

## DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM FOTORREATOR SIMPLIFICADO DE RADIAÇÃO UV PARA INATIVAÇÃO DE COLIFORMES E OVOS DE HELMINTOS EM ESGOTOS TRATADOS

João Carlos de Castro Silva, Carlos Augusto de Lemos Chernicharo<sup>(1)</sup>,  
Adriana Molina Zerbini, Valéria Martins Godinho e Jacson Laufer

<sup>(1)</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental,  
Av. Contorno, 842/701-30110-060, Belo Horizonte - MG, E-mail: calemos@desa.ufmg.br

### RESUMO

Esta pesquisa avaliou a aplicabilidade de um fotorreator simplificado de radiação ultravioleta, para a inativação de coliformes totais, *Escherichia coli* e ovos de *Ascaris lumbricoides*. O fotorreator, com volume de 2,2 L e confeccionado com tubo de PVC diâmetro de 100 mm, foi equipado com uma lâmpada imersa, de baixa pressão de mercúrio, com potência de 15 W. O fotorreator foi testado para a desinfecção de efluentes de um filtro biológico percolador e de um reator UASB, ambos alimentados com esgoto doméstico proveniente do interceptor de esgotos do ribeirão Arrudas, na cidade de Belo Horizonte. Os resultados obtidos demonstraram a aplicabilidade dos fotorreatores para a desinfecção de esgotos tratados, tendo sido observadas elevadas eficiências médias de inativação de coliformes totais e de *E. coli*, na faixa entre 4 e 5 unidades logarítmicas, para doses variando entre 13,6 e 102,43 mW.s.cm<sup>-2</sup>. A exposição à radiação ultravioleta afetou, significativamente, o desenvolvimento dos ovos de *Ascaris*, sendo que os melhores resultados foram obtidos para doses entre 13,6 e 20,3 mW.s.cm<sup>-2</sup>, quando apenas cerca de 10% dos ovos completaram o desenvolvimento até a etapa de larva.

### PALAVRAS CHAVE

Desinfecção, filtro biológico percolador, fotorreator, reator UASB, ultravioleta

### INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco décadas, o Brasil sofreu um processo de urbanização acelerada. Atualmente, mais de 80 % da população vivem em cidades, sendo que cerca de 60 % nas regiões metropolitanas. As periferias das grandes cidades brasileiras, principalmente as regiões metropolitanas, destacam-se entre as áreas com maior crescimento demográfico e com os maiores problemas relacionados à falta de saneamento básico.

Dentre esses problemas, diversas infecções adquiridas pelos seres humanos têm origem na contaminação por esgotos sanitários de mananciais de água usados para o consumo ou para recreação. Considerando que as cidades brasileiras, em sua grande maioria, são abastecidas por mananciais superficiais e que 90% dos esgotos coletados por rede coletora pública, retornam ao ambiente sem sofrer qualquer tipo de tratamento, podemos concluir que a população brasileira, em sua grande maioria, está exposta às doenças de veiculação hídrica (Ver Tabela 1).

A Organização Mundial da Saúde estima que 25 % de todos os leitos hospitalares do mundo estão ocupados por pessoas com doenças veiculadas pela água. Dentre essas doenças, destacam-se as diarreias e disenterias (criptosporidiose, diarreia por *Escherichia coli*, diarreia por rotavírus,

salmonelose, disenteria bacilar, giardíase, cólera, balantíase, disenteria amebiana, enterite campylobacteriana), febre tifóide e paratifóide, poliomielite, hepatite A, leptospirose, ascaridíase e tricuriase (LIMA & KOLLNBERGER, 1998).

Tabela 1 - Microrganismos presentes nos esgotos domésticos brutos

Microrganismo	Contribuição <i>per capita</i> (org/hab.d)	Concentração (org/100mL)
Bactérias totais	$10^{12}$ a $10^{13}$	$10^9$ a $10^{10}$
Coliformes totais	$10^9$ a $10^{12}$	$10^6$ a $10^9$
<i>Escherichia coli</i>	$10^8$ a $10^{11}$	$10^5$ a $10^8$
Estreptococos fecais	$10^8$ a $10^9$	$10^5$ a $10^6$
Cistos de protozoários	$< 10^6$	$< 10^3$
Ovos de helmintos	$< 10^6$	$< 10^3$
Vírus	$10^5$ a $10^7$	$10^2$ a $10^4$

Fonte: VON SPERLING (1996)

Diferente dos métodos de desinfecção que utilizam produtos químicos como, por exemplo, o cloro, a radiação ultravioleta não adiciona produtos ao esgoto. Sendo assim, não há residual desinfetante e a ação da radiação só é efetiva enquanto a fonte estiver ligada ou o líquido estiver passando pelo fotorreator. Essa característica constitui uma das principais vantagens no caso da desinfecção de esgotos, pois reduz-se a potencialidade de formação de subprodutos. Entretanto, representa limitação para desinfecção de água, pois, em caso de contaminação na rede de distribuição, não há como garantir a inativação dos microrganismos, como ocorre com a desinfecção com cloro, que mantém residual desinfetante. Todavia, para a particularidade do esgoto sanitário é vantajosa, pois não há necessidade de remoção de residual que estaria causando impacto negativo à biota do corpo d'água receptor.

A desinfecção com radiação ultravioleta é um mecanismo físico, no qual a energia ultravioleta é absorvida pelos diferentes componentes orgânico-moleculares essenciais ao funcionamento normal das células (HUFF et al., 1965, citado por CHERNICHARO et al., 2001). A ação germicida da radiação UV está associada às alterações estruturais que esta provoca no DNA das células, consequência de reações fotoquímicas desencadeadas pela absorção da radiação pelas moléculas que constituem o DNA. Ao ocorrer o processo natural de divisão celular com a duplicação do DNA, a estrutura formada pela absorção de radiação ultravioleta não é reconhecida, o que interrompe o processo de duplicação. Assim, a célula pode manter temporariamente as atividades metabólicas, mas não consegue se reproduzir. Por isso diz-se que ocorre a inativação e não a morte do microrganismo.

A absorção de radiação UV pelas células é máxima na faixa de 255 a 260 nm. As lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio, as quais emitem aproximadamente 85% de sua energia no comprimento de onda de 253,7 nm, são a fonte de radiação UV mais eficiente e efetiva para os sistemas de desinfecção.

Um problema real associado ao uso de fotorreatores no tratamento de esgoto é a baixa penetração de luz devido ao alto teor de material orgânico, o que acarreta um comprometimento da eficiência deste processo. Tal problema tem sido apontado como o mais forte argumento contra a implantação e uso da radiação ultravioleta no tratamento destes efluentes. Entretanto, o recente desenvolvimento de novas tecnologias, voltadas para o tratamento de esgotos, tem resultado em substancial diminuição de resíduos orgânicos contidos nos efluentes. Dessa forma, o uso de fotorreatores torna-se tecnicamente viável e com potencialidade real de melhoria da qualidade final do efluente dos reatores UASB, objetivando a destruição de patógenos.

