



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

II-007 - HIDRODINÂMICA DE UM FOTORREATOR DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA UTILIZADO NA DESINFECÇÃO DE ESGOTOS TRATADOS

Carlota Virgínia Pereira Alves⁽¹⁾

Engenheira Civil e Sanitarista. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Engenheiro Civil e Sanitarista. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne – UK. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Marcos von Sperling

Engenheiro Civil e Sanitarista. Doutor em Engenharia Ambiental pelo Imperial College – UK. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Rua Apucarana, 350 – Bairro Ouro Preto – Belo Horizonte – Minas Gerais – CEP: 31310-520 – Brasil - Tel: (31) 3498-1251

 capialves@hotmail.com

RESUMO

Esta pesquisa avaliou as condições hidrodinâmicas de um fotorreator simplificado de radiação UV para desinfecção de esgotos tratados. O fotorreator utilizado possuía volume de 20,7 L, confeccionado em alumínio com diâmetro de 200 mm e com altura de 90 cm. No seu interior foram instaladas quatro lâmpadas imersas, de baixa pressão de mercúrio, com potência unitária de 30 W. Foram realizados dois testes hidrodinâmicos utilizando-se tecnologia computacional, aliada ao uso de radiotraçadores, permitindo a obtenção da curva de distribuição de tempos de residência (curva DTR). A partir da curva DTR obtida, foram calculados os parâmetros hidráulicos do fotorreator e os resultados comparados com os valores típicos para fotorreatores. Foram realizados também ajustes do fluxo no interior do reator para o modelo de tanques em série. Os resultados encontrados indicaram que o fotorreator trabalhou em regime tendendo ao fluxo em pistão. A avaliação dos parâmetros hidráulicos apontou para a ocorrência de curtos-circuitos e zonas mortas no fotorreator, embora a análise da forma das curvas DTR obtidas não tenha indicado a ocorrência de tais problemas. Os tempos de detenção teóricos ficaram bem próximos dos obtidos através das curvas DTR.

PALAVRAS-CHAVE: desinfecção de esgotos, fotorreator, hidrodinâmica, ultravioleta

INTRODUÇÃO

A radiação ultravioleta é um mecanismo físico, no qual a radiação é absorvida pelos ácidos nucléicos, provocando mudanças no DNA das bactérias, que impedem a replicação das células.

O processo de desinfecção com radiação ultravioleta é realizado em tanques ou canais denominados fotorreatores ou reatores fotoquímicos.

Sob condições ideais, os fotorreatores devem apresentar fluxo em pistão, em que cada elemento do fluido que passa pelo fotorreator permanece no seu interior pelo mesmo período de tempo. No entanto, alguma dispersão sempre ocorre, levando a um fluxo muitas vezes diferente do fluxo em pistão. O fluxo deve ser radialmente turbulento. Isso permite que cada elemento receba a mesma intensidade de radiação dentro do reator.

A característica do fluxo dentro de um fotorreator é descrita pela distribuição dos tempos de residência. A curva de distribuição dos tempos de residência (DTR) é conseguida por meio de uma série de procedimentos experimentais,

conforme descrito em Levenspiel (1972). Depois da curva plotada, determinam-se as características hidrodinâmicas do reator em questão.

A técnica para determinação da distribuição dos tempos de residência de um reator é referida como de estímulo-resposta. O estado do reator é perturbado de alguma maneira e a resposta é observada. Experimentalmente, o desenvolvimento da curva DTR é direta, por meio da injeção de uma substância conservativa na entrada do reator, tipicamente um traçador químico ou radioativo. Como nem todas as moléculas do líquido marcado gastam o mesmo tempo para percorrer uma dada distância, o resultado será que um detector, a uma certa distância do ponto de injeção, "enxergará" a passagem durante um intervalo, muito embora todas as moléculas tivessem sido introduzidas no mesmo instante. Quando utilizados traçadores radioativos, o registro é obtido pela atividade da radiação emitida pelas moléculas do traçador, detectada pela sonda e processada pelo equipamento eletrônico auxiliar (Aun, 1985). A atividade de um radiotraçador pode ser expressa em Curies (Ci), representando a quantidade de núcleos radioativos desintegrados a uma taxa de $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo; ou por contagens de radiação, que representam o número de eventos detectados em um segundo (Division of Radiological Health, 1960). O momento de primeira ordem desta distribuição será o tempo médio de residência (θ).

