

II-143 – DESINFECÇÃO DE ESGOTO SANITÁRIO EMPREGANDO RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA E VERIFICAÇÃO DOS FENÔMENOS DE FOTORREATIVAÇÃO E RECUPERAÇÃO NO ESCURO

Carlos Raphael Pedroso⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO). Mestrando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual de Ponta Grossa em associação ampla com a Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná (UEPG/UNICENTRO).

Thaís Kovalski

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO). Mestranda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual de Ponta Grossa em associação ampla com a Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná (UEPG/UNICENTRO).

Jeanette Beber de Souza

Doutora em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Professora do Departamento de Engenharia Ambiental da UNICENTRO, PR (Programas de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Engenharia Sanitária e Ambiental).

Carlos Magno de Souza Vidal

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da UNICENTRO, PR (Programas de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Engenharia Sanitária e Ambiental).

Endereço⁽¹⁾: Rua Iguatemi, 39 – Engenheiro Gutierrez - Irati - PR - CEP: 84500-000 - Brasil - Tel: (42) 3422-2674 - e-mail: raphaelp6@hotmail.com

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do processo de desinfecção de esgoto sanitário com radiação UV empregando um reator UV de bancada de laboratório operado em batelada, bem como avaliar a interferência de parâmetros físico-químicos do esgoto no desempenho da desinfecção. A verificação da efetividade de desinfecção foi avaliada empregando os microrganismos indicadores de contaminação fecal: Coliformes Totais (CT), *Escherichia coli*, colifagos e *Clostridium perfringens*, para uma altura de lâmina líquida de esgoto de 2 cm e três diferentes tempos de contato. Após a exposição à radiação UV foram investigadas a ocorrência dos fenômenos de fotorreativação e recuperação no escuro para CT e *E. coli*. Foram obtidos valores de 100% na eficiência de inativação para os microrganismos CT e *E. coli*, enquanto para os outros microrganismos, colifagos e *Clostridium perfringens*, foram obtidas eficiências de aproximadamente 99% de inativação em alguns ensaios. Para a fotorreativação foram obtidos de 0,6 a 3,3 log de recuperação para CT e 2 log para *E. coli*. No que se refere à recuperação no escuro os resultados obtidos foram menos expressivos quando comparados à fotorreativação.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação Ultravioleta, Coliformes totais, *Escherichia coli*, colifagos e *Clostridium perfringens*.

INTRODUÇÃO

O lançamento de efluentes nos corpos hídricos sem a etapa de desinfecção (tratamento terciário) compromete a qualidade das águas receptoras, além de colocar a saúde da população em risco (transmissão de doenças), uma vez que devem ser garantidos os usos múltiplos em relação à água como irrigação, abastecimento, recreação e outros.

O cloro é o desinfetante químico mais comumente utilizado no mundo (KOIVUNEN E HEINONEN-TANSKI 2005; LIBERTI, NOTARNICOLA E PETRUZZELLI, 2002) e é usado tanto para águas de abastecimento quanto para residuárias, porém, seu uso vem sendo questionado devido a sua toxicidade, seu manuseio e a possibilidade de geração de subprodutos cancerígenos como os Trihalometanos (THM) (EPA, 1999; GUO, et al., 2011; HIJNEN, BEERENDONK E MEDEMA, 2006; NADDEO et al., 2009; LAPOLLI, et al., 2003),

assim, a busca por outros métodos de desinfecção além do cloro vem sendo objeto de pesquisas há alguns anos na comunidade científica.

Uma das alternativas que vem ganhando destaque é o uso da radiação ultravioleta (UV) para a desinfecção. Trata-se de um processo físico, em que se utilizam lâmpadas especiais com efeito germicida, sendo estas comumente de baixa pressão e vapor de mercúrio ionizado (RODRIGUEZ et al., 2014). Segundo Jungfer, Schwartz e Obst (2007); Hallmich e Gehr (2010) a inativação dos microrganismos patogênicos acontece quando a radiação UV com comprimento de onda aproximadamente de 254 nm atinge o material genético (DNA e RNA), onde, através da fotólise, os microrganismos-alvos perdem a capacidade de reprodução.

Entretanto, após a radiação UV alguns microrganismos possuem a capacidade de se recuperarem através de enzimas reparadoras tanto na presença da luz (fotorreativação) quanto na sua ausência (recuperação no escuro) (JUNGFER, SCHWARTZ E OBST, 2007; SHANG ET AL., 2009). Essa capacidade reparadora pode variar entre as espécies e até dentro da mesma espécie (DANIEL, 1993; QUEK e HU, 2008).