O objetivo específico desta pesquisa foi o de desenvolver um fotorreator simplificado de desinfecção UV e avaliar a sua eficiência na inativação de coliformes totais, *Escherichia coli* e ovos de *Ascaris lumbricoides*, em efluentes de um filtro biológico percolador (FBP) e de um reator UASB.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Aparato Experimental

Os experimentos com o fotorreator (FR) foram desenvolvidos no Laboratório de Instalações Piloto (LIP) do DESA/UFGM. O FR foi implantado a jusante de um sistema de tratamento anaeróbio/aeróbio de esgotos, composto de reator UASB e filtro biológico percolador (FBP). O sistema foi alimentado com esgoto sanitário proveniente do interceptor da margem direita do ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte/MG. Antes de alimentar os reatores, o esgoto sanitário passava por um sistema de tratamento preliminar, composto de cesto coletor e caixa de areia, para remoção do material grosseiro e areia, sendo depois encaminhado a um tanque de acumulação/distribuição, de onde era bombeado para o reator UASB e depois para o FBP e, seqüencialmente, para o FR.

O fotorreator utilizado consistiu de uma unidade tubular, construída com tubo PVC tipo esgoto, de diâmetro nominal 100 mm, com 45 cm de altura total. No eixo da tubulação foi adaptada uma lâmpada de vapor de mercúrio de baixa pressão, potência nominal de 15 W. O esgoto proveniente do sistema UASB/FBP ganhava a câmara de desinfecção pela parte inferior do reator e saía pela parte superior (ver Figura 2). As principais características das unidades que compunham o aparato experimental são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, enquanto a Figura 1, mostra o fluxograma do sistema.

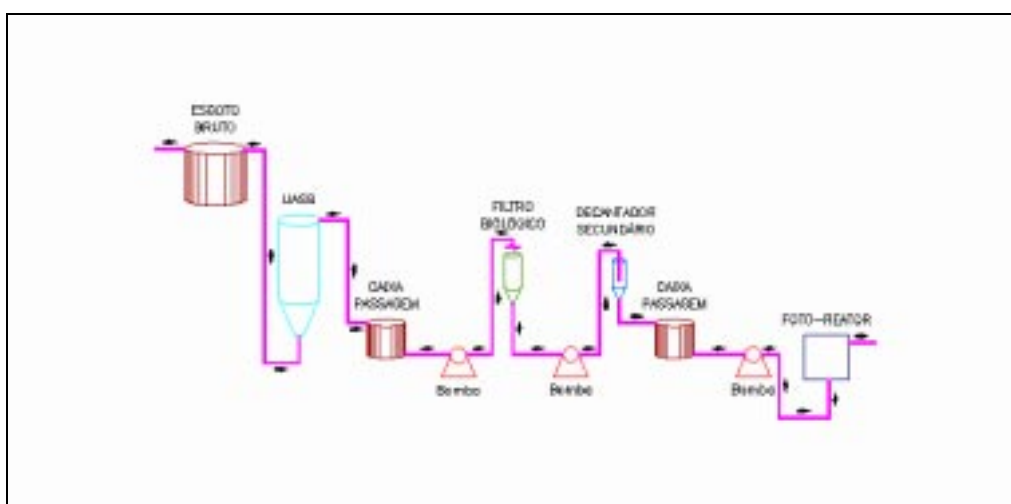


Figura 1 - Fluxograma do aparato experimental

(Nota: Nas fases 7 e 8 da pesquisa o FR foi implantado a jusante do reator UASB)

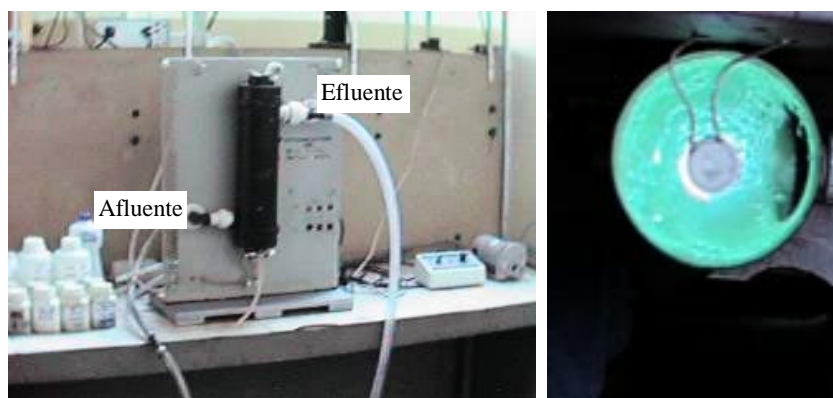


Figura 2 – Vista frontal (esquerda) e superior interna (direita) do fotorreator

Tabela 3 - Principais características do fotorreator

▪ Volume de reação: 2,20 L	▪ Potência da lâmpada: 15 W
▪ Geometria: cilíndrica	▪ Potência de radiação a 253,7 nm: 3,6 W
▪ Material da câmara de desinfecção: PVC	▪ Marca: Philipps
▪ Altura total: 45 cm	▪ Modelo: G15T8
▪ Diâmetro externo: 100 mm	▪ Área média irradiada: 537,4 cm <sup>2</sup>
▪ Diâmetro interno: 98 mm	▪ Profundidade média da lâmina: 4,09 cm
▪ Diâmetro da lâmpada: 26 mm	▪ Sentido do fluxo: paralelo à lâmpada

### Fases e condições operacionais da planta piloto

A planta piloto, composta de reator UASB, filtro biológico percolador (FBP) e fotorreator UV (FR), foi avaliada durante oito fases operacionais, com a verificação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos. As características operacionais do reator UASB foram mantidas constantes durante todo o período operacional, sendo operado com um tempo de detenção hidráulica médio de 4 horas (velocidade ascensional média igual a 1,4 m.h<sup>-1</sup>). Já para o FBP, as características operacionais foram diferentes na fase 1, em relação às demais fases. As taxas de aplicação superficial, tanto no compartimento de reação quanto no de decantação, foram de 20,3 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (fase 1) a 30,6 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (fases 2 a 8).