Um fotorreator ideal deveria apresentar um número de dispersão baixo, da ordem de 0,05 (USEPA, 1986). As propriedades dispersivas de um fotorreator são indicadas pelo espalhamento da curva DTR. O número de dispersão é infinito em um sistema de mistura completa e zero em sistemas com fluxo em pistão. Levenspiel (1972) quantifica e qualifica os números de dispersão como: $d = 0$: fluxo em pistão e nenhuma dispersão; $d \leq 0,01$: baixa dispersão; $0,01 \leq d \leq 0,1$: moderada dispersão; $d > 0,1$: dispersão elevada. Quando a curva DTR apresenta distribuição normal, o número de dispersão pode ser estimado pela variância da distribuição (Levenspiel, 1972).

O índice de dispersão de Morrill, correspondente à relação entre os tempos de passagem de 10% e 90% das contagens de radiação do radiotraçador, indica fluxo em pistão ideal quando igual a 1,0 e mistura completa quando igual a 21,9 (Pires & Paterniani, 2000).

Uma importante consideração no projeto de um fotorreator é a turbulência do fluxo. A importância da turbulência reside no fato de o campo de intensidade em um reator não ser uniforme. Assim, se a partícula é forçada a se mover erratically em condições turbulentas, é provável que ela se exponha a todos os níveis de intensidade dentro do fotorreator. Condições turbulentas são encontradas para número de Reynolds acima de 4000. O regime laminar é descrito por números de Reynolds menores que 2.000, enquanto valores intermediários indicam transição de fluxo laminar para turbulento.

A ocorrência de zonas mortas ou curtos-circuitos dentro do fotorreator deve ser evitada, por significar uso inefetivo das lâmpadas e da potência, componentes esses que representam a maior porção do custo de implantação e de operação de um sistema de desinfecção com radiação UV (USEPA, 1986). As Figuras 1 e 2 apresentam curvas DTR típicas de curtos-circuitos e zonas mortas.

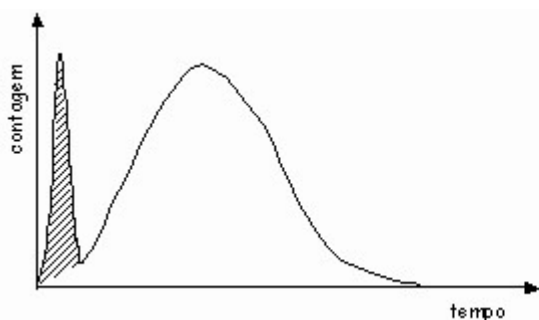


Figura 1: Curva DTR apresentando curtos-circuitos
Fonte: Leclerc (2002)

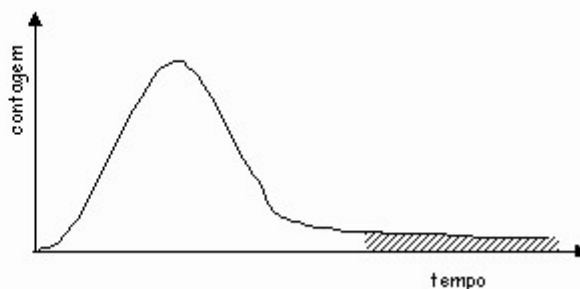


Figura 2: Curva DTR apresentando zonas mortas
Fonte: Leclerc (2002)

O presente trabalho pretende contribuir na avaliação de um fotorreator simplificado de radiação UV para desinfecção de esgotos tratados, no que diz respeito à hidrodinâmica do reator. Para tanto, buscou-se conhecer a distribuição dos tempos de residência dentro do fotorreator e, com isso, permitir o ajuste do reator em termos de número de tanques em série.

MATERIAL E MÉTODOS

O fotorreator (FR) desenvolvido consistiu de uma unidade tubular, construída em alumínio, com diâmetro de 200 mm e com 90 cm de altura total. No interior da tubulação, foram instaladas quatro lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa pressão, potência unitária nominal de 30 W. O efluente a ser tratado era introduzido na câmara de desinfecção pela parte inferior do reator, saindo pela parte superior (ver Figuras 3 e 4).

