformes totais 4,9 vezes menor do que a amostra com SST de 8,0 mg/l
- para a lâmina de 3,0 cm e tempo de exposição de 80 segundos a amostra com SST de 12,6 mg/l apresenta inativação de coliformes totais 68 vezes menor do que a amostra com SST de 2,3 mg/l
- para a lâmina de 6,0 cm e tempo de exposição de 40 segundos há redução de 8,8 vezes na inativação de coliformes totais para a amostra com SST de 24,0 mg/l em relação à amostra com SST de 15,3 mg/l

A fotorreativação, de maneira geral, não foi significativa no momento da densidade de coliformes totais, principalmente para as maiores doses aplicadas. Entretanto para a lâmina de 6,0 cm (Figura 6) pôde ser observado aumento de até 70% na densidade de microrganismos sobreviventes. Deve ser observado que a dose aplicada refere-se à dose incidente na superfície da lâmina líquida. Sendo assim, para um mesmo tempo de exposição, quanto maior a espessura da lâmina líquida menor a dose média recebida.

Em alguns ensaios as amostras fotorreativadas apresentaram densidades de coliformes totais inferiores às das amostras de efluentes não fotorreativados. Esses resultados podem ter origem na diferença de resistência à radiação ultravioleta dos diferentes microrganismos em decorrência das características genéticas, das características fisiológicas dos microrganismos antes da irradiação ou devido à presença de substâncias que inibem a fotorreativação.

### TEMPO DE EXPOSIÇÃO (a)

A análise dos resultados de fotorreativação (Tabelas 1 a 4) permite notar a existência de mecanismos de recuperação no escuro, principalmente para as lâminas de 3,0, 4,0 e 6,0 cm. Quando a recuperação no escuro esteve presente, sua magnitude foi inferior à da recuperação por fotorreativação, com exceção para a lâmina de 3,0 cm e tempo de exposição de 40 segundos.

### Considerações sobre a pesquisa realizada

Com base no trabalho desenvolvido na EESC-USP e para as condi-

ções físicas, químicas e biológicas em que os testes foram feitos, conclui-se que:

- os resultados obtidos confirmam aqueles obtidos por outros pesquisadores como, por exemplo, Oliver e Carey<sup>(13)</sup>, Borup e Adams<sup>(1)</sup>, White et alii<sup>(19)</sup>, Campos e Pizzirani<sup>(3)</sup>, Sampaio<sup>(16)</sup> etc., validando com isso a tecnologia de desinfecção com radiação ultravioleta para águas residuárias
- a eficiência de inativação de coliformes totais, utilizados como microrganismos indicadores, cresce exponencialmente com o aumento do tempo de exposição (dose) até aproximadamente 80 segundos. Após esse tempo de exposição, a taxa de inativação reduz, tendendo a zero para tempos de exposição superiores a 120 segundos
- a distribuição dos tamanhos dos sólidos em suspensão possivelmente exerça maior influência do que a concentração total desses sólidos;
- a fotorreativação ocorre principalmente para doses menores. Para um mesmo tempo de exposição, quanto maior a espessura de lâmina líquida, menor a dose média recebida. Portanto, as lâminas de 4,0 e 6,0 cm foram as que apresentaram maior fotorreativação, atingindo máximo de 71%.
- embora a fotorreativação, em relação à densidade de coliformes reativados, possa parecer pequena, a dose necessária para manter a eficiência de inativação a um nível desejado, é significativa, podendo chegar a ser de até 62% superior à dose necessária para manter a mesma eficiência, não considerando a fotorreativação (Figura 6).

## ASPECTOS DE PROJETO DE UNIDADES DE DESINFECÇÃO COM RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

### Concepções construtivas de unidades de desinfecção com radiação ultravioleta

As unidades de desinfecção de esgotos sanitários com radiação ultravioleta podem fundamentar-se em três concepções construtivas:

#### Lâmpadas imersas no líquido

Os efluentes a serem desinfetados escoam por um canal ou tubulação na qual estão instaladas as lâmpadas de ultravioleta. Esta concepção exige a blindagem dos circuitos elétricos (isolamento da água) e o revestimento das lâmpadas com invólucros de quartzo para evitar a redução de emissão de radiação ultravioleta devido a reduções de temperatura da lâmpada, decorrentes da redução de temperatura do líquido.

