

DESINFECÇÃO DE ÁGUA COM RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA: EFICIÊNCIA BACTERICIDA

Marco Roberto PIRES**
Beatriz PISANI***
Maria Ângela Garnica PRANDI***
Marise SIMÕES***

RIALA 6/823

PIRES, M. R.; PISANI, B.; PRANDI, M. A. G.; SIMÕES, M. - Desinfecção de água com radiação ultravioleta: eficiência bactericida. Rev. Inst. Adolfo Lutz, 57(1): 29-34, 1998.

RESUMO: A desinfecção de água com radiação ultravioleta tem demonstrado ser uma alternativa à cloração. O objetivo deste trabalho é estudar a inativação dos microrganismos. Utilizou-se um reator (câmara de desinfecção) equipado com lâmpada de ultravioleta, operando no sistema de batelada. Os microrganismos inativados foram *E.coli*, *P.aeruginosa*, *A.hydrophila*, *E.faecalis* e *V.cholerae*. A *E.coli* se mostrou o microrganismo de maior resistência inicial, mas a de maior constante de inativação; o *E.faecalis* foi o mais resistente.

DESCRIPTORIOS: desinfecção; radiação ultravioleta; inativação de microrganismo.

INTRODUÇÃO

A radiação ultravioleta (uv) tem demonstrado ser eficiente na inativação de microrganismos e uma alternativa à cloração. Este tipo de desinfecção é conhecido desde o início do século, mas por problemas de confiabilidade do equipamento, tecnologia, entre outros foi abandonado. Nos últimos anos, este sistema tem se tornado popular, principalmente nos países europeus.

Para a obtenção da radiação uv, são utilizadas lâmpadas especiais (semelhantes às lâmpadas fluorescentes) de baixa-pressão. Os raios de uv pertencem ao espectro eletromagnético, entre a luz visível e os raios-X. Estas lâmpadas emitem raios no comprimento de onda de 253,7 nm, que é o comprimento de maior efeito bactericida (Sobotka, 1993).

A dose de radiação uv é dada pelo produto da intensidade de energia e tempo de exposição, como mostra a equação (1) (Qualls et al., 1983):

$$D = I.t \quad (1)$$

onde:

D: dose de radiação ultravioleta (W.s/cm²);
I: intensidade de radiação germicida (W/cm²); e,
t: tempo de exposição (s).

A fração de sobrevivência (N/N₀) dos microrganismos é uma função direta da dose aplicada:

$$N/N_0 = f(\text{dose}) \quad (2)$$

onde N₀ e N são, respectivamente, a densidade de microrganismos antes e depois da radiação ultravioleta. As equações (1) e (2) sugerem que a intensidade e o tempo de exposição podem ser variados reciprocamente para se obter a mesma fração de sobrevivência (Qualls e Johnson, 1985).

A radiação quando penetra no meio líquido é absorvida por substâncias presentes na água, como matérias orgânicas e dissolvidas, partícula em suspensão, e pela própria água (Sobotka, 1993). Esta absorção segue a lei de Beer-Lambert:

$$I = I_0.e^{-\alpha.x} \quad (3)$$

onde:

* Doutorando em Saneamento pela Faculdade Engenharia Civil da UNICAMP

** Realizado no Instituto Adolfo Lutz – Regional Campinas-SP

I: Intensidade de radiação no meio líquido (W/cm^2);
 I_0 : Intensidade de radiação na fonte (W/cm^2);
 x: espessura da camada líquida (cm); e,
 α : coeficiente de absorção ou absorvância (cm)⁻¹.

Considerando que na superfície líquida $x=0$, a intensidade de radiação é máxima ($I=I_0$), desprezando a absorção pelo ar entre a fonte de radiação e a superfície líquida, e que a intensidade é mínima na profundidade x, pode-se calcular a intensidade média (I_m) integrando a equação (3), resultando em:

$$I_m = \frac{\int_0^x I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \cdot dx}{x} \quad (4)$$

Desta forma, a intensidade média resultante é:

$$I_m = \frac{I_0}{\alpha \cdot x} (1 - e^{-\alpha \cdot x}) \quad (5)$$

Os microrganismos atingidos pela radiação uv sofrem alterações no DNA ou RNA, inativando-os. Esta inativação se deve aos dímeros de pirimidina formados entre moléculas adjacentes de pirimidina do mesmo elemento de DNA, podendo interromper tanto a transcrição como a replicação (Lindenauer e Darby, 1994). A inativação é dada pela função exponencial em relação à dose (Severin, 1980):

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k \cdot I \cdot t \quad (6)$$

onde:

N: microrganismos sobreviventes (UFC/ml);

N_0 : microrganismos iniciais (UFC/ml);

k: taxa constante de inativação ($W \cdot s/cm^2$)⁻¹;

I: intensidade de energia germicida (W/cm^2); e,

t: tempo de exposição (s).