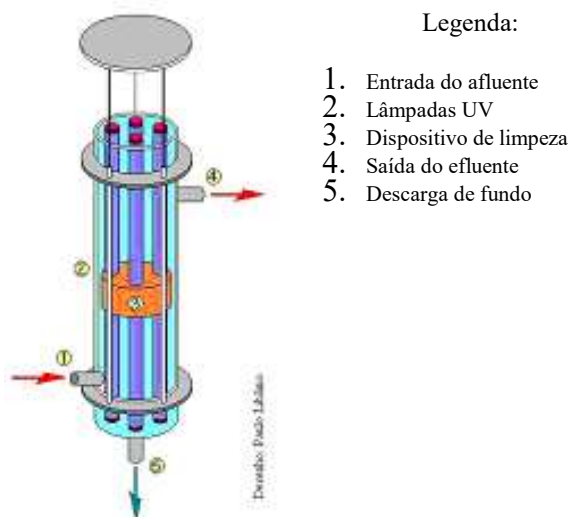


Figura 3: Esquema de funcionamento do FR



Figura 4: Vista geral do FR

Nos testes hidrodinâmicos, realizados em cooperação com o Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), utilizou-se tecnologia computacional, aliada ao uso de radiotraçadores, permitindo a obtenção da curva de distribuição de tempos de residência – curva DTR.

A técnica utilizada para determinação da curva DTR consistiu em marcar a fase aquosa com um traçador radioativo e na colocação de detectores, ligados a um microcomputador, que captavam a presença do traçador radioativo injetado na entrada do fotorreator.

Nos detectores utilizados, a informação da passagem da radiação γ incidente é baseada na emissão de fótons em uma dada substância cintilante, consequência da perda de energia da radiação nesse meio. Ou seja, há conversão da energia radioativa em energia luminosa. A substância cintilante utilizada são cristais de NaI-Tl (iodeto de sódio - tálio), por apresentar elevada eficiência de conversão de energia radioativa em energia luminosa e ser indicado na detecção de raios γ (Tobias, 2002).

O traçador radioativo utilizado em todo o experimento foi o índio 113 metaestável (^{113m}In). O ^{113m}In foi escolhido por apresentar tempo de meia-vida curto (tempo requerido para uma amostra radioativa perder 50% da sua atividade por decaimento, sendo que a atividade representa a quantidade de átomos decaídos por unidade de tempo) e energia de radiação baixos, adequados para os testes e ao mesmo tempo seguros para a disposição do efluente utilizado. A Tabela 1 apresenta as características do ^{113m}In .

Tabela 1: Características do ^{113m}In

Parâmetro	Valor
$T_{1/2}$ (minutos)	99,3
Energia da radiação (keV)	0,39

O procedimento para obtenção da curva DTR iniciava-se com a medição da contagem de fundo (background), quando o traçador radioativo ainda não havia sido injetado no fotorreator. Então, injetava-se uma determinada concentração do traçador com o auxílio de uma seringa comum. A partir daí, foram registradas as contagens de radiação em cada segundo do teste. As contagens de radiação (número de eventos encontrados pelo detector) foram registradas por meio de um software a cada intervalo de tempo determinado, o que possibilitou a obtenção da curva DTR. A Tabela 2 apresenta as duas situações estudadas (testes 1 e 2) e as atividades do traçador no momento de realização dos testes hidrodinâmicos. As Figuras 5 e 6 apresentam o momento da injeção do radiotraçador e os detectores localizados na entrada e na saída do fotorreator.

Tabela 2: Situações estudadas e atividades do traçador durante os testes

Teste	TDH teórico (s)	Concentração do traçador (mCi/mL)	Volume utilizado (mL)	Atividade da amostra injetada(mCi)
1	30	1,0	1,0	1,0
2	90	1,0	1,0	1,0