A presente pesquisa visou o estudo, em escala de laboratório, da eficiência da desinfecção por radiação UV em relação aos microrganismos indicadores *Escherichia coli*, Coliformes Totais (CT), colifagos e *Clostridium perfringens*; bem como ensaios de fotorreativação e recuperação no escuro.

MATERIAIS E MÉTODOS

O esgoto sanitário utilizado foi o efluente final (saída do filtro anaeróbio) de uma Estação de Tratamento (ETE) municipal do Estado do PR. A caracterização físico-química desses efluentes foi realizada de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998), em que foram analisados os seguintes parâmetros: turbidez, cor aparente, cor verdadeira, série de sólidos, Demanda Química de Oxigênio (DQO), absorvância 254 nm e densidade inicial de coliformes totais (CT), *E. coli*, *C. perfringens* e colifagos. A parte experimental da pesquisa incluindo as análises físico-químicas e os exames microbiológicos foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Ambiental (DENAM) da UNICENTRO, Campus Irati.

Para a determinação de CT e *E. coli* foi empregada a técnica de filtração em membranas (APHA, 1999), para *C. perfringens* técnica de tubos múltiplos segundo a Norma L5.213 (CETESB, 1990) e para colifagos o ensaio de placa, Norma L5.225 (CETESB, 1993).

O reator UV empregado foi confeccionado em aço inox, com cúpula removível em alumínio com 10 cm de altura. Possui as dimensões 40x45x15 cm, volume de 27 L, 6 lâmpadas emersas de baixa pressão de vapor de mercúrio marca Philips, distanciadas entre si em 2,2 cm, com 15 W de potência nominal cada uma e interruptores individuais de energia.

Para a determinação da intensidade emitida pelas lâmpadas UV foi adotada uma malha de pontos equidistantes em 5 cm, totalizando 56 pontos. A intensidade foi medida com auxílio de um radiômetro marca Vilber Loumart (VLX-3W) com sensor que detecta a radiação UV no comprimento de onda de 254 nm. Foi feita a média desses 56 pontos, totalizando uma intensidade média de radiação UV emitida pela fonte (I_0). A intensidade média efetiva (I_m) (equação 1) foi calculada de acordo com a Lei de Beer-Lambert (equação 2); que leva em consideração também o coeficiente de absorção e espessura da lâmina líquida.

$$I_m = I_0 / \alpha \cdot L \cdot [1 - e^{(-\alpha \cdot L)}] \quad (\text{equação 1})$$

I_m = intensidade média efetiva (mW/cm²);

I_0 = intensidade média da radiação emitida pela fonte e aplicada à superfície (mW/cm²);

α = coeficiente de absorção (cm⁻¹);

L = espessura da lâmina líquida (cm).

$$\alpha = A \cdot \ln(10) = 2,303 \cdot A \quad (\text{equação 2})$$

α : coeficiente de absorvância (cm⁻¹);

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

Após a obtenção das intensidades foi possível determinar a dose média efetiva conforme a equação 3.

$$D_m = I_m \cdot t \quad (\text{equação 3})$$

D_m = Dose média efetiva (mWs/cm^2);

I = Intensidade média de radiação (mW/cm^2);

T = Tempo de exposição (s).

Previamente aos ensaios de desinfecção as lâmpadas do reator UV eram ligadas por um período de 15 minutos, para aquecimento e estabilização das lâmpadas. Os ensaios de desinfecção foram realizados utilizando-se as 6 lâmpadas ligadas, com tempos de exposição de 15, 30 e 45 segundos e a espessura da lâmina líquida (L) foi de 2 cm. Após cada tempo de exposição, alíquotas do efluente eram coletadas para a realização dos exames microbiológicos e obtenção do número final de microrganismos (N). Vale ressaltar que os ensaios de desinfecção foram realizados em triplicata.

Para o ensaio de fotorreativação, após a desinfecção, amostras de 100 mL foram expostas à radiação solar por um período de três horas, em Becker de 250 mL, parcialmente tampado com vidro de relógio e coberto com policloreto de vinila (PVC), o qual foi perfurado para a passagem de ar. Para o ensaio de recuperação no escuro foram coletadas as mesmas quantidades de amostra, porém, elas eram acondicionadas em frascos plásticos e mantidas em ambiente escuro por um período de três horas (TINOCO, 2011). Os microrganismos indicadores empregados para o estudo dos mecanismos de reparos foram: *E. coli* e CT.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DO ESGOTO

Na tabela 1 são apresentados os resultados da caracterização físico-química e microbiológica do esgoto sanitário, denominados de ensaios 1, 2 e 3. Foram analisados os seguintes parâmetros: Turbidez (uT), sólidos totais (mgST/L), sólidos suspensos totais (mgSST/L), absorvância medida a 254 nm (cm^{-1}), *E. coli* (UFC/100 mL), CT (UFC/100 mL), *C. perfringens* (NMP/100 mL) e colifagos (UFP/100 mL).