A manutenção torna-se difícil, pois os invólucros de quartzo devem ser periodicamente limpos, o que exige a remoção dos mesmos, com desmontagem da unidade pois as lâmpadas são instaladas muito próximas uma das outras. Além disso o fluxo do líquido entre as lâmpadas pode tornar-se mal distribuído, com formação de curtos-circuitos hidráulicos e espaços mortos, que reduzem a eficiência do processo.

#### Lâmpadas instaladas externamente a tubos transparentes à radiação ultravioleta

Nesta concepção, o líquido escoam em tubos de Teflon e as lâmpadas de ultravioleta são fixadas externamente a estes tubos. Há portanto perda de energia pois as lâmpadas emitem radiação em todas as direções e somente parte desta atinge o líquido. Além disso sempre há absorção de ra-

dição ultravioleta, mesmo que pequena, pelo material do tubo e não se pode utilizar tubos de grande diâmetro, pois a penetração de radiação ultravioleta é limitada em esgotos sanitários (efluentes secundários) a alguns centímetros (menor que 10cm) conforme a qualidade do efluente. Para manter a dose exigida é necessário um percurso longo para aumentar o tempo de exposição, exigindo que os tubos sejam montados com trechos em paralelo com comprimento aproximado ao comprimento das lâmpadas.

#### *Lâmpadas instaladas sobre o efluente*

Nesta concepção, as lâmpadas de ultravioleta são fixadas acima do líquido paralelamente ao escoamento, em cúpulas refletoras.

A cúpula deve ser construída com material refletor de ultravioleta, para reduzir as perdas de radiação ultravioleta. O alumínio polido é o metal com maior índice de reflexão de radiação ultravioleta.

É muito importante que o sistema seja coberto de forma a impedir que pessoas venham a receber a radiação ultravioleta, pois poderão ser provocadas lesões graves a ponto de provocar carcinogênese.

Esta concepção apresenta fácil manutenção, pois as lâmpadas de ultravioleta podem ser montadas em módulos independentes, não sendo necessário desligar todo o sistema para realizar a manutenção de um módulo. Além disso, não há necessidade de blindar os circuitos elétricos.

Para instalações de pequeno e médio porte esta concepção é a mais adequada tanto operacional quanto economicamente.

A montagem do circuito elétrico das lâmpadas de ultravioleta segue o esquema apresentado na Figura 7.

#### **Aspectos de Dimensionamento das Unidades de Desinfecção**

No presente artigo procurar-se-ão apresentar algumas sugestões relativas a projeto baseado na terceira alternativa de concepção citada no subitem anterior, "Concepções construtivas de unidades de desinfecção com radiação ultravioleta".

O dimensionamento de unidades de desinfecção com radiação ultravioleta é feito utilizando como parâmetros o consumo de energia elétrica por m<sup>3</sup> de despejo (densidade de potência - W h/m<sup>3</sup>), a espessura da lâmina líquida e o tempo de exposição.

Sampaio<sup>(16)</sup> apresenta equações relacionando a fração sobrevivente com a densidade de potência para lâminas de 3,0; 6,0 e 8,0cm e coeficiente de extinção de 0,56cm<sup>-1</sup>.

Resultados obtidos por Daniel<sup>(5)</sup> indicam que no dimensionamento deve ser considerada a influência de sólidos suspensos totais e a influência da fotoreativação dos microrganismos parcialmente inativados, devendo-se aumentar a dose (densidade de potência) principalmente para reduzir o efeito da fotoreativação. Este aumento depende da dose aplicada e é maior quanto menor é a dose. Por exemplo, para a lâmina de 6,0cm de espessura, intensidade de radiação ultravioleta nominal aplicada de 26,67 mW/cm<sup>2</sup>, dose média de 67,34 a 202,02 Wh/m<sup>3</sup> e sólidos suspensos totais de 6,0 a 24,0 mg/l, o aumento máximo na dose para anular o efeito da fotoreativação foi de aproximadamente 62%.