Figura 5: Injeção do radiotraçador

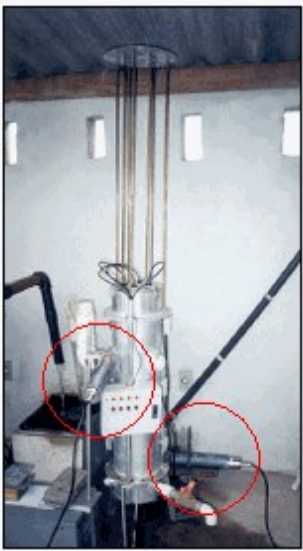


Figura 6: Localização dos detectores de radiação

A partir da curva DTR obtida, foram calculados os parâmetros hidráulicos do fotorreator nas duas situações estudadas e os resultados comparados com os valores recomendados pela USEPA (1986) para fotorreatores. O número de dispersão foi estimado a partir da técnica da variância, como apresentado por USEPA (1986) e Arceivala (1981).

Foi feito um ajuste ao modelo de tanques de mistura completa em série. Para tanto, utilizou-se o software DTR 8, que normaliza a curva DTR original, levando a um tempo de residência médio igual a 1 e a área abaixo da curva igual a 1. O software apresenta um gráfico mostrando os ajustes para o modelo de tanques de mistura completa em série e os parâmetros estatísticos de cada situação. A partir daí, escolheu-se o melhor ajuste, baseado naquele que apresentou o menor erro médio em relação à curva normalizada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados testes hidrodinâmicos utilizando-se diferentes tempos de detenção do efluente no FR, correspondentes a tempos de exposição utilizados no processo de desinfecção. São apresentadas as curvas de distribuição dos tempos de residência encontradas (curvas DTR), bem como o ajuste realizado para o modelo de tanques de mistura completa em série.

Teste 1

O teste 1 foi realizado com o fotorreator operando com um tempo de detenção teórico igual a 30 segundos. A Figura 7 apresenta a curva DTR do teste 1. O ajuste realizado para a curva DTR do teste 1 indicou um modelo de cinco tanques de mistura completa em série, como mostra a Figura 8.

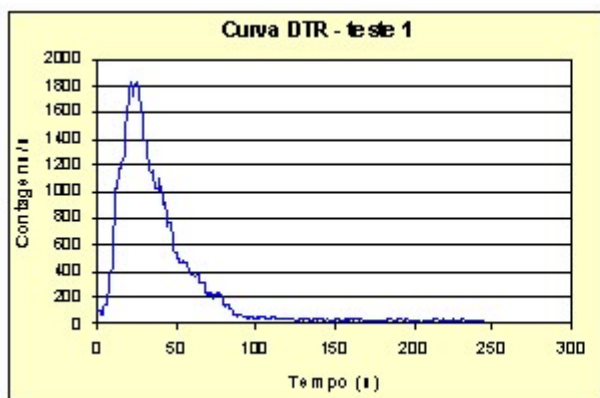


Figura 7: Curva DTR do fotorreator operando com TDH de 30 segundos

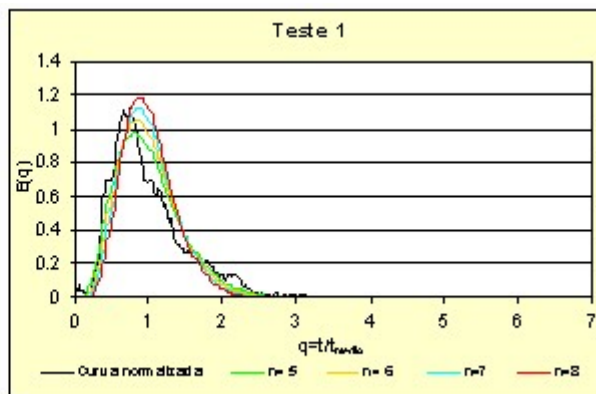
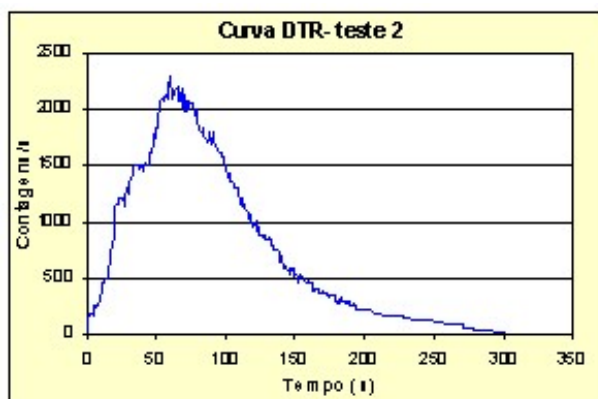


Figura 8: Ajuste da curva DTR do teste 1 para o modelo de tanques em série

Teste 2

O teste 2 foi realizado utilizando-se o fotorreator operando com um tempo de detenção teórico de 90 segundos. A Figura 9 apresenta a curva DTR do teste 2. O ajuste realizado para a curva DTR do teste 2 indicou um modelo de três tanques de mistura completa em série, como mostra a Figura 10.