Na tabela 2 são apresentados os resultados e as eficiências obtidas nos ensaios de desinfecção com radiação UV; na figura 1 é representada a média das triplicatas de acordo com os resultados apresentados na tabela 2, onde representa a variação dos microrganismos indicadores inativados através da radiação UV para as doses estudadas e na Tabela 3 os resultados dos mecanismos de reparo do dano: fotorreativação e recuperação no escuro.

Tabela 1: Caracterização físico-química e microbiológica do esgoto sanitário (filtro biológico).

| Parâmetros | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 |
|--|----------|----------|----------|
| Turbidez (uT) | 28,5 | 45,9 | 61,6 |
| ST (mgST/L) | 46 | 244 | 283 |
| SST (mgSST/L) | 6 | 11 | 9 |
| Abs (254 nm) | 0,28 | 0,41 | 0,66 |
| <i>E.coli</i> (UFC/100mL) | 4,00E+04 | 5,90E+04 | 9,90E+04 |
| Coliformes totais (UFC/100mL) | 4,51E+05 | 7,00E+06 | 6,00E+05 |
| <i>Clostridium Perfringens</i> (NMP/100mL) | 1,60E+05 | 9,00E+06 | 3,00E+06 |
| Colifagos (UFP/100mL) | 5,25E+03 | 3,80E+03 | 4,40E+03 |

A turbidez representa grande impacto na desinfecção por radiação UV, pois as partículas suspensas contendo matéria orgânica e colóides servem de proteção aos microrganismos-alvos (BURCH e THOMAS, 1998). Os valores de turbidez da presente pesquisa variaram de 28,5 a 61,6 NTU e, segundo Earth Tech (Canadá) Inc.

(2005), os mesmos não deveriam ultrapassar o valor de 5 uT, visando o não comprometimento da eficiência da desinfecção por radiação UV.

Os sólidos suspensos podem elevar a absorbância da luz UV e servir de proteção para os microrganismos-alvos (TEMPLETON, ANDREWS e HOFMANN, 2006). Para SST os valores obtidos situaram entre 6,0 e 11,0, resultados esses que se encontram abaixo dos valores usuais admitidos pela EPA (1999), que não devem ultrapassar 30 mgSST/L.

A absorbância é um parâmetro relevante para a desinfecção por radiação UV estando associada com a concentração de sólidos suspensos, metais e componentes orgânicos e inorgânicos dissolvidos no efluente (METCALF & EDDY, 2003). Os valores de absorbância variaram de 0,28 a 0,65, que, de acordo com Gonçalves (2003) encontram-se dentro da faixa aceitável (de 0,4 a 0,8), quando se utiliza a desinfecção UV após tratamento anaeróbio.

ENSAIOS DE DESINFECÇÃO COM RADIAÇÃO UV

Na tabela 2 são apresentados os resultados e as eficiências obtidas nos ensaios de desinfecção com radiação UV.

Tabela 2: Eficiências de inativação microbiana após a desinfecção com radiação UV.