A quantidade de lâmpadas de ultravioleta necessárias podem ser calculada pela equação (5):

$$n = \frac{QD}{P}$$

n : número de lâmpadas de ultravioleta;

Q : vazão em m<sup>3</sup>/h;

D : densidade de potência (Wh/m<sup>3</sup>);

P : potência nominal da lâmpada (W)

A dose aplicada é diretamente dependente do tempo de exposição e da intensidade de radiação ultravioleta, os quais estão implícitos na densidade de potência.

As dimensões da unidade de desinfecção são determinadas de acordo com a densidade de potência necessária para satisfazer a eficiência desejada, o tempo de exposição e a espessura da lâmina líquida adotados. O tempo de exposição deve variar geralmente de 60 a 100 segundos e a espessura da lâmina líquida deve ser inferior a 10,0cm, dependendo da qualidade dos efluentes (concentração de sólidos suspensos totais e absorvância).

Seja, por exemplo, o pré-dimensionamento de uma unidade de desinfecção para efluentes secundários de estação de tratamento de esgotos sanitários com concentração de sólidos suspensos totais inferior a 10,0 mg/L, coeficiente de extinção inferior a 0,50 cm<sup>-1</sup>, lâmpadas de 30 W de potência nominal e vazão de 180 m<sup>3</sup>/h.

Adotando-se densidade de potência de 88 Wh/m<sup>3</sup>, já incluído aumento de 60% para reduzir o efeito da fotoreativação, espera-se que a fração de microrganismos indicadores sobreviventes (coliformes totais) seja inferior a 0,001, ou seja, eficiência de remoção superior a 99,9.

Pela equação(5) obtém-se a quantidade de lâmpadas:

$$n = \frac{180 \times 88}{30} = 528 \text{ lâmpadas}$$

Fixando o tempo de exposição em 80 segundos e espessura da Lâmina Líquida em 8,0 cm obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{volume da unidade de desinfecção: } & 4,0 \text{ m}^3 \\ \text{área da unidade de desinfecção: } & 50,0 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

A unidade de desinfecção pode ter, por exemplo, a forma retangular com comprimento igual ao número de lâmpadas em série. O comprimento das lâmpadas é padronizado pelo fabricante e varia com a potência da lâmpada. Normalmente as lâmpadas de 30 W têm 90 cm de comprimento total.

Sempre que possível, a unidade de desinfecção deverá ser dividida em módulos, que facilitarão a manutenção da mesma.

Adotou-se quatro módulos com as seguintes dimensões (Figura 8):

Largura :	2,30 m
Comprimento :	5,40 m
Número de lâmpadas por módulo :	132
Número de filas :	6
Número de lâmpadas por fila :	22
Espaçamento entre lâmpadas:	10,5 cm

A potência do reator ao qual cada lâmpada deve estar ligada é de 40 W. Portanto o consumo de energia será de 21,12 KWh.

A absorvância e a concentração de sólidos suspensos totais dos efluentes a serem desinfetados são difíceis de serem previstos em sistemas de tratamento biológico a serem implantados. Nos sistemas já em operação estes parâmetros poderão ser medidos.

Nos dois casos é importante construir e operar uma instalação piloto antes de se realizar o dimensionamento da unidade de desinfecção, com o objetivo de otimizar o sistema com relação à combinação custo-eficiência de desinfecção.