A equação (6) é uma expressão teórica padrão (Daniel, 1993), baseada em observações empíricas (Severin, 1980). Esta equação tem como hipóteses básicas:

- a intensidade da radiação é constante através da camada líquida;
- a absorção pelo meio líquido é desprezível;
- a inativação é função da dosagem de ultravioleta (Severin, 1980; Harm, 1980);
- uma única lesão é suficiente para inativar o microrganismo (Harm, 1980); e,
- a população de microrganismos tem sensibilidade homogênea quanto à radiação uv.

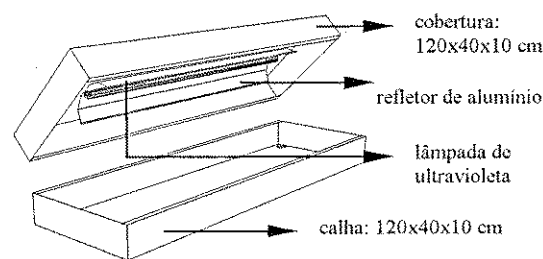
Como foi visto anteriormente, ocorre a absorção pelo meio líquido, e a intensidade da radiação não é homogênea nas camadas líquidas. Assim, pode-se fazer uma correção na equação (6), unindo-a com a equação (5):

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\frac{k \cdot I_0 \cdot t}{\alpha \cdot x} (1 - e^{-\alpha \cdot x}) \quad (7)$$

As câmaras de desinfecção com radiação uv são conhecidos como reatores fotoquímicos. Há vários tipos de reatores fotoquímicos como os de lâmpadas emersas, cilíndricos de câmaras luminosas coaxiais e tipo radial (Braun et al., 1986).

METODOLOGIA

Reator Fotoquímico: o reator utilizado foi o do tipo



de lâmpada emersa, construído em alumínio polido. A figura 1 apresenta o reator e suas dimensões.

FIGURA 1 - Esquema do reator de ultravioleta

A parte inferior é chamada de calha onde é colocada a água a ser desinfetada. Separadamente, foi construído um reservatório auxiliar onde são realizadas as medições de cloro residual, inativação do mesmo e posterior contaminação com os microrganismos.

Lâmpada: foi utilizada uma lâmpada de ultravioleta de baixa-pressão de vapor de mercúrio (marca General Electric) de potência nominal de 30 W.

Cloro Residual: para medir o cloro residual utilizou-se o método da orthotolidina, através de um medidor de "Hellige", equipado com disco colorido.

Absorvância: medida com um espectrofômetro marca Micronal B382, utilizando cubeta de quartzo com caminho óptico de 1 cm, e comprimento óptico de 254 nm.

Intensidade de Radiação Ultravioleta: utilizou-se um radiômetro marca Cole-Parmer Instrument Company modelo 9811 de comprimento de onda de 254 nm.

Dose de radiação ultravioleta: foi determinada através da equação (1), sendo a intensidade considerada como apresentada na equação (5).

Parâmetros Biológicos: para avaliação da qualidade microbiológica da água, uma alternativa foi a pesquisa de organismos indicadores de contaminação fecal. Como indicadores de contaminação fecal foram utilizadas cepas de *Escherichia coli* (ATCC 25922) e *Enterococcus faecalis* (ATCC 7080). Foram utilizados também outros microrganismos, como:

Aeromonas hydrophila (IAL – 1961): que tem sido isolada de amostras de águas cloradas e de fezes de animais. É um patógeno importante, principalmente, para os indivíduos imunodeprimidos;

Vibrio cholerae (569-B não toxigênico – IAL 1954): este organismo é excretado em grande número de pacientes com cólera e convalescentes. A doença é transmitida primariamente pela rota fecal-oral, embora indiretamente por águas de abastecimento;

Pseudomonas aeruginosa (ATCC 14502): amplamente distribuídas na natureza. São patógenos humanos oportunistas, geralmente restritos a pacientes hospitalizados. Sobrevive por vários meses em água a temperatura ambiente, multiplica-se em fluidos e ambientes úmidos.