| | Ensaio | Efluente | Dose média efetiva (mW/cm ²) | | | No | | | Log N/No | | | Eficiência (%) | | |
|-----------------------------------|--------|------------------|--|-------|--------|-----------|----------|----------|-----------|-------|-------|----------------|--------|--------|
| | | | Tempo (s) | | | Tempo (s) | | | Tempo (s) | | | Tempo (s) | | |
| | | Filtro Anaeróbio | 30 | 60 | 90 | 30 | 60 | 90 | 30 | 60 | 90 | 30 | 60 | 90 |
| <i>C. perfringens</i> (NMP/100mL) | 7 | 1,60E+05 | 35,28 | 76,39 | 102,89 | 2,80E+04 | 3,30E+03 | 1,20E+03 | -0,76 | -1,69 | -2,12 | 82,50 | 97,94 | 99,25 |
| | 8 | 9,00E+06 | 45,03 | 94,32 | 145,12 | 1,60E+06 | 3,40E+04 | 1,70E+04 | - | -1,67 | -1,97 | 0,00 | 97,88 | 98,94 |
| | 9 | 3,00E+06 | 13,34 | 28,33 | 48,04 | 1,60E+06 | 2,20E+05 | 3,30E+04 | - | -0,86 | -1,69 | 0,00 | 86,25 | 97,94 |
| Colifagos (UFP/100mL) | 7 | 5,25E+03 | 35,28 | 76,39 | 102,89 | 4,50E+02 | 2,00E+02 | 0 | -0,28 | -0,63 | 0,00 | 47,06 | 76,47 | 100,00 |
| | 8 | 3,80E+03 | 45,03 | 94,32 | 145,12 | 7,00E+02 | 3,50E+02 | 5,00E+01 | -0,30 | -0,60 | -1,45 | 50,00 | 75,00 | 96,43 |
| | 9 | 4,40E+03 | 13,34 | 28,33 | 48,04 | 2,15E+03 | 6,50E+02 | 1,00E+02 | -0,13 | -0,65 | -1,46 | 25,86 | 77,59 | 96,55 |
| Coliformes Totais (UFC/100mL) | 7 | 4,51E+05 | 35,28 | 76,39 | 102,89 | 6,40E+03 | 3,10E+03 | 3,00E+02 | -0,67 | -0,98 | -1,99 | 78,38 | 89,53 | 98,99 |
| | 8 | 7,00E+06 | 45,03 | 94,32 | 145,12 | 1,50E+04 | 1,00E+04 | 3,00E+03 | -1,26 | -1,44 | -1,96 | 94,57 | 96,38 | 98,91 |
| | 9 | 6,00E+05 | 13,34 | 28,33 | 48,04 | 1,60E+05 | 2,60E+04 | 3,00E+03 | -0,64 | -1,43 | -2,37 | 77,14 | 96,29 | 99,57 |
| <i>E. coli</i> (UFC/100mL) | 7 | 4,00E+04 | 35,28 | 76,39 | 102,89 | 5,00E+02 | 4,00E+02 | 0,00E+00 | -0,15 | -0,24 | 0,00 | 28,57 | 42,86 | 100,00 |
| | 8 | 5,90E+04 | 45,03 | 94,32 | 145,12 | 2,00E+03 | 0 | 0 | -1,60 | 0,00 | 0,00 | 97,50 | 100,00 | 100,00 |
| | 9 | 9,90E+04 | 13,34 | 28,33 | 48,04 | 6,00E+04 | 1,40E+04 | 1,00E+03 | -0,89 | -1,52 | -2,67 | 87,14 | 97,00 | 99,79 |

De acordo com os resultados apresentados na tabela 2 foi elaborada a Figura 1 correspondente à média das triplicatas obtidas nos ensaios para os tempos de exposição de 15, 30 e 45 segundos, que demonstra as variações das concentrações remanescentes dos microrganismos indicadores empregados na pesquisa.

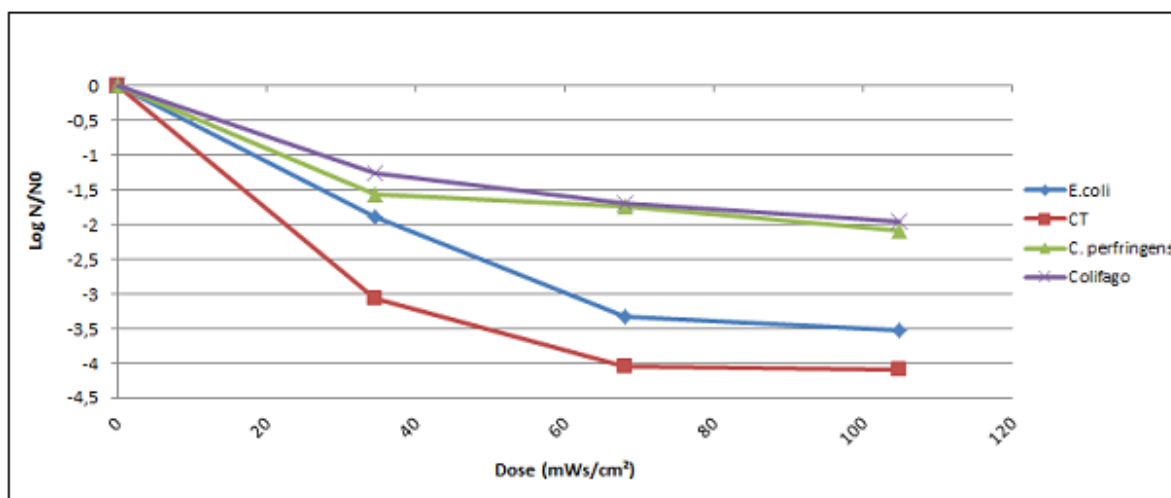


Figura 1: Representação gráfica da variação dos microrganismos indicadores inativados através da radiação UV para as doses estudadas.