Os custos de execução, operação e manutenção variam de forma acentuada em função da variação da densidade de potência, Lâmina Líquida e tempo de exposição para o mesmo despejo. Com a instalação piloto é possível variar estes parâmetros, obtendo-se a combinação mais econômica, sem reduzir a eficiência de desinfecção necessária.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 — Borup, M. B. e Adams, V. D. — "Upgrading Wastewater Lagoon Effluents with UV/Sedimentation Process" *JWPCF*, 57(3):196-200, 1985.
- 2 — Bull, R. J. — "Health Effects of Alternative Disinfectants and Their Reaction Products", *JAWWA*, 72(5):299-303, 1980.
- 3 — Campos, J. R. e Pizzirani, J. A. — *Desinfecção com Radiação Ultravioleta*. 9º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 1977, 19p.
- 4 — Cortelyou, J. R. — "The Effects of Ultraviolet Irradiation on Large Populations of Certain Water-Borne Bacteria in Motion. II — Some Physical Factors Affecting the Effectiveness of Germicidal Ultraviolet Irradiation". *Applied Microbiology* 2:269-273, 1954.
- 5 — Daniel, L. A. — *Desinfecção de Efluentes de Esgoto Sanitário Pré-Decantado Empregando Radiação Ultravioleta*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo — EESC-USP, 1989, 124 p., Dissert. (Mestr. Hidr. San.) EESC-USP.
- 6 — Dulbecco, R. — "Reactivation of Ultra-Violet Inactivated Bacteriophage by Visible Light", *Nature*, 163(4155):949-950, 1949.
- 7 — Harris, G. D. et alii — "Ultraviolet Inactivation of Selected Bacteria and Viruses with Photoreactivation of Bacteria", *Water Research*, 21(6):687-692, 1987.
- 8 — Huff, C. B. et alii — "Study of Ultraviolet Disinfection of Water and Factors in Treatment Efficiency" *Public Health Reports*, 80(8):695-705, 1965.
- 9 — Jagger, J. "Photoreactivation", *Bact. Reviews*, 22:99-142, 1958.
- 10 — Koller, L. R. — *Ultraviolet Radiation*, London, John Wiley & Sons, 1952, 270 p.
- 11 — Morowitz H. J. — Absorption Effects in Volume Irradiation of Microorganisms" *Science*, 111(3):229-230, 1949.
- 12 — Oliver, B. e Carey, J. H. — "A Scale-Up Investigation of Ultraviolet Disinfection as an Alternative to Chlorination for Sewage Effluents", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 53(12):711-712, 1975.
- 13 — Oliver, B. e Carey, J. H. — "Ultraviolet Disinfection — An Alternative to Chlorination" *JWPCF* 48(11):2619-2624, 1976.
- 14 — Phillips, R. — *Sources and Applications of Ultraviolet Irradiation* London, Academic Press, 1983, 434 p.
- 15 — Qualls, R. e Johnson, J. D. — "Modeling and Efficiency of Ultraviolet Disinfection Systems", *Water Research*, 19(8):1039-1046, 1985.
- 16 — Sampaio, A. O. — *Desinfecção de Esgotos Sanitários com Utilização de Radiação Ultravioleta*, São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - EESC-USP, 1985, 96 p., Dissert. (Mestr. Hidr. San.) EESC-USP.
- 17 — Scheible, O. K. — "Development of a Rationally Based Design Protocol for the Ultraviolet Light Disinfection Process", *JWPCF*, 59(1):25-31, 1987.
- 18 — *Standad Methods for the Examination of Water and Wastewater* 16th ed., New York, 1985.
- 19 — White, S. C. et alii — "A Study of Operational Ultraviolet Disinfection Equipment at Secondary Treatment Plants", *JWPCF*, 58(3):181-192, 1986.
- 20 — YIP, R. W. e Konasewich, D. E. — "Ultraviolet Sterilization of Water — Its Potential and Limitations", *Water Pollution Control*, 14-18, 1972.