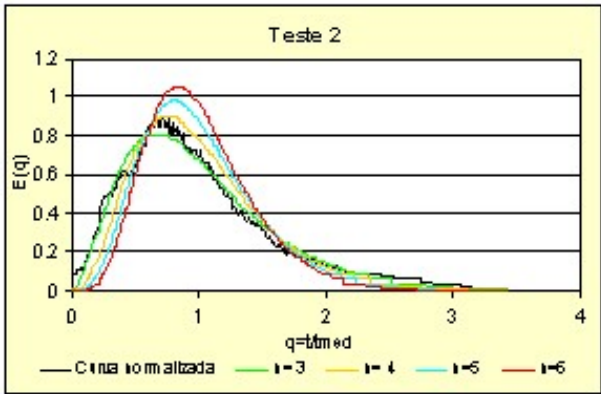


Figura 9: Curva DTR do fotorreator operando com TDH de 90 segundos
 Figura 10: Ajuste da curva DTR do teste 2 para o modelo de tanques em série

Parâmetros hidráulicos

Os parâmetros de interesse para o estudo do comportamento hidráulico do fotorreator são apresentados na Tabela 3, bem como a interpretação desses parâmetros baseados em recomendações da USEPA (1986) para o bom funcionamento de um fotorreator.

Tabela 3: Interpretação dos resultados dos testes hidrodinâmicos

	Teste 1	Teste 2	Recomendação	O que indica a recomendação?
Fotorreator	FR 2	FR 1	-	-
Q (L/s)	0,69	0,23	-	-
T (s)	30	90	-	-
θ (s)	34,6	89,8	-	-
t _f /T	0,03	0,01	> 0,5	Ausência de curto-circuitos
t _p /T	0,83	0,70	> 0,9	Ausência de curto-circuitos ou zonas mortas
t ₉₀ /t ₁₀	3,8	4,0	< 2,0	Fluxo em pistão
θ /T	1,2	1,0	≈ 1,0	Ausência de zonas mortas
t ₅₀ /θ	1,1	1,2	0,9 a 1,1	Ausência de zonas mortas
d	0,19	0,22	< 0,05	Dispersão moderada, aceitável em um FR
Re	2858	952	> 6.000	Regime turbulento

T: tempo de residência teórico; θ : tempo de residência real
 t_f: tempo no qual é detectado o primeiro sinal da atividade do traçador
 t₉₀: tempo de passagem de 90% da atividade do traçador
 t₅₀: tempo de passagem de 50% da atividade do traçador
 t₁₀: tempo de passagem de 10% da atividade do traçador
 t_p: tempo de pico da atividade do traçador

Como apresentado na Tabela 3, a relação t_f/T apresentou valores de 0,03 e 0,01 nos testes 1 e 2, respectivamente. Esses valores foram menores que o mínimo recomendado de 0,5, indicando a ocorrência de curtos-circuitos. Embora a

relação t_p/T ficou ligeiramente abaixo do valor mínimo recomendado (0,9), apresentando valores de 0,83 e 0,70, o que leva a crer que estão ocorrendo zonas mortas ou curtos-circuitos dentro do fotorreator, por outro lado, a relação θ/T esteve sempre próxima de 1,0, bem como a relação t_{50}/θ , indicando ausência de zonas mortas.

A relação t_{50}/θ próxima de 1,0 indica também uma curva DTR próxima de uma curva de distribuição normal, o que foi alcançado nos dois testes (valores iguais a 1,1 e 1,2, respectivamente).

O índice de dispersão de Morrill (t_{90}/t_{10}) indica que o fotorreator trabalha com fluxo próximo ao pistão ideal, pois os valores estiveram sempre mais próximos de 2 (3,8 e 4,0, respectivamente) do que de 21,9.