A partir dos dados apresentados (tabela 2 e figura 1) verificou-se que, de modo geral, a desinfecção foi bastante efetiva a partir do tempo de exposição de 30 segundos (doses acima de 60 mWs/cm²), principalmente para os indicadores de contaminação fecal *E. coli* e CT, chegando a percentuais de inativação de 100% em alguns casos (removendo 4 e 6 log, respectivamente). Analisando a tabela 2, observou-se que para a *E. coli* ocorreu a inativação total com tempo de exposição de 30 segundos no ensaio 1 (dose de 86,45 mWs/cm²) e no ensaio 2 (dose de 70,44 mWs/cm²), sendo que no ensaio 3 ocorreu inativação total a partir de 45 segundos de exposição (dose de 70,40 mWs/cm²). Para CT a partir de 45 segundos (dose de 70,44 mWs/cm²) ocorreu inativação total.

Silva *et al.* (2001) em estudo aplicando um fotorreator de volume de 2,2 L seguido de um sistema de tratamento anaeróbio/aeróbio (UASB e filtro biológico percolador) chegaram a remoções entre 4 e 5 unidades logarítmicas para *E. coli* e CT com doses de radiação UV variando entre 13,6 a 102,43 mWs/cm².

Lazarova *et al.* (1999) citam que doses de radiação UV de 30 a 45 mWs/cm² para efluentes secundários e terciários são suficientes para remoções na ordem de grandeza de 3 a 5 unidades logarítmicas para CT, coliformes fecais e *Streptococcus faecalis*.

Na presente pesquisa, para colifagos, conforme a figura 1, houve eficiência de inativação de aproximadamente 99% (remoção de 2 log) para uma dose média de 104,88 mWs/cm². No ensaio 1 (tabela 1) foi alcançada eficiência de 99% (remoção de 2 log) para o tempo de exposição a partir de 30 segundos (dose média efetiva de 86,45 mWs/cm²).

Apesar de vírus serem considerados mais resistentes à radiação UV, como observado na literatura (CHANG *et al.*, 1985; HIJNEN, BEERENDONK e MEDEMA, 2006; LAZAROVA *et al.* 1999), na presente pesquisa, este microrganismo que é indicador de vírus, apresentou sensibilidade à radiação UV à medida que o tempo de exposição aumentou. Meng e Gerba (1996) mostraram que para atingir 90% de inativação (remoção de 1 log) para colifagos MS-2 foi necessária uma dose de radiação de 14 mWs/cm².

Dos microrganismos indicadores estudados, *C. perfringens* foi o que apresentou maior resistência à desinfecção por radiação UV, trata-se de uma bactéria formadora de esporos (indicadora de protozoários), que, de fato, é mais resistente à desinfecção, necessitando de doses elevadas de radiação UV para se alcançar a inativação total (HIJNEN, BEERENDONK e MEDEMA, 2006). Os melhores resultados de inativação para *C. perfringens* (tabela 1) foram obtidos no ensaio 1, chegando a uma eficiência de 99,25% (remoção de 2,43 log) para a dose de 137,56 mWs/cm².

Gehr *et al.* (2003) mostraram que para colifagos MS-2 e *C. perfringens*, doses de 10 e 30 mWs/cm² respectivamente, foram suficientes para a remoção de 1 log (90%) em efluentes com turbidez de 16 a 31 uT e

SST de 16 a 45 mgSST/L. Gonçalves et al. (2003) mostraram que doses de radiação a partir de 20 mWs/cm² são capazes de inativar bactérias e vírus, porém, para protozoários o mesmo não acontece, sendo necessário aplicação de doses mais elevadas, podendo chegar a ser até antieconômico.

Billota e Daniel (2012) mostraram que para os microrganismos indicadores colifagos e *E. coli* doses de 123 e 247 mWs/cm² para os tempos de exposição de 60 e 120 segundos foram suficientes para obtenção de remoção entre 1,70 a 3,90 log e 1,60 a 5,20 log, respectivamente. Os mesmos autores mostraram que para *C. perfringens*, para as mesmas dosagens de radiação UV, a remoção foi de 0,0 (ausência) a 1,30 log, apontando a necessidade de se trabalhar com doses maiores de radiação UV.