**Tabela 1**  
Inativação e fotorreativação de coliformes totais para a lâmina líquida de 2,0 cm

TEMPO DE EXPOSIÇÃO (s)	COLIFORMES NO AFLUENTE	TOTAIS NO SF	POR 100 EFLUENTE CF	ml CONTROLE	ST (mg/L)	SST (mg/l)
20	2.900.000	110.000	> 110.000	46.000	67,6	39,0
40	150.000	73	30	150	104,0	8,0
40	2.400.000	230	4.600	150	—	—
40	4.600.000	11.000	1.500	750	197,0	25,0
60	43.000	4.600	440	2.100	169,0	35,0
80	210.000	230	430	230	115,0	11,0
120	460.000	230	230	210	130,0	7,0

SF : Sem fotorreativação      ST : Sólidos totais  
CF : Com fotorreativação      SST : Sólidos suspensos totais

**Tabela 2**  
Inativação e fotorreativação de coliformes totais para a lâmina líquida de 3,0 cm

TEMPO DE EXPOSIÇÃO (s)	COLIFORMES NO AFLUENTE	TOTAIS NO SF	POR 100 EFLUENTE CF	ml CONTROLE	ST (mg/L)	SST (mg/l)
40	24.000	1.100	1.100	2.900	115,1	15,6
60	36.000	73	440	200	82,5	8,7
80	28.000	930	140	91	113,8	12,6
80	150.000	73	210	930	81,0	2,3
120	460.000	73	0	36	5,8	4,0
120	93.000	36	36	91	—	10,8

SF : Sem fotorreativação      ST : Sólidos totais  
CF : Com fotorreativação      SST : Sólidos suspensos totais

**Tabela 3**  
Inativação e fotorreativação de coliformes totais para a lâmina líquida de 2,0 cm

TEMPO DE EXPOSIÇÃO (s)	COLIFORMES NO AFLUENTE	TOTAIS NO SF	POR 100 EFLUENTE CF	ml CONTROLE	ST (mg/L)	SST (mg/l)
40	240.000	350	11.000	2.400	74,8	13,6
40	460.000	7.500	21.000	110.000	26,8	2,5
60	29.000	4.600	11.000	11.000	139,2	10,8
80	24.000	930	2.400	430	34,7	9,9
120	460.000	430	150	430	209,4	16,2

SF : Sem fotorreativação      ST : Sólidos totais  
CF : Com fotorreativação      SST : Sólidos suspensos totais

**Tabela 4**  
Inativação e fotorreativação de coliformes totais para a lâmina líquida de 6,0 cm

TEMPO DE EXPOSIÇÃO (s)	COLIFORMES NO AFLUENTE	TOTAIS NO SF	POR 100 EFLUENTE CF	ml CONTROLE	ST (mg/L)	SST (mg/l)
40	460.000	24.000	110.000	110.000	132,4	15,3
40	240.000	110.000	146.000	110.000	205,9	24,0
60	460.000	46.000	110.000	46.000	117,3	20,8
80	460.000	750	930	930	119,8	-6,0
120	2.400.000	36.000	460.000	—	—	21,3
120	460.000	750	11.000	1.500	154,4	13,9

SF : Sem fotorreativação      ST : Sólidos totais  
CF : Com fotorreativação      SST : Sólidos suspensos totais