Realizou-se para cada microrganismo eleito, cepas biofilizadas adquiridas na Seção de Coleção de Culturas do Instituto Adolfo Lutz, uma suspensão em Brain Heart Infusion(BHI)Broth. Foram feitas diluições seriadas de 10^6 a 10^{12} em caldo BHI, exceto para o *V. cloacae* que foi utilizado água peptonada alcalina e semeaduras em meios seletivos e diferenciais, pelo método de superfície e em meio para contagem padrão, a fim de quantificar a carga microbiana inoculada na reservatório auxiliar. Para as contagens padrão em placas utilizou-se o meio Plate Count Agar e a metodologia recomendada pelo "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater". Para identificação e quantificação da *E. coli* foi utilizado o meio Mc Conkey Agar, para o *E. faecalis* o meio Agar Sangue, para a *A. hydrophila* o meio Aeromonas Medium(Bile-salt-Irgasan-Brilliant Green – Agar), para o *V. cholerae* o meio TCBS(Thiosulfate Bile-salt Sucrose Agar) e para a *P. aeruginosa* o meio Cetrimide Agar. Nas amostras coletadas antes e após a incidência da luz a metodologia utilizada foi a mesma descrita para quantificar a carga microbiana.

Operação do Sistema: o reator operou no sistema de batelada (fluxo intermitente), utilizando água do serviço de abastecimento público de Campinas - SANASA. Devido a utilização desta água, houve a necessidade de inativar o cloro residual combinado com tiosulfato de sódio (solução a 3 %) na proporção de 0,1 ml para cada 100 ml, suficiente para neutralizar até 5 mg/l de cloro. Após a inativação, a água foi contaminada com o microrganismo em estudo, e coletada uma amostra para obter a concentração inicial (UFC/ml). Estas primeiras amostras foram coletadas do reservatório auxiliar. A água contaminada foi colocada no reator até a altura da lâmina d'água de 4 cm (volume de 19,2 litros). Então, o sistema foi fechado, operando por 90 segundos, coletando-se amostras a cada 15 segundos. O esquema de amostragem pode ser visto na tabela 1.

Os resultados foram analisados segundo a equação (7), com o objetivo de obter a constante de inativação ultravioleta (k) para cada microrganismo, bem como verificar a eficiência de inativação.

TABELA 1 - Esquema de amostragem

Amostra	Local	Tipo	Tempo
1	Reservatório	verificação do cloro residual	-
2	Reservatório	inativação do cloro residual	-
3	Reservatório	isenção de contaminação	-
4	Reservatório	número inicial de microrg.	-
5	sistema UV	Irradiada	15 s
6	sistema UV	Irradiada	30 s
7	sistema UV	Irradiada	45 s
8	sistema UV	Irradiada	60 s
9	sistema UV	Irradiada	75 s
10	sistema UV	Irradiada	90 s

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A absorvância medida foi de $0,085 \text{ cm}^{-1}$, utilizando a água destilada como solução branco. A intensidade de radiação ultravioleta foi de $0,095 \text{ nW/cm}^2$. Então a intensidade média (equação 5) foi de $80,5 \text{ } \mu\text{Ws/cm}^2$. A dose de radiação ultravioleta (equação 1) para cada tempo de coleta, pode ser observada na tabela 2.

O tempo de exposição de 90 s foi suficiente para inativação de 100% dos microrganismos, exceto o *Enterococcus faecalis* que sofreu uma inativação de 99,99%. Ainda, este tempo de exposição é sempre inferior aos outros desinfetantes. Os resultados experimentais são apresentados na tabela 3. Inicialmente, a *Escherichia coli* e a *Aeromonas hydrophila* foram os microrganismos mais resistentes, e o *Vibrio cholerae* e a *Pseudomonas aeruginosa* foram os menos resistentes. A figura 2 mostra a relação entre a taxa de sobrevivência (N/N_0) em função da dose de radiação ultravioleta aplicada para cada microrganismo.

Com base nos resultados, os dados experimentais foram analisados segundo a cinética de inativação representada pela equação (7), com o objetivo de estimar o valor da constante de inativação (k) com radiação ultravioleta. Os valores das constantes estão apresentadas na tabela 4.

Como pode ser observado pela tabela 4, para todos os microrganismos o coeficiente de correlação (r) foi sempre superior a 0,932. O valor da constante de inativação com ultravioleta (k) varia para cada microrganismo. Esta constante representa a taxa com que ocorre a inativação.