A eficiência da desinfecção por radiação UV na presente pesquisa seguiu a ordem: *E. coli*, CT, colifagos e *C. perfringens*, seguindo a ordem de Burch e Thomas (1998) que apresentaram a seguinte ordem de resistência microbiana à radiação UV: bactérias < vírus < fungos < esporos < cistos.

Na tabela 3 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de reparação dos danos ocasionados pela ação germicidas das lâmpadas.

Tabela 3: Mecanismos de reparo do dano: fotorreativação e recuperação no escuro após a desinfecção com radiação UV.

| Número do ensaio | Tempo de exposição (s) | Dose média efetiva (mWs/cm ²) | Concentração remanescente (UFC/100mL) | | | | | |
|------------------|------------------------|---|---------------------------------------|-------------------------|---|-------------------------|---|-------------------------|
| | | | Após desinfecção | | 3 horas após a desinfecção e exposição à radiação solar | | 3 horas após a desinfecção e em ausência de luz | |
| | | | | | exposição à radiação solar | | em ausência de luz | |
| | | | Coliformes Totais | <i>Escherichia Coli</i> | Coliformes Totais | <i>Escherichia Coli</i> | Coliformes Totais | <i>Escherichia Coli</i> |
| 1 | 15 | 45,35 | 5,00E+02 | 5,00E+02 | 2,00E+03 | 0,00 | 1,00E+02 | 5,0E+02 |
| | 30 | 86,45 | 2,00E+02 | 0,00 | 7,00E+02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 45 | 137,56 | 1,50E+02 | 1,00E+02 | 1,30E+03 | 6,00E+02 | 0,000 | 0,00 |
| 2 | 15 | 35,23 | 2,50E+03 | 1,00E+03 | 1,00E+03 | 0,00 | 1,00E+03 | 0,00 |
| | 30 | 70,44 | 0,00 | 0,00 | 2,00E+03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 45 | 106,70 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 15 | 22,84 | 1,00E+03 | 1,00E+03 | 4,80E+03 | 2,00E+02 | 6,30E+03 | 4,0E+02 |
| | 30 | 47,33 | 1,00E+03 | 1,00E+03 | 1,30E+03 | 0,00 | 3,00E+02 | 0,00 |
| | 45 | 70,40 | 1,00E+03 | 0,00 | 1,00E+02 | 1,00E+02 | 0,00 | 0,00 |

Cabe ressaltar que as temperaturas dos ensaios 1, 2 e 3 da fotorreativação foram de 18, 24 e 25°C respectivamente e que o céu em ambos os ensaios estavam parcialmente nublados. Os horários da realização dos ensaios de fotorreativação foram das 11:00 às 14:00 h. Para os ensaios de recuperação no escuro a temperatura foi de 25°C, seguindo os mesmos horários da fotorreativação.

De acordo com a tabela 3, foi evidenciado fotorreativação tanto para a *E. coli* quanto para CT, sendo que para CT este mecanismo de reparação foi mais observado: no ensaio 1 (dose de 45,35 mWs/cm²) e no ensaio 2 (dose de 70,44 mWs/cm²) foram observadas recuperações de 0,6 a 3,3 log, respectivamente. Para *E. coli* o fenômeno foi menos evidente, observando recuperação de 2 log para o ensaio 3 (dose de 70,44mWs/cm²).

No presente estudo os resultados da recuperação no escuro foram considerados insignificantes comparados ao da fotorreativação e, o decréscimo da concentração dos microrganismos indicadores empregados, tanto na fotorreativação quanto na recuperação no escuro, provavelmente foi da morte natural das células.

Lindenauer e Darby (1994) discutiram a influência das doses de radiação de 30 a 239 mWs/cm² sobre a fotorreativação e mostraram que para as doses menores a fotorreativação é maior. Na presente pesquisa, observando a tabela 1, para o tempo de exposição de 30 segundos, para as doses de 86,45 e 70,44 mWs/cm², foi possível observar para CT que para a maior dose, não ocorreu a fotorreativação.

Guo et al. (2011) mostraram que ao trabalhar com dose de 5 mWs/cm² tanto os fenômenos de fotorreativação quanto de recuperação no escuro, para bactérias do grupo coliformes e *E. coli*, foram evidenciados, com nível máximo de recuperação após 8 e 4 horas, respectivamente, enquanto que para as doses de 20, 40 e 80 mWs/cm² a fotorreativação e a recuperação no escuro não foram significativas.