Figura 1  
Instalação piloto

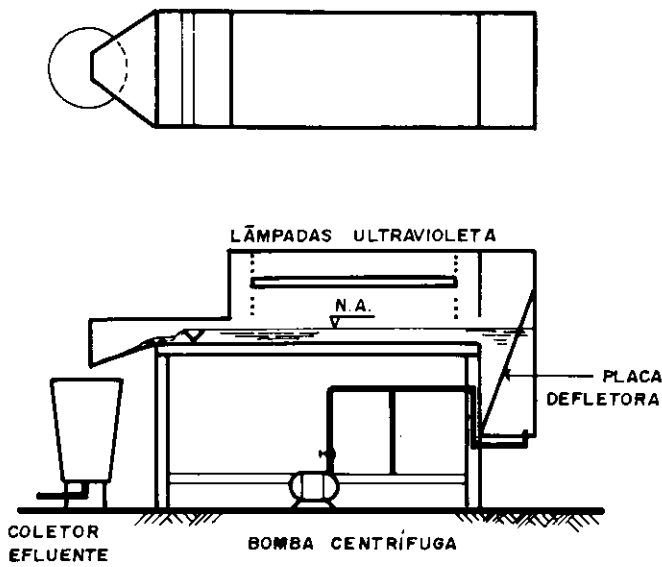


Figura 2

Inativação de coliformes totais para a lâmina de 2,0 cm

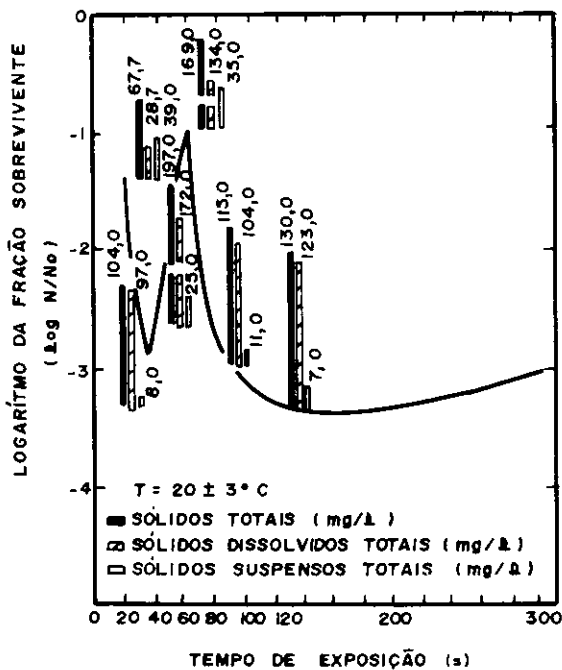


Figura 3

Inativação de coliformes totais para a lâmina de 3,0 cm

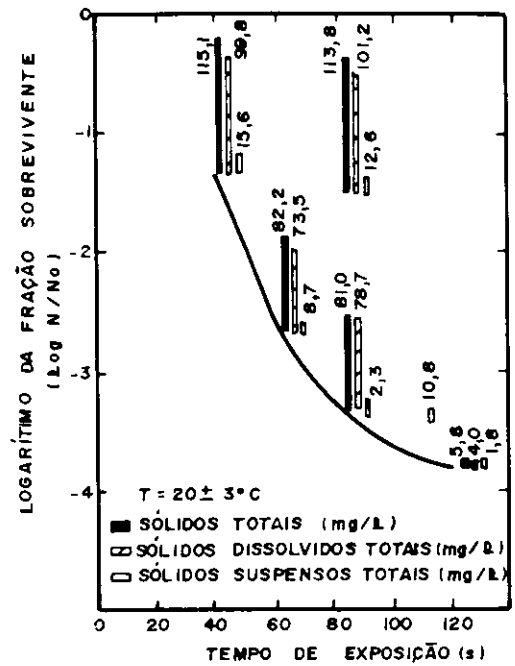


Figura 4

Inativação de coliformes totais para a lâmina de 4,0 cm

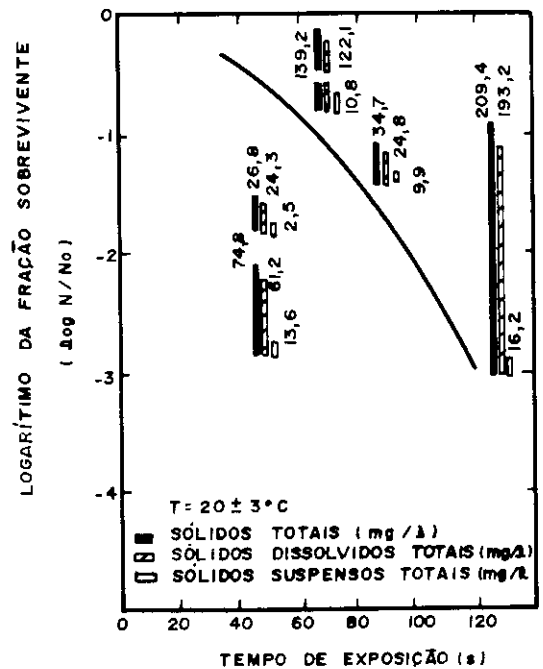


Figura 5

Inativação de coliformes totais para a lâmina de 6,0 cm

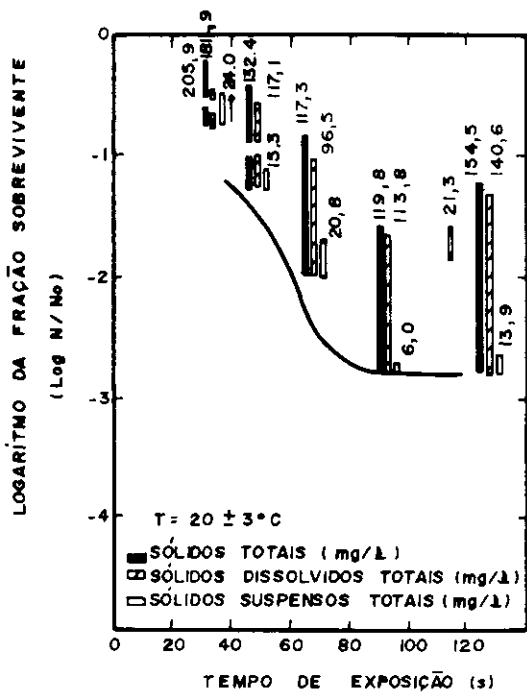


Figura 6