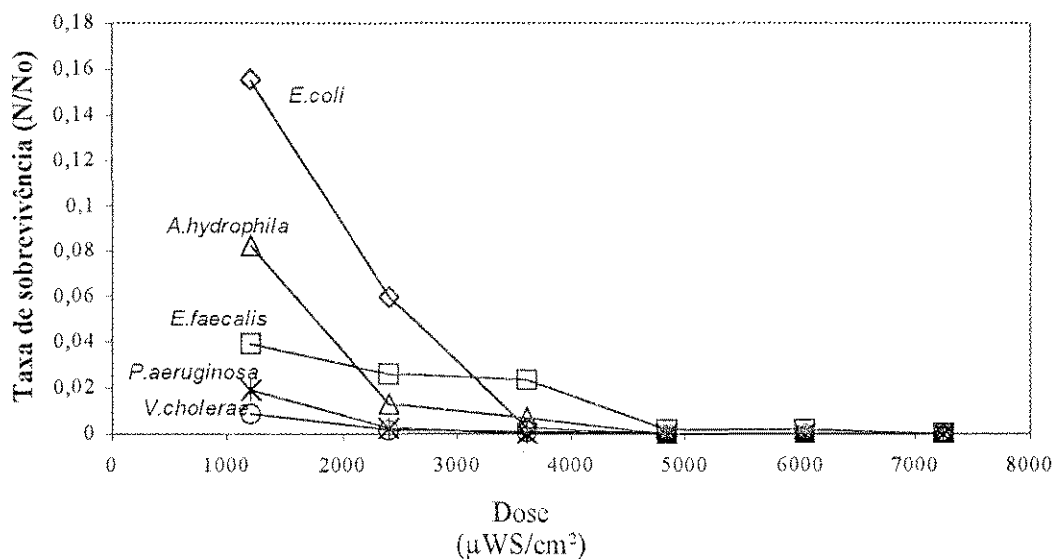
TABELA 2 - Dose de radiação ultravioleta

Tempo (s)	Dose ($\mu\text{Ws/cm}^2$)
15	1207,50
30	2415
45	3622,50
60	4830
75	6037,50
90	7245

TABELA 3 – Resultados Experimentais: relação entre a taxa de sobrevivência (N/N_0) em função da dose de radiação ultravioleta aplicada para cada microorganismo

Parâmetros	<i>Escherichia coli</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Aeromonas hydrophila</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>Vibrio cholerae</i>	
Concentração Inicial (N_0 – UFC/ml)	$2,0 \times 10^6$	$9,30 \times 10^5$	$1,70 \times 10^5$	$7,60 \times 10^5$	$2,20 \times 10^5$	
Fração de sobrevivência (N/N_0)	15 s	0,1555	0,00839	0,0823	0,03947	0,0191
	30 s	0,06	0,00183	0,0129	0,02632	0,0027
	45 s	0,00275	0,00094	0,0071	0,02368	0
	60 s	0,0003	0,00029	0	0,00184	-
	75 s	0	0,00003	-	0,00132	-
	90 s	-	0	-	0,00002	-
Porcentagem de Desinfecção (%)	15 s	84,45	99,16	91,76	96,05	98,09
	30 s	94,00	99,82	98,70	97,37	99,73
	45 s	99,73	99,90	99,29	97,32	100
	60 s	99,97	99,97	100	99,81	-
	75 s	100	99,99	-	99,87	-
	90 s	-	100	-	99,99	-

FIGURA 2 – Taxa de sobrevivência em função da dose de radiação ultravioleta para cada microorganismo



A relação que se estabelece para a constante k entre os microorganismos analisados é dada por:

$$k_{E.coli} > k_{A.hydrophila} > k_{V.cholerae} > k_{P.aeruginosa} > k_{E.faecalis}$$

Esta relação da taxa de inativação é importante para estabelecer critérios para escolha do melhor indicador de contaminação, quando se trabalha com radiação ultravioleta. Então, para a mesma quantidade inicial de microorganismo, a *E. coli* é o primeiro microorganismo a ser inativado, e o *E. faecalis*, o último. Porém, a resistência ao desinfetante é apenas um dos requisitos necessário para um microorganismo ser considerado um indicador de contaminação fecal, outros requisitos como estar presente sempre em maior quantidade que os patógenos, análise

laboratorial rápida, não se reproduzir fora do intestino, e facilidade de detectar e quantificar devem ser levados em consideração. Desta forma, um bom indicador de contaminação seria a *Escherichia coli* conjuntamente com o *Enterococcus faecalis*.