Em relação ao FR, este foi operado em dois diferentes estágios da planta piloto. Durante as fases 1 a 6 o FR foi operado a jusante do FBP, recebendo, portanto, um efluente com menores teores de sólidos em suspensão. Os testes com o FR iniciaram-se com a operação do mesmo com tempos de detenção hidráulica ( $\theta_h$ ) bastante elevados, da ordem de 300 s, correspondentes a doses<sup>1</sup> da ordem de 100 mW.s.cm<sup>-2</sup> (fases 1 e 2). Posteriormente, foi avaliada a eficiência do FR para doses menores, que foram conseguidas impondo-se maiores vazões de alimentação ao FR, chegando-se ao  $\theta_h$  mínimo de 20 s, correspondente à dose de 6,7 mW.s.cm<sup>-2</sup> (fase 6). O resumo das principais características das fases operacionais da pesquisa é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais características das fases operacionais do sistema de tratamento

Fase	Características operacionais do FR			Taxa de aplicação superficial	
	$\theta_h$ (s)	$I_M$ (mW.cm <sup>-2</sup> )	Dose ( $I_M \times \theta_h$ ) (mW.s.cm <sup>-2</sup> )	FBP (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	reator UASB (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )
1	300	0,338	101,4	20,3	-
2	300	0,338	101,4	30,6	-
3	150	0,338	50,7	30,6	-
4	60	0,338	20,9	30,6	-
5	40	0,338	13,6	30,6	-
6	20	0,338	6,7	30,6	-
7	60	0,338	20,3	-	33,6
8	40	0,338	13,6	-	33,6

$\theta_h$ : tempo de detenção hidráulica (tempo de exposição)

### Monitoramento da planta piloto

A planta piloto foi monitorada durante as oito fases operacionais, com a avaliação dos seguintes parâmetros físico-químicos e microbiológicos principais: temperatura, pH, sólidos suspensos totais, DQO, coliformes totais, *Escherichia coli* e ovos de *Ascaris lumbricoides*. Todas as análises, exceto ovos de helmintos, vêm sendo realizadas de acordo com os procedimentos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20<sup>a</sup>. ed.

<sup>1</sup> A dose é o produto da taxa de liberação de energia pela lâmpada (intensidade) pelo tempo de exposição a essa intensidade.

(AWWA/APHA/WEF, 1998). Para as análises de coliformes totais e *Escherichia coli*, vem sendo empregada a técnica de substrato cromogênico (Colilert).

#### Coliformes totais e *Escherichia coli*

Para o monitoramento de coliformes fecais e *Escherichia coli* na planta piloto, foram coletadas amostras do esgoto bruto e dos efluentes do reator UASB, do FBP e do FR, compostas no período de 9:00 às 12:00 h. Foram realizadas dez coletas por cada fase operacional.

A lâmpada UV permanecia ligada por 15 minutos, antes do início de cada coleta, com o FR ainda vazio. Após esse período de aquecimento da lâmpada, os efluentes do FBP (fases 1 a 6) e do reator UASB (fases 7 e 8) eram bombeados para o fotorreator. Quando o mesmo entrava em regime de funcionamento em fluxo contínuo, eram descartados os primeiros 20 litros do efluente e, posteriormente, eram coletados 10 litros para análise. Após a coleta, era feita a limpeza da lâmpada, com água corrente e esponja.

#### Ovos de *Ascaris lumbricoides*

Para avaliar a eficácia da radiação ultravioleta, em relação à viabilidade de ovos de *Ascaris lumbricoides*, foram realizados três experimentos, com a aplicação de diferentes doses de inativação, conforme apresentado na Tabela 5.

Para o desenvolvimento dos experimentos, tornou-se necessária a implementação de um rotina de trabalho bastante ampla, que envolveu desde a coleta de vermes adultos de *Ascaris lumbricoides*, retiradas de fezes de crianças infectadas, até a extração dos ovos do útero das fêmeas adultas. Estes ovos foram então homogeneizados, resultando em uma suspensão que foi posteriormente centrifugada e lavada com água destilada, para posterior preservação a 4 °C.

O passo seguinte foi a inoculação de uma alíquota dos ovos de *Ascaris*, em uma caixa contendo 100 L do efluente do FBP, almejando-se conseguir uma concentração final superior a 100 ovos/L (preferencialmente da ordem de 300 ovos/L). Esta concentração elevada objetivou facilitar a recuperação, e posterior observação, de uma quantidade representativa de ovos de *Ascaris*. O esgoto no interior da caixa foi mantido continuamente misturado, a fim de evitar a sedimentação dos ovos. Da caixa, o esgoto era então bombeado para o fotorreator, de acordo com as características operacionais apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais características dos experimentos de inativação de ovos de *Ascaris*

Experimento	Características operacionais do FR		
	$\theta_h$ (s)	$I_M$ (mW.cm <sup>-2</sup> )	Dose ( $I_M \times \theta_h$ ) (mW.s.cm <sup>-2</sup> )
1	60	0,338	20,3
2	40	0,338	13,6
3	20	0,338	6,7

Após o fotorreator atingir o regime de operação em fluxo contínuo, os primeiros 20 L do efluente foram descartados, correspondendo a aproximadamente 10 vezes o volume do fotorreator. Posteriormente, foram recolhidas amostras do afluente (caixa de 100 L) e do efluente do FR, para processamento pela *técnica de incubação* adaptada (ZERBINI & CHERNICHARO, 2001), conforme procedimentos descritos a seguir:

- Coletar uma amostra de esgoto de volume conhecido ( $V_i = 5$  litros).
- Deixar a amostra sedimentar em um balde por um período de 24 horas. Remover o sobrenadante usando uma bomba de sucção ou um sifão, garantindo que fique no recipiente um volume de aproximadamente 1L.
- Transferir, cuidadosamente, o sedimento para os tubos da centrífuga, enxaguando o balde com solução Triton X-100 ou Tween 80.
- Distribuir a amostra em frascos de centrífuga e proceder à centrifugação a 1.000 g durante 5 minutos.
- Descartar o sobrenadante, ressuspender os sedimentos em solução salina (NaCl a 0,85%).

- f) Agitar com o equipamento tipo Vortex.
- g) Centrifugar novamente a 1.000 g durante 5 minutos e descartar o sobrenadante; repetir o procedimento até obter um sobrenadante claro.
- h) Após descartar o sobrenadante da última etapa de centrifugação, transferir todo o sedimento restante para um tubo de centrífuga de 50 mL de capacidade. Utilizar solução de sulfato de zinco para auxiliar na lavagem do tubo e transferência do sedimento.
- i) Adicionar mais solução de sulfato de zinco, até completar o volume de 25 mL, e agitar com Vortex. Completar novamente com sulfato de zinco até obter o volume final de 50 mL e agitar novamente com Vortex. Centrifugar a 1.000 g durante três minutos.
- j) Transferir o sobrenadante para o recipiente de filtração a vácuo e proceder à filtração em membrana de 47 mm e porosidade de 0,45 µm.
- k) Ao término da filtração, retirar a membrana e raspar o material retido, com o auxílio de uma lamínula, para uma placa de Petri contendo 10 mL de ácido sulfúrico a 0,1 N.
- l) Envolver a placa com papel alumínio e colocá-la em uma incubadora a 28 °C, onde deverá permanecer durante 28 dias. É necessário que se proceda uma aeração da placa em dias alternados. Quando da aeração, verificar se ocorreu evaporação parcial do volume do conteúdo da placa de Petri e completar com ácido sulfúrico, caso necessário.
- m) Após 28 dias, retirar uma alíquota bem homogeneizada da amostra final, com o auxílio de uma pipeta de Pasteur, e transferir para a câmara de Sedgewick Rafter. Examinar no microscópio, em objetivas de 10x ou 40x, e contar os ovos viáveis (com larva) e não viáveis. Para uma melhor representatividade dos resultados, deve-se fazer a leitura de mais de uma câmara, preferencialmente três, e calcular a média aritmética das contagens obtidas.