Curvas de sobrevivência: I — no escuro, II — após máxima fotorreativação, III — FRD — relação entre a dose de ultravioleta para uma dada sobrevivência no escuro (ordenada direita) e a dose produzindo a mesma sobrevivência após fotorreativação (abscissa)

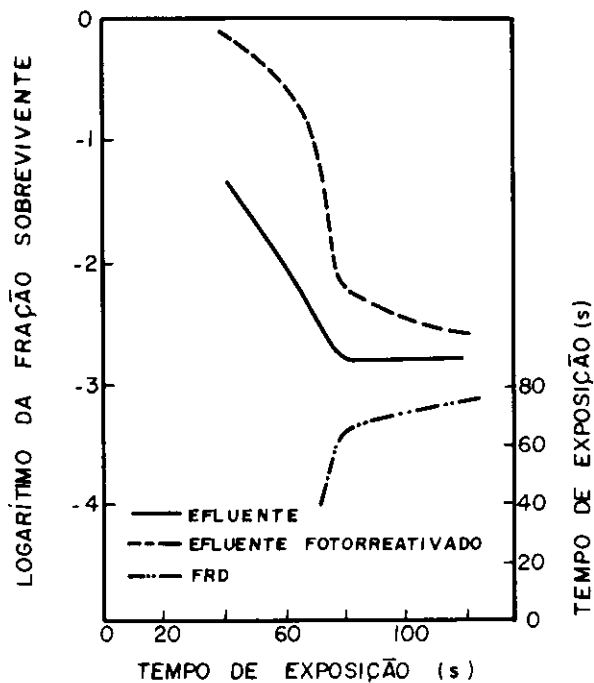


Figura 7.

Circuito elétrico para acionamento das lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio (lâmpadas de ultravioleta)

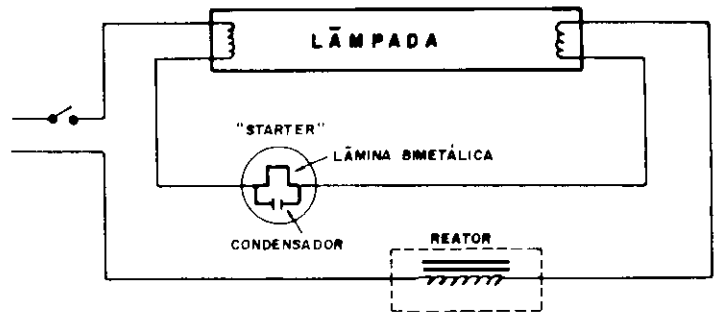


Figura 8

Unidade de desinfecção com radiação ultravioleta (sem escala)