A determinação da dose de radiação ultravioleta é um dos principais fatores da confiabilidade do sistema. Não há ainda no Brasil, uma regulamentação oficial indicando qual deve ser a dose mínima exigida para inativação satisfatória, isto é, dentro dos padrões de potabilidade. A US Publ Health Service (Tobin *et al.*, 1983) recomenda que a dose mínima deve ser de $16.000 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ em todo reator de desinfecção. Esta dose é suficiente para inativar a maioria dos microorganismos patogênicos, principalmente bactérias. A dose para inativação de 100% de *E. coli* é

TABELA 4 – Valor da constante de inativação (k) com radiação ultravioleta para cada microorganismo

Microrganismo	Constante de Inativação k ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ¹	Coefficiente de Correlação (r)
<i>E.coli</i>	$2,50 \times 10^{-3}$	-0,942
<i>P.aeruginosa</i>	$1,74 \times 10^{-3}$	-0,971
<i>A.hydrophila</i>	$2,20 \times 10^{-3}$	-0,932
<i>E.faecalis</i>	$1,23 \times 10^{-3}$	-0,950
<i>V.cholerae</i>	$2,07 \times 10^{-3}$	-0,979

de $6.600 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$, e para *P.aeruginosa* é de $10.500 \text{ mWs}/\text{cm}^2$ (Tobin et al., 1983). Os valores encontrados neste trabalho foram de $5.750 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ para *E.coli*, e $7.245 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ para a *P.aeruginosa*. Esta comparação limita-se aos valores numéricos, ou seja, não está se comparando valores com o mesmo método para determinação da dose. No caso de uma padronização para calcular a dose, a comparação poderia ser completa.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados experimentais obtidos, pode-se concluir pontos importantes com relação ao sistema de

desinfecção com radiação ultravioleta, como:

- a inativação dos microrganismo ocorre em um tempo de exposição (ou contato) menor quando comparado com outros desinfetantes utilizados;
- a dose de radiação ultravioleta para inativação de 100% de *E.coli* ($5750 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) e *P.aeruginosa* ($7245 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) são compatíveis aos encontrados na literatura;
- o coeficiente de correlação foi sempre superior a 0,932, demonstrando que a inativação dos microrganismo comporta-se de acordo com a cinética (eq. 7) proposta;
- a *E.coli* foi o microrganismo de maior resistência inicial, seguida da *A.hydrophila*. Enquanto que o *V.cholerae* e a *P.aeruginosa* foram os menos resistentes, inicialmente;
- o *E.faecalis* foi o microrganismo mais resistente à radiação ultravioleta, sendo que após 90 s não foi completamente inativado. A dose de ultravioleta estimada para sua inativação total é de aproximadamente $10.500 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$.
- O *E.faecalis* pode ser um bom indicador de contaminação, principalmente se utilizado em conjunto com a *E.coli*.

RIALA 6/823

PIRES, M.R.; PISANI, B.; PRANDI, M.A.G.; SIMÕES, M. Desinfection of water with ultraviolet radiation: bactericide efficiency. *Rev. Inst. Adolfo Lutz*, 57(1): 29-34, 1998.

ABSTRACT: Ultraviolet radiation has been accepted as an alternative to chlorination for disinfection of water. The objective of this work is microorganism inactivation survey. A batch reactor, equipped with ultraviolet lamp, was used in the tests. *E.coli*, *P.aeruginosa*, *A.hydrophila*, *E. faecalis* e *V.cholerae* were the microorganism employed for the study of inactivation. The *E.coli* was the bacteria with the strongest initial resistance but the greatest inactivation constant, *E.faecalis* was the most resistant.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - Standart Methods for the Examination of **Water and Wastewater**. 18th ed., Washington, A.P.H.A., 1992, p. 9-32-38.

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

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

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

LINDENAUER, K.G., DARBY, J.L. Ultraviolet disinfection of wastewater : effect of dose on

subsequent photoreactivation. **Water Research**. Great Britain, v.28, n.4, p.805-817, 1994.

PIRES, M.R. **Desinfecção de água de abastecimento com radiação ultravioleta: eficiência bactericida e uma análise econômica e energética**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 88p. Dissertação (Mestrado).

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

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

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

SOBOTKA, J. The efficiency of water treatment and

disinfection by means of ultraviolet radiation. **Water Science Technology**. Great Britain, v.27, n.3-4, p.343-346, 1993.

TOBIN, R.S., SMITH, D.K., HORTON, A., ARMSTRONG, V.C. Methods for testing the

efficacy of ultraviolet light disinfection devices for drinking water. **Journal American Water Works Association**. P.481-484, set.1983.

Recebido para publicação em 26/08/97