*Nota: antes de retirar as alíquotas do conteúdo da placa, para contagem na câmara de Sedgewick Rafter, medir o volume total do conteúdo da placa ( $V_f$ ).*

O número final de ovos viáveis e não viáveis da amostra de esgotos foi calculado por meio da Equação 1:

$$N = \frac{(N_c \times V_f)}{(V_i \times V_v)} \quad (1)$$

na qual:

N: número de ovos (ovos/litro)

$N_c$ : número médio de ovos contados nas câmaras de Sedgewick Rafter (nº de ovos)

$V_f$ : volume do conteúdo final da placa de Petri (mL)

$V_c$ : volume da câmara de Sedgewick Rafter (1 mL)

$V_i$ : volume original da amostra (ver procedimento "a")

Paralelamente à incubação dos ovos recuperados das amostras de esgotos que foram inoculadas, foi também incubada uma alíquota, em duplicata, dos ovos retirados da fêmea de *Ascaris* (que constituiu o controle), diretamente para uma placa de Petri contendo 10 mL de ácido sulfúrico a 0,1 N. A partir desta etapa, foram mantidos os procedimentos “l” e “m”, descritos anteriormente.

### Ensaio de actinometria e determinação da dose de radiação UV

Para a determinação da intensidade média de radiação ultravioleta, relativa ao volume do líquido no fotorreator, foi utilizado o ferroxalato de potássio, uma substância actinométrica que sofre reações fotoquímicas em comprimentos de onda específicos (DANIEL & CAMPOS, 1993). A dose média, por volume de líquido irradiado, foi calculada pela Equação 2.

$$D = \frac{[Fe^{2+} molar_{final}] - [Fe^{2+} molar_{inicial}] \times 4,719 \times 10^3 \times L}{1,26 moles} \quad (2)$$

na qual:

D: dose média de radiação ultravioleta (mW.s.cm<sup>-2</sup>)

L: espessura da lâmina líquida ou trajetória percorrida pela radiação ultravioleta (4,01 cm)

A concentração de  $\text{Fe}^{2+}$ , resultante da radiação UV sobre a solução de ferroxalato de potássio, é relacionada à absorbância da amostra irradiada a 510 nm. Assim, foi construída uma curva de calibração, para determinar a concentração de  $\text{Fe}^{2+}$  nas amostras dos ensaios de actinometria, através da leitura de seus valores de absorbância a 510 nm.

## RESULTADOS

### Remoção e inativação de coliformes totais e *Escherichia coli*

Os resultados médios relativos a coliformes totais, *Escherichia coli* e sólidos suspensos, no esgoto bruto e nos efluentes do reator UASB, do FBP e do FR-UV, nas oito fases operacionais e diferentes etapas do tratamento, são apresentados na Tabela 6. Já a distribuição dos resultados de *Escherichia coli* durante as oito fases operacionais, com indicação dos valores mínimo, máximo, quartil inferior (25%), quartil superior (75%) e mediana, é apresentada nas Figuras 3 a 10.

Tabela 6 – Resultados médios de coliformes totais, *Escherichia coli* e sólidos suspensos nas diferentes fases operacionais

Fases	Parâmetros	Concentrações no esgoto bruto e nos efluentes				Eficiências de remoção e de inativação (%)		
		Esgoto bruto	Reator UASB	FBP	FR-UV	Reator UASB	Sistema UASB/FBP	FR-UV
1	SST (mg/L)	-	-	39	24	-	-	-
	CT (NMP/100 mL)	$4,3 \times 10^8$	$1,1 \times 10^8$	$1,1 \times 10^8$	$1,3 \times 10^3$	97	97	99,9998
	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$7,4 \times 10^8$	$3,1 \times 10^7$	$3,1 \times 10^7$	$6,1 \times 10^1$	96	96	99,9998
2	SST (mg/L)	-	-	80	58	-	-	-
	CT (NMP/100 mL)	$3,3 \times 10^9$	$2,0 \times 10^8$	$1,7 \times 10^8$	$1,2 \times 10^4$	94	95	99,9930
	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$6,7 \times 10^8$	$5,1 \times 10^7$	$4,1 \times 10^7$	$1,0 \times 10^3$	92	94	99,9975
3	SST (mg/L)	-	-	40	27	-	-	-
	CT (NMP/100 mL)	$3,2 \times 10^9$	$3,1 \times 10^8$	$1,9 \times 10^8$	$3,0 \times 10^3$	90	94	99,9985
	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$3,3 \times 10^8$	$5,8 \times 10^7$	$5,0 \times 10^7$	$9,5 \times 10^1$	82	85	99,9998
4	SST (mg/L)	-	-	45	37	-	-	-
	CT (NMP/100 mL)	$3,9 \times 10^9$	$9,8 \times 10^7$	$2,1 \times 10^8$	$3,9 \times 10^3$	97	95	99,9981
	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$2,6 \times 10^8$	$2,6 \times 10^7$	$5,0 \times 10^7$	$1,4 \times 10^2$	90	81	99,9997
5	SST (mg/L)	-	-	47	35	-	-	-
	CT (NMP/100 mL)	$7,5 \times 10^9$	$2,8 \times 10^8$	$1,4 \times 10^8$	$6,3 \times 10^3$	96	98	99,9955
	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$9,8 \times 10^8$	$7,4 \times 10^7$	$3,9 \times 10^7$	$1,6 \times 10^3$	92	96	99,9959
6	SST (mg/L)	-	-	29	23	-	-	-
	CT (NMP/100 mL)	$4,3 \times 10^9$	$2,1 \times 10^8$	$9,0 \times 10^7$	$8,1 \times 10^4$	95	98	99,9993
	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$4,2 \times 10^8$	$4,1 \times 10^7$	$1,4 \times 10^7$	$1,5 \times 10^4$	90	97	99,8938
7	SST (mg/L)	-	67	-	68	-	-	-
	CT (NMP/100 mL)	$3,1 \times 10^9$	$1,7 \times 10^8$	-	$8,5 \times 10^3$	94	94	99,9951
	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$4,5 \times 10^8$	$6,4 \times 10^7$	-	$1,8 \times 10^3$	86	86	99,9973
8	SST (mg/L)	-	65	-	62	-	-	-
	CT (NMP/100 mL)	$3,6 \times 10^9$	$1,8 \times 10^8$	-	$2,0 \times 10^4$	95	95	99,9896
	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	$3,6 \times 10^8$	$7,2 \times 10^7$	-	$5,4 \times 10^3$	80	80	99,9926
Média CT (NMP/100 mL)		$4,0 \times 10^9$	$1,8 \times 10^8$	$1,5 \times 10^8$	-	96	96	-
geral <i>E. coli</i> (NMP/100 mL)		$4,8 \times 10^8$	$4,9 \times 10^7$	$4,1 \times 10^7$	-	90	91	-