Os números de dispersão obtidos foram elevados nos testes 1 e 2 (0,19 e 0,22, respectivamente), encontrando-se acima dos valores recomendados pelo USEPA para esse tipo de reator. Porém, aproximam-se das condições de fluxo em pistão.

O número de Reynolds indicou fluxo laminar no teste 2 ($Re=952$) e transição de fluxo laminar para turbulento no teste 1 ($Re=2.858$). Tais resultados não são interessantes para esse tipo de reator, pois o campo de intensidade no seu interior não é uniforme. Com o regime turbulento, as partículas são forçadas a mover erratically, apresentando maior probabilidade de se exporem a todos os níveis de intensidade dentro do fotorreator. O USEPA (1986) recomenda valores maiores de 6.000 para o número de Reynolds quando se deseja utilizar fotorreatores na desinfecção.

Os tempos de residência médios obtidos por meio da curva DTR para os testes 1 e 2 (34,6 e 89,8 segundos, respectivamente) ficaram bem próximos dos tempos teóricos (30 e 90 segundos, respectivamente).

Os resultados alcançados, comparados com as recomendações do USEPA, apontam para a ocorrência de curto-circuitos no fotorreator. Paralelamente à pesquisa foram realizados experimentos no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN) com corante (rodamina) em um fotorreator de acrílico, idêntico ao utilizado no presente trabalho. Esses testes visuais mostraram claramente a inexistência de zonas mortas ou curtos-circuitos dentro do fotorreator. Além disso, a observação da forma das curvas DTR obtidas nos dois testes não indica nenhum dos dois problemas.

CONCLUSÃO

Os testes hidrodinâmicos indicaram que o fotorreator trabalha em regime tendendo ao fluxo em pistão. A avaliação dos parâmetros hidráulicos, baseada em recomendações do USEPA (1986), apontaram a ocorrência de curtos-circuitos e zonas mortas no fotorreator. Todavia, a análise da forma das curvas DTR obtidas não indicam a ocorrência de tais problemas. Quando o FR operou com TDH igual a 30 segundos, obteve-se ajuste para o modelo correspondente a cinco tanques de mistura completa em série e número de dispersão de 0,19. Com TDH igual a 90 segundos, no entanto, o melhor ajuste foi de três tanques de mistura completa em série e número de dispersão igual a 0,22.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP, ao CNPq e à FAPEMIG pelo financiamento da pesquisa e ao CDTN e COPASA pelo apoio na realização dos trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AUN, P.E. *Traçadores radioativos*; princípios. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – Divisão de Engenharia Ambiental, 1985. 30 p. (apostila)
2. DIVISION OF RADIOLOGICAL HEALTH. *Radiological health*; Handbook. Washington: US Department of Health, Education and Welfare, 1960. 468 p.
3. KREFT, P., SCHEIBLE, O.K., VENOSA, A. Hydraulic studies and cleaning evaluations of ultraviolet disinfection units. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v.58, n.12, p.1129-1137, dez. 1986.
4. LECLERC, J.P. Fundamentals of RTD. Curso regional de capacitação sobre uso de traçadores em plantas de tratamento de águas residuárias. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)/Organismo Internacional de Energía Atómica, 2002. (apresentação de Power Point, 46 slides).
5. LEVENSPIEL, O. *Chemical Reaction Engineering*. 2.ed., New York: John Wiley and Sons, 1972, 578 p.
6. PIRES, M.R., PATERNIANI, J.E.S. Desinfecção de esgoto por radiação ultravioleta: estimativa da intensidade e

do tempo de exposição. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MICROBIOLOGIA APLICADA AO SANEAMENTO, 1, 2000, Vitória. Anais...Vitória: [s.n.], 2000. p.160-169.

7. TOBIAS, C.C.B. Detectores, sensores e instrumentação. Curso regional de capacitação sobre uso de traçadores em plantas de tratamento de águas residuárias. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)/Organismo Internacional de Energía Atómica, 2002. (apresentação de Power Point, 20 slides).
8. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Municipal Wastewater Disinfection; Design Manual. EPA 625/1-86/021. Cincinnati: 1986. 247 p.