Liltved e Landfald (2000); Quek e Hu (2008) mostraram que o efeito da intensidade solar é muito significativo para a fotorreativação e que na exposição contínua ao sol de alta intensidade, o efeito da reparação do dano pode-se deteriorar, revertendo o processo de recuperação para a desinfecção (ação germicida da radiação solar). Os mecanismos de reparação para cada espécie podem diferir de maneira significativa (DANIEL, 1993; QUEK e HU, 2008).

No presente estudo, fatores como a carga bacteriana inicial, a interferência de material particulado e em suspensão ainda presentes no esgoto, bem como a ausência de residual desinfetante, provavelmente, influenciaram na ocorrência dos mecanismos de reativação bacteriana após a desinfecção, principalmente no caso da fotorreativação para o microrganismo CT.

CONCLUSÕES

Com base nos ensaios realizados, concluiu-se que:

Os parâmetros físico-químicos: turbidez, absorvância, sólidos totais e suspensos totais, são fundamentais para a decisão de se trabalhar com desinfecção por radiação UV e isso foi observado nos ensaios 1, 2 e 3 em relação à eficiência do processo.

Mesmo com a interferência das características físico-químicas do efluente, conseguiu-se, entretanto, atingir eficiências satisfatórias de inativação para os microrganismos indicadores *E. coli*, CT e colifagos; sendo que para a *E. coli* e CT, a eficiência de inativação, em alguns casos, atingiu 100%.

C. perfringens foi o microrganismo indicador que apresentou maior resistência à desinfecção por radiação UV; mostrando em alguns ensaios (2 e 3) pouca diferença na concentração remanescente, chegando, no máximo, a aproximadamente 2 log de remoção para o maior tempo de exposição (45 segundos).

Em relação aos mecanismos de recuperação microbiológica, notou-se que a fotorreativação foi mais evidente do que a recuperação no escuro, chegando a 3,3 log de recuperação para CT e 2 log para a *E. coli*. A recuperação no escuro foi insignificante comparada à fotorreativação.

Considerando-se que a desinfecção de esgoto sanitário é essencial quanto aos aspectos de saúde pública, uma vez que os usos múltiplos da água são comumente previstos, e que os mecanismos de recuperação microbiana possuem a capacidade de alterar a qualidade das águas já desinfetadas, torna-se de suma importância mais estudos realizados nessa área empregando diferentes microrganismos indicadores sob diferentes configurações de reatores e condições operacionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo auxílio financeiro para participação neste evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 20 ed. Washington, 1999, 2670 p.
2. BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. Utilização de lâmpadas germicidas na desinfecção de esgoto sanitário. *Água, Taubaté*, v. 7, n.1, p. 120-129, 2012.
3. BURCH, J. D.; THOMAS, K. E. Water disinfection for developing countries and potencial for solar thermal pasteurization. *Solar Energy. Grã-Bretanha*, v. 64, p. 87-97, fev. 1998.

4. CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Determinação de colifagos em amostras de água: método de ensaio. L5/225. São Paulo, 1990. 24 p.
5. CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Clostridium perfringens*: determinação em amostras de água pela técnica de tubos múltiplos. Método de ensaio L5/213. São Paulo, 1993. 25 p.
6. CHANG, J. C. H. ; OSSOFF, S. F.; LOBE, D. C.; DORFMAN, M. H., DUMAIS, C. M.; QUALLS, R. G.; JOHNSON, D. UV inactivation of pathogenic and indicator microorganisms. Applied Environmental Microbiology, v. 49, n. 6, p. 1361-1365, 1985.
7. DANIEL, L. A. Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta: fotoreativação e obtenção de parâmetros cinéticos. 1993. Tese de Doutorado-Engenharia Hidráulica e Saneamento- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
8. EARTH TECH (CANADÁ) INC. Chlorine and alternative disinfectants guidance manual. Manitoba Water Stewardship – Office of Drinking Water. Canadá. 2005, 117 p.
9. EPA. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Wastewater technology fact sheet – Ultraviolet disinfection. (EPA 832-F-99-064). Washington, DC. 1999b, 7 p.
10. GONÇALVES, R. F.; FILHO, B. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; LAPOLLI, F. R.; AISSE, M. M.; PIVELI, R. P. Desinfecção por radiação ultravioleta. In GONÇALVES, R. F. (Coord.): Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES. PROSAB, Edital 3. Rio de Janeiro. 438 p. 2003.
11. GEHR, R.; WAGNER, M.; VEERASUBRAMANIAN, P.; PAYMENT, P. Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. Water Research, v. 37, p. 4573-4586, jun. 2003.
12. GUO, MT.; HUANG, JJ; LIU WJ. Growth and repair potential of three species of bacteria in reclaimed wastewater after UV disinfection. Biomedical and Environmental Sciences. China, v. 24, n. 4, p. 400-407, jan. 2011.
13. HALLMICH, C.; GEHR, R. Effect of pre- and post-UV disinfection conditions on photoreactivation of fecal coliforms in wastewater effluents. Water Research. Canadá., v. 44, p. 2885-2893, fev. 2010.
14. HIJNEN, W. A.M; BEERENDONK, E.F.; MEDEMA, G.J. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review. Water Research. Holanda, v. 40, p. 3-22, 2006.
15. JUNGFER, C.; SCHWARTZ, T.; OBST, U. UV-induced dark repair mechanisms in bacteria associated with drinking water. Water Research. Alemanha, v. 47, p. 188-196, 2007.
16. KOIVUNEN, J.; HEINONEN-TANSKI, H. Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatments. Water Research. Finlândia, v. 39, p. 1519-1526, mar. 2005.
17. LAPOLLI, F. R.; SANTOS, L. F.; HASSEMER, M. E. N.; AISSE, M. M.; PIVELI, R. P. Desinfecção de efluentes sanitários por meio da ozonização. In GONÇALVES, R. F. (Coord.): Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES. PROSAB, Edital 3. Rio de Janeiro. 438 p. 2003.
18. LAZAROVA, V.; SAVOYE, P.; JANEX, M. L.; BLATCHLEY III, E. R.; POMMEPUY, M. Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. Water Science and Technology, v. 40, n. 5, p. 203-213, 1999.
19. LIBERTI, L.; NOTARNICOLA M.; PETRUZZELI, D. Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. UV disinfection: parasite removal and by-product formation. Desalination, v. 152, p. 315-324, abr. 2002.
20. LILTVED, H.; LANDFALD, B. Effects of high intensity light on ultraviolet-irradiated and non-irradiated fish pathogenic bacteria. Water Research, v. 34, n. 2, p. 481-486, 2000.
21. LINDENAUER, K. G.; DARBY, J. L. Ultraviolet disinfection of wastewater: Effect of dose on subsequent photoreactivation. Water Research. Califórnia, EUA, v. 28, n. 4, p. 805-817, 1994.
22. MENG, Q. S.; GERBA, C. P. Comparative inactivation of enteric adenoviruses, poliovirus and coliphages by ultraviolet irradiation. Water Research, v. 30, n. 11, p. 2665-2668, mai. 1996.
23. METECALF E EDDY, INC. Wastewater engineering – treatment and reuse. 4 ed. Nova York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.
24. NADDEO, V. Wastewater disinfection by combination of ultrasound and ultraviolet irradiation. Journal of Hazardous Materials. Itália, v. 168, p. 925-929, mar. 2009.

25. QUEK, P. H.; HU, J. Indicators for photoreactivation and dark repair studies following ultraviolet disinfection. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. Singapura, v. 35, p. 533-541, jan. 2008.
26. RODRIGUEZ, R. A.; BOUNTY, S.; BECK, S.; CHAN, C.; MCGUIRE, C.; LINDEN, K. G.. Photoreactivation of bacteriophages after UV disinfection: role of genome structure and impacts of UV source. *Water Research*. EUA, v. 55, p. 143-149, fev. 2014.
27. SHANG, C. Repression of photoreactivation and dark repair of coliform bacteria by TiO₂-modified UV-C disinfection. *Catalysis B: Environmental*. Hong Kong, v. 89, p. 536-542, Fev. 2009.
28. SILVA, J. C.C.; CHERNICHARO, C. A. L.; ZERBINI, A. M.; GORDINHO, V. M.; LAUFFER, J. Desenvolvimento e avaliação de um fotorreator simplificado de radiação UV para inativação de coliformes e ovos de helmintos em esgotos tratados. In: Cherchinaro (Org.). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbicos. v. 2. Belo Horizonte, PROSAB, p. 229-240, 2001.
29. TEMPLETON, M. R.; HOFMANN, R.; ANDREWS, R.C. UV inactivation of humic-coated bacteriophages MS2 and T4 in water. *Journal of Environmental Engineering Science*. Canadá, v.5, nov. 2006.
30. TINÔCO, J. D. Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica. 2011. Tese de Doutorado-Engenharia Hidráulica e Saneamento-Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.