Os resultados da Tabela 6 mostram que o esgoto bruto apresentou elevadas concentrações de coliformes totais e de *Escherichia coli* em todas as oito fases, com valores médios variando entre  $3,5 \times 10^8$  e  $7,5 \times 10^9$  NMP/100 mL e entre  $2,6 \times 10^8$  e  $9,8 \times 10^8$  NMP/100 mL, respectivamente. As concentrações médias globais de coliformes totais e de *E. coli*, durante todas as fases operacionais, foram iguais a  $4,0 \times 10^9$  NMP/100 mL e  $4,8 \times 10^8$  NMP/100 mL, respectivamente. Adicionalmente aos resultados apresentados na Tabela 6, as Figuras 3 a 10 mostram a distribuição dos resultados de concentrações de *E. coli* ao longo do sistema de tratamento, para as diversas fases operacionais.

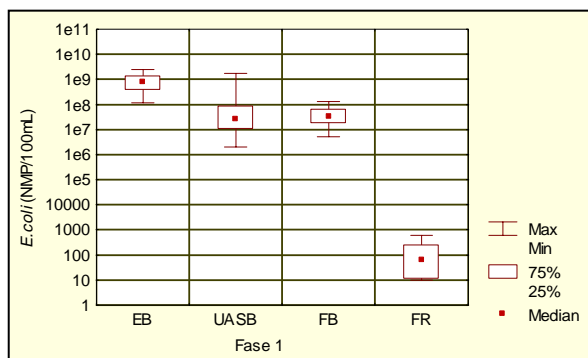


Fig. 3 – Concentrações de *E. coli* no esgoto bruto, efluente UASB, efluente FBP e efluente FR (Fase 1 – Dose = 101,4 mW.s.cm<sup>-2</sup> -  $\theta_h$  = 300 s)

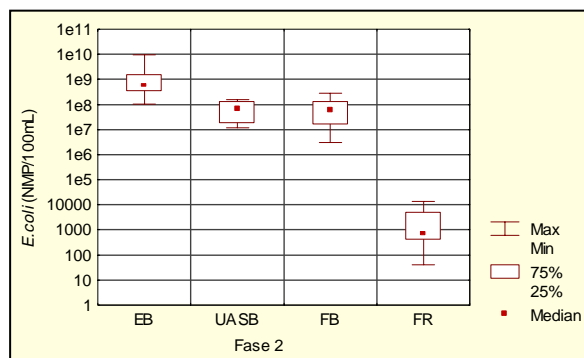


Fig. 4 – Concentrações de *E. coli* no esgoto bruto, efluente UASB, efluente FBP e efluente FR (Fase 2 – Dose = 101,4 mW.s.cm<sup>-2</sup> -  $\theta_h$  = 300 s)

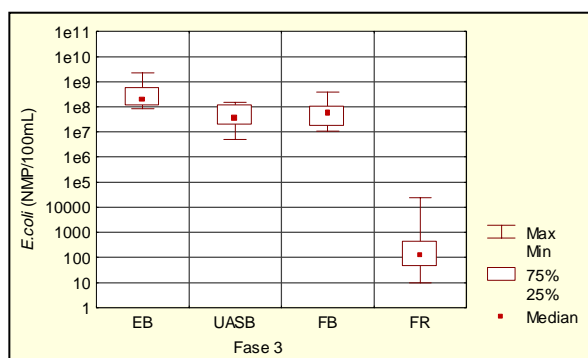


Fig. 5 – Concentrações de *E. coli* no esgoto bruto, efluente UASB, efluente FBP e efluente FR (Fase 3 – Dose = 50,7 mW.s.cm<sup>-2</sup> -  $\theta_h$  = 150 s)

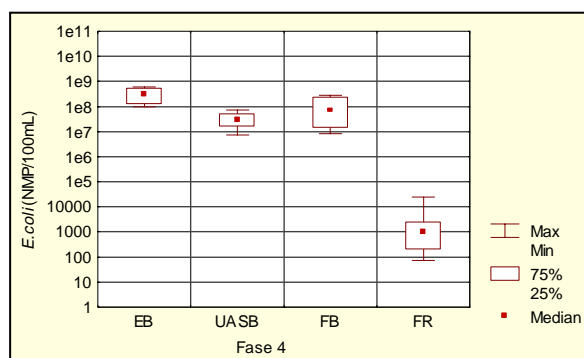


Fig. 6 – Concentrações de *E. coli* no esgoto bruto, efluente UASB, efluente FBP e efluente FR (Fase 4 – Dose = 20,9 mW.s.cm<sup>-2</sup> -  $\theta_h$  = 60 s)

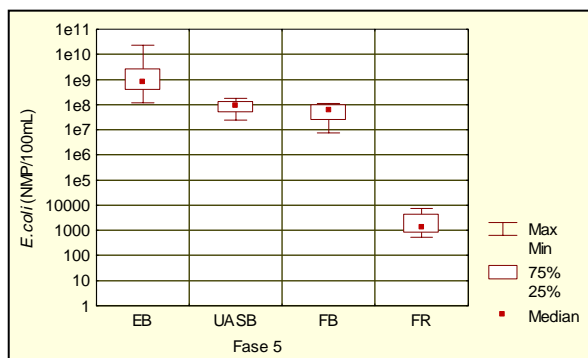


Fig. 7 – Concentrações de *E. coli* no esgoto bruto, efluente UASB, efluente FBP e efluente FR (Fase 5 – Dose = 13,6 mW.s.cm<sup>-2</sup> -  $\theta_h$  = 40 s)

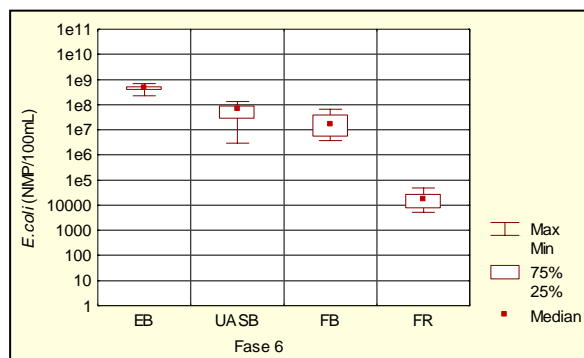


Fig. 8 – Concentrações de *E. coli* no esgoto bruto, efluente UASB, efluente FBP e efluente FR (Fase 6 – Dose = 6,7 mW.s.cm<sup>-2</sup> -  $\theta_h$  = 20 s)

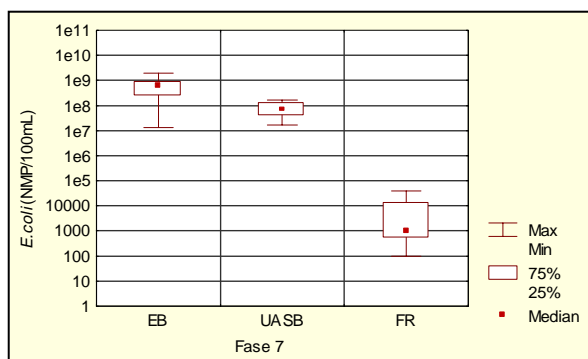


Fig. 9 – Concentrações de *E. coli* no esgoto bruto, efluente UASB, efluente FBP e efluente FR (Fase 7 – Dose = 20,9 mW.s.cm<sup>-2</sup> -  $\theta_h$  = 60 s)

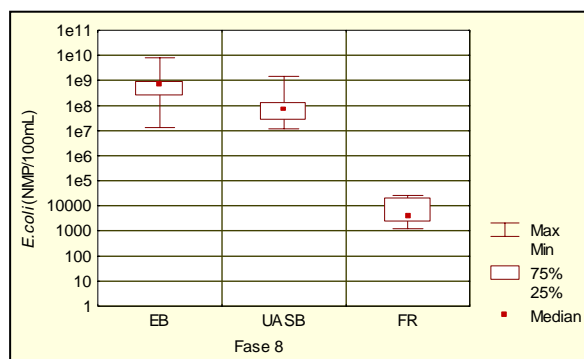


Fig. 10 – Concentrações de *E. coli* no esgoto bruto, efluente UASB, efluente FBP e efluente FR (Fase 8 – Dose = 13,6 mW.s.cm<sup>-2</sup> -  $\theta_h$  = 40 s)



Pela Tabela 6, observa-se que as concentrações de coliformes totais e de *E. coli* também são bastante elevadas nos efluentes do reator UASB e do FBP, uma vez que, conforme esperado, as unidades que compõem o tratamento biológico apresentam baixas eficiências de remoção de coliformes totais e de *Escherichia coli*. Para o reator UASB, isoladamente, e também para o sistema UASB/FBP, foram obtidas eficiências médias de remoção de coliformes totais e de *E. coli* bastante semelhantes, da ordem 90 a 97 % (inferior a 2 unidades logarítmicas).

Já em relação aos resultados obtidos para o efluente do fotorreator, observou-se excelentes eficiências médias de inativação, tanto para coliformes totais quanto para *E. coli*, ao longo de todas fases operacionais, conforme demonstram os resultados apresentados na Tabela 6 e nas Figuras 11 e 12. Exceto para a fase 6 (quando o FR operou com  $\theta_h$  de 20 segundos – dose de  $6,7 \text{ mW.s.cm}^{-2}$ ), as eficiências médias de inativação ficaram sempre próximas, ou acima, de 4 unidades logarítmicas (99,99% de eficiência). Mesmo para a fase 6, quando as condições operacionais não foram as mais propícias, as eficiências médias de inativação de coliformes totais e de *E. coli* ficaram próximas de 3 unidades logarítmicas (99,9%), demonstrando a elevada capacidade de desinfecção do FR.

Ressalta-se que estas elevadas eficiências de inativação foram obtidas para doses variando entre  $101,4$  e  $13,6 \text{ mW.s.cm}^{-2}$  e teores médios de sólidos suspensos no efluente do FBP na faixa de  $39$  a  $47 \text{ mgSS.L}^{-1}$ , exceto para a fase 2 quando a concentração média foi de  $80 \text{ mgSS.L}^{-1}$ , o que implicou na redução da eficiência de inativação em aproximadamente 1 unidade logarítmica.

Deve-se destacar, no entanto, que estas foram eficiências médias de inativação, sendo que as concentrações de *E. coli* no efluente do FR variaram de acordo com os resultados mostrados nas Figuras 3 a 10. Considerando-se as características específicas do esgoto tratado na planta piloto, em termos de variação de vazão, concentração de sólidos suspensos, concentração inicial coliformes e absorvância de radiação UV, observou-se que apenas durante as fases 1 e 3 da pesquisa é que praticamente a totalidade dos resultados de *E. coli* ficaram abaixo de  $1.000 \text{ NMP/100 mL}$  (limite máximo admitido para corpos d'água de classe 2, de acordo com a Resolução CONAMA N° 20, de 18/06/1986).

Merecem destaque os excelentes resultados obtidos para a desinfecção do efluente do reator UASB, durante as fases 7 e 8 da pesquisa, quando também foram observadas eficiências médias de inativação acima de 4 unidades logarítmicas (99,99%), suficientes para manter as concentrações médias de *E. coli* no efluente do FR entre  $1,8 \times 10^3$  e  $5,4 \times 10^3 \text{ NMP/100 mL}$ . Estes resultados foram obtidos para doses de  $20,9$  e  $13,6 \text{ mW.s.cm}^{-2}$  e teores médios de sólidos suspensos, no afluente ao fotorreator, de  $62$  e  $68 \text{ mgSS.L}^{-1}$ , para as fases 7 e 8, respectivamente.

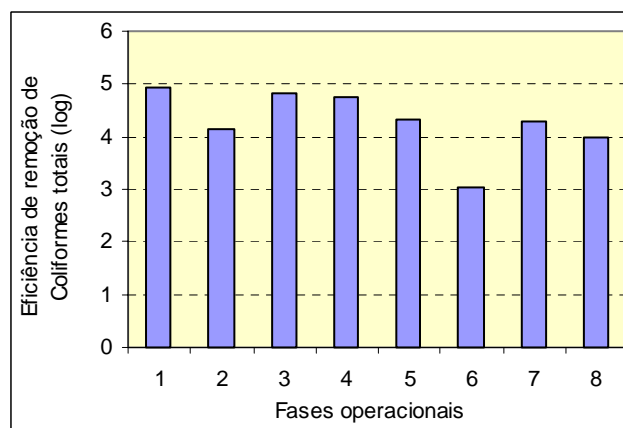


Fig. 11 – Eficiências de inativação de coliformes totais no fotorreator

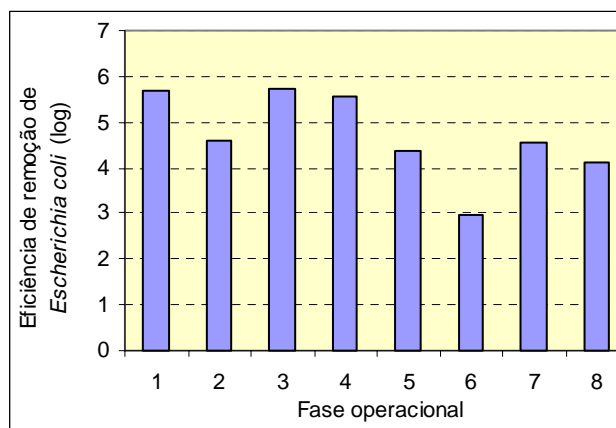


Fig. 12 – Eficiências de inativação de *Escherichia coli* no fotorreator

### Inativação de ovos de *Ascaris lumbricoides*

As distribuições percentuais dos diferentes estágios de desenvolvimento dos ovos de *Ascaris*, após um período de incubação de 28 dias, para o controle, para a caixa de alimentação (afluente ao FR) e para o efluente do FR, após exposição a 20, 40 e 60 segundos de radiação ultravioleta, são mostradas nas Figuras 13 a 17, enquanto a Figura 8 apresenta, comparativamente, o percentual de ovos viáveis (que viraram larvas). Os gráficos mostram os resultados dos três testes efetuados, além dos resultados médios destes testes.

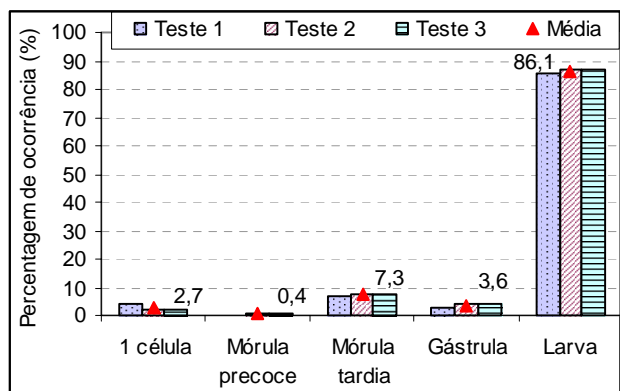


Fig. 13 – Percentagem de distribuição dos diferentes estágios de desenvolvimento dos ovos de *Ascaris* no Controle, após 28 dias de incubação

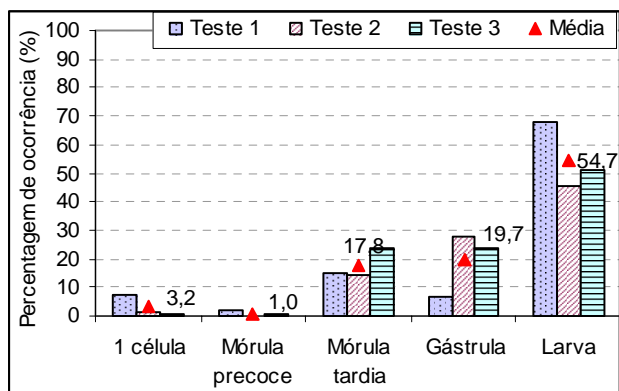


Fig. 14 – Percentagem de distribuição dos diferentes estágios de desenvolvimento dos ovos de *Ascaris* da Caixa de alimentação (afluente FR), após 28 dias de incubação

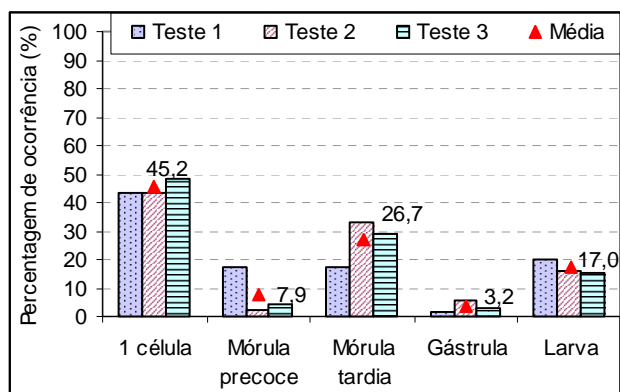


Fig. 15 – Percentagem de distribuição dos diferentes estágios de desenvolvimento dos ovos de *Ascaris* expostos a 20 s de radiação UV, após 28 dias de incubação

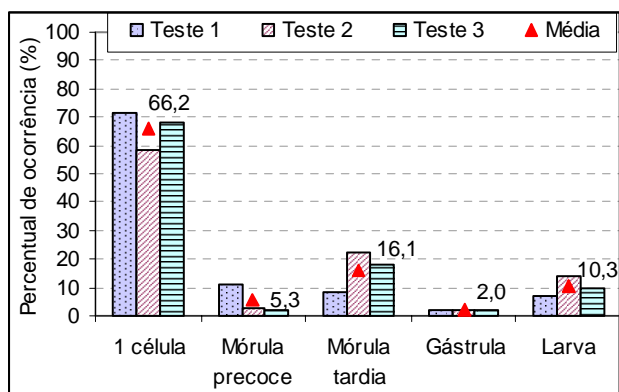


Fig. 16 – Percentagem de distribuição dos diferentes estágios de desenvolvimento dos ovos de *Ascaris* expostos a 40 s de radiação UV, após 28 dias de incubação

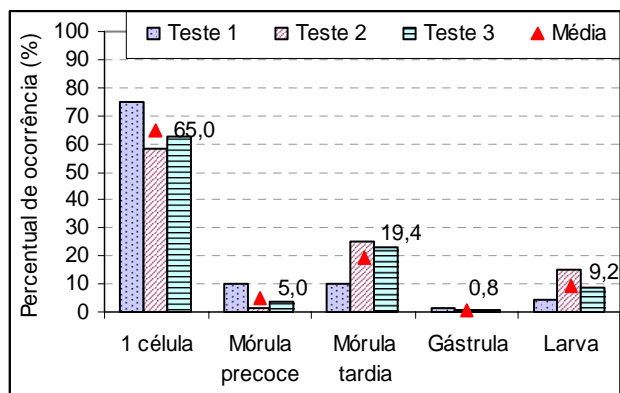


Fig. 17 – Percentagem de distribuição dos diferentes estágios de desenvolvimento dos ovos de *Ascaris* expostos a 60 s de radiação UV, após 28 dias de incubação

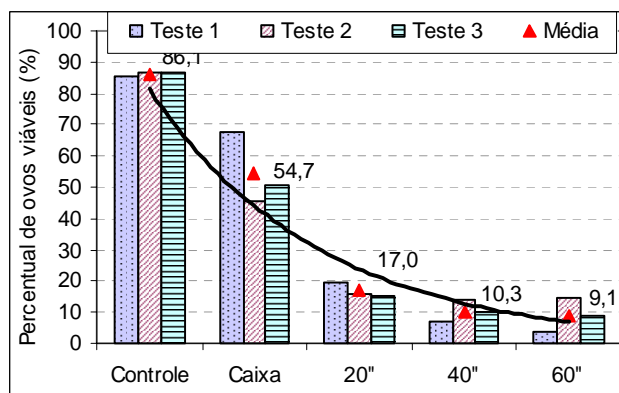


Fig. 18 – Percentagem de viabilidade dos ovos de *Ascaris*, após 28 dias de incubação (no controle, na caixa de alimentação e no efluente do FR após 20, 40 e 60 s de exposição à radiação UV)

Pode-se observar, pela análise das Figuras 13 a 17, que a exposição à radiação ultravioleta afetou, significativamente, o desenvolvimento dos ovos de *Ascaris*, mesmo quando estes foram expostos à radiação durante apenas 20 segundos (dose de  $6,7 \text{ mW.s.cm}^{-2}$ ), quando cerca de 45% dos ovos permaneceram no estágio de uma célula e aproximadamente 17% atingiram o estágio de larva (ovo viável). Os resultados mais surpreendentes, no entanto, foram obtidos para os tempos de exposição de 40 e 60 segundos (doses de  $13,6$  e  $20,3 \text{ mW.s.cm}^{-2}$ , respectivamente), quando aproximadamente 65% dos ovos permaneceram no estágio de célula única e apenas cerca de 10% dos ovos completaram o seu desenvolvimento e conseguiram atingir o estágio de larva. Contrariamente, apenas cerca de 3% dos ovos não expostos à radiação ultravioleta (controle e caixa de alimentação) permaneceram no estágio de uma célula, sendo que mais de 80% dos ovos do controle foram capazes de completar o seu desenvolvimento até atingir o estágio de larva. Para a caixa de alimentação, o percentual de ovos que atingiram o estágio de larva foi superior a 50%.

Os ovos de *Ascaris* que conseguiram se desenvolver, após exposição à radiação UV, foram, provavelmente, protegidos da radiação direta, por estarem aderidos aos sólidos suspensos, ou o fizeram devido à resistência natural inerente ao próprio organismo. Após estas exposições à radiação UV, alguns poucos ovos mostraram evidência de dano, como explosão do material celular interno e estrago da membrana externa dos ovos.

Outros resultados que chamam a atenção e merecem ser comentados dizem respeito aos ovos expostos à radiação UV que permaneceram no estágio de mórula tardia (ver Figuras 15 a 17). Para todos os três experimentos, os percentuais de ovos neste estágio foram bastante superiores aos percentuais de ovos que permaneceram nos estágios de mórula precoce e de gástrula, ou mesmo que completaram o seu desenvolvimento até atingir o estágio de larva. Isso indica que foi possível o desenvolvimento parcial de uma parcela dos ovos, que são considerados ovos viáveis inativos, onde as células no interior desses ovos possuem a capacidade de proliferar, mas perderam a sua capacidade de se diferenciar.

Entretanto, poucos trabalhos têm sido realizados para se avaliar o efeito da radiação UV sobre o desenvolvimento e a viabilidade de ovos de *Ascaris lumbricoides* em esgotos tratados, que permitam comparar com os resultados obtidos no presente estudo.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na presente pesquisa demonstram a aplicabilidade dos fotorreatores para a desinfecção de esgotos tratados. Foram obtidas elevadas eficiências de inativação de coliformes totais e de *Escherichia coli* para as duas situações de aplicação do fotorreator, ou seja, para a desinfecção de efluentes do filtro biológico percolador e do reator UASB. Para ambas as situações, foram observadas eficiências médias de inativação de coliformes totais variando entre 4 e 5 unidades logarítmicas. Para a inativação de *E. coli*, as eficiências médias foram ainda superiores, algumas vezes aproximando-se de 6 unidades logarítmicas.

Ressalta-se que excelentes resultados foram obtidos, também, para baixos tempos de exposição à radiação ultravioleta, variando entre 20 e 40 segundos, correspondentes a doses variando entre  $6,7$  e  $13,6 \text{ mW.s.cm}^{-2}$ , respectivamente, desde que os teores de sólidos suspensos não fossem muito elevados. Para o efluente do FBP, as elevadas eficiências de inativação foram obtidas para teores médios de sólidos suspensos na faixa de  $39$  a  $47 \text{ mgSS.L}^{-1}$ , enquanto que, para o efluente do reator UASB, os teores médios de sólidos suspensos estiveram na faixa entre  $62$  e  $68 \text{ mgSS.L}^{-1}$ .

Foi observado, também, que a exposição à radiação ultravioleta afetou, significativamente, o desenvolvimento dos ovos de *Ascaris*, sendo que os melhores resultados foram obtidos para tempos de exposição entre de 40 e 60 segundos (doses de  $13,6$  e  $20,3 \text{ mW.s.cm}^{-2}$ , respectivamente), quando aproximadamente 65% dos ovos permaneceram no estágio de célula

única e apenas cerca de 10% dos ovos completaram o seu desenvolvimento e conseguiram atingir o estágio de larva.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP – Agência de Financiamento Nacional de Estudos e Projetos, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à FAPEMIG – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo financiamento da pesquisa, e à COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais pelo apoio na realização dos trabalhos.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AWWA/APHA/WEF (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20<sup>th</sup> edition. Washington
- CHERNICHARO, C.A.L. (1997). *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*. Vol. 5. *Reatores Anaeróbios*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2. Edição.
- CHERNICHARO, C.A.L (coordenador) (2001). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. FINEP/PROSAB.
- DANIEL, L.A., CAMPOS, J.R. (1993). *Metodologia Simplificada para a Determinação de Parâmetros Cinéticos de Desinfecção com Radiação Ultra Violeta*. Seminário Internacional de Desinfecção de Águas de Abastecimento e Residuárias em Países em Desenvolvimento.
- HUFF, C. B., SMITH, H.F., BORING, B.S., CLARKE, N.A (1965). Study of ultraviolet disinfection of water and factors in treatment efficiency. *Public Health Reports*. v.80, n.8, 695-705; apud CHERNICHARO, C.A.L (coordenador) (2001). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. FINEP/PROSAB.
- LIMA, E. & KOLLNBERGER, G. (1998). *Tecnologias Modernas para Desinfecção de Água e Esgotos*. Revista Ambiente Industrial, N°13.
- VON SPERLLING, M. (1996). *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*. Vol 1. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2. Edição.
- ZERBINI, A.M. & CHERNICHARO, C.A.L. (2001). Metodologias para quantificação e análise de viabilidade de ovos de helmintos em esgotos brutos e tratados. In: C.A.L. Chernicharo (coord.), *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, Aspectos Metodológicos*, p. 70-107. Projeto PROSAB, FINEP. Belo Horizonte, 2001.