

COMPARISON OF CHLORINATION, ULTRAVIOLET RADIATION AND SOLAR RADIATION (SODIS), IN CONTINUOUS FLOW FOR WASTEWATER DISINFECTION

COMPARAÇÃO ENTRE CLORAÇÃO, RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA E RADIAÇÃO SOLAR (SODIS), COM FLUXO CONTÍNUO NA DESINFECÇÃO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS

MARCELO JACOMINI MOREIRA DA SILVA¹

JOSÉ .EUCLIDES STIPP PATERNIANI^{2*}

ABSTRACT

This research work had the objective to compare chlorination, ultraviolet radiation (UV), and solar radiation (SODIS) efficiency on domestic wastewater disinfection. Chlorination was made using Sodium hypochlorite, exposition to UV radiation was made using a tubular type reactor with a submerge bulb light and a continuous flow SODIS was constructed at the research institution being a long metallic rectangular channel covered with acrylic transparent plates. The results showed that UV radiation reactor had efficiency values close the ones obtained by chlorination, being an alternative process with lower risks to form carcinogenic products. The continuous flow SODIS did not reach 50° C during evaluation period. This indicated that there are necessities to make reactor conception changes to obtain a continuous flow process efficient as batch SODIS process. Problems arising due to growing of algae in the continuous flow SODIS also were observed.

Keywords: Disinfection, SODIS, rural environment.

¹Pesquisador Colaborador, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, marcelomoreira@petrobras.com.br

²Professor, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, pater@agr.unicamp.br, endereço para correspondência: Faculdade de Engenharia Agrícola – Unicamp, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas – SP, CEP:13083-875

RESUMO

O presente trabalho comparou a eficiência da cloração, radiação ultravioleta e radiação solar (SODIS) em fluxo contínuo, na desinfecção de efluente doméstico. A cloração foi realizada com hipoclorito de sódio, a exposição à luz UV realizada num reator do tipo tubular com uma lâmpada bactericida submersa e o SODIS de fluxo contínuo foi construído na própria instituição de pesquisa, constituindo de um canal longo de seção retangular, de base metálica, laterais e cobertura de acrílico incolor. Os valores obtidos mostraram que a radiação ultravioleta atinge eficiência próxima a cloração sendo um processo alternativo com menor risco de formação de produtos carcinogênicos. A radiação solar (SODIS) não atingiu valores adequados, uma vez que a temperatura no efluente não chegou à 50°C, durante o período de estudo, indicando a necessidade de se realizar algumas alterações na concepção do reator para se obter um processo em fluxo contínuo com resultados tão eficazes como o SODIS em batelada. Problemas relativos a grande proliferação de algas no reator SODIS em fluxo contínuo também foram observados.

Palavras-chaves: Desinfecção, SODIS, polimento de efluentes.

INTRODUÇÃO

A desinfecção tem por objetivo a inativação dos patógenos presentes na água, constituindo uma parte do tratamento de potabilização da água (DANIEL *et al*, 2001).

No tratamento de água os mecanismos mais comuns são a oxidação com ruptura da parede celular e a difusão no citoplasma com interferência metabólica, porém a forte ação oxidante de alguns desinfetantes a base de cloro e a presença de diversas substâncias orgânicas na água, como ácidos húmicos e fúlvicos, levam a formação de subprodutos potencialmente carcinogênicos (AWWA, 1964; TOMINAGA & MIDIO, 1999, DANIEL *et al*, 2001).

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios de escassez de recursos energéticos no futuro (ELETROBRAS, 2004).

O efeito bactericida solar corresponde a radiação UV-A. e do espectro violeta da luz visível, uma vez que as radiações UV-C e UV-B são retidas, quase totalmente, pela camada de ozônio (WEGELIN *et al*, 1994; SODIS, 2009).

A desinfecção por radiação ultravioleta atua por meio físico principalmente nos ácidos nucléicos dos microrganismos desencadeando reações fotoquímicas que os inativam (DANIEL *et al*, 2001).

O cloro é o desinfetante mais utilizado em águas e esgotos, porém, estudos demonstram que o cloro e seus subprodutos podem ser tóxicos à vida aquática. (PIRES, 2002; DANIEL *et al*, 2001; SOARES & MAIA, 1999; ROOK, 1974).

Dentre os motivos pelo qual o cloro é o desinfetante mais utilizado RICHTER & AZEVEDO NETTO (1991) destacam: disponibilidade, baixo custo, fácil de aplicação, deixa residual em solução com fácil detecção; e é capaz de destruir a maioria dos microrganismos patogênicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A instalação piloto para a investigação experimental foi montada no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP localizado no município de Campinas (Latitude 22° 49'05" Sul), que recebe no verão a intensidade média de radiação solar total de 763,17Wm⁻² e no inverno 471,98Wm⁻², calculado com dados referentes aos últimos 30 anos pelo CIAGRO - Centro de Ecofisiologia e Biofísica (2001).

O afluente do experimento consistiu no esgoto doméstico com tratamento terciário, realizado em reatores anaeróbios, leitos cultivados, pré-filtração em leito de pedregulho e filtração lenta.

Cloração

A cloração foi realizada em fluxo contínuo, com bomba dosadora de deslocamento positivo (diafragma), sendo ajustada para que a concentração de cloro residual livre fosse próxima à 2mgL⁻¹.

A escolha do hipoclorito de sódio como composto clorado a ser utilizado deve-se a facilidade de manuseio e ao baixo custo, além da possibilidade de comparação de resultados com outros estudos uma vez que o produto químico em questão é utilizado em diversas pesquisas

Após a aplicação do cloro existe uma caixa de contato, estudada por PIRES (2002) consistindo em um canal com dimensões externas 120 x 40 x 10 cm e subdivide-se com chicanas que possui comportamento tipo pistão e tempo de reação de 30min.

Radiação Ultravioleta

O reator para desinfecção com radiação UV utilizado opera com uma lâmpada submersa no fluxo de água que ocorre por um tubo cilíndrico com diâmetro de 6,5cm e comprimento de 85cm, construído em aço inox com uma lâmpada bactericida no interior de diâmetro 2,5cm, possuindo volume interno útil de aproximadamente 2,4 litros.

Desinfecção solar - Sodis

Este sistema de desinfecção operou em fluxo contínuo, sem qualquer tipo de restrição de fluxo, com início do processo, aproximadamente a partir das 9 horas da manhã, momento em que se inicia o fluxo de efluente tratado, sendo coletadas amostra com tempos de detenção de 4 e 6 horas, com altura da lâmina d'água de 4 cm

Adotou-se tempo de detenção teórico de 4 horas e um reator com fundo preto, e laterais e cobertura de acrílico, constituído por 5 canais de largura 0,22m com comprimento total de 10m (FIGURA 1). Sendo o controle da altura da lâmina d'água controlada pela altura de vertedores instalados na entrada e saída do reator (FIGURA 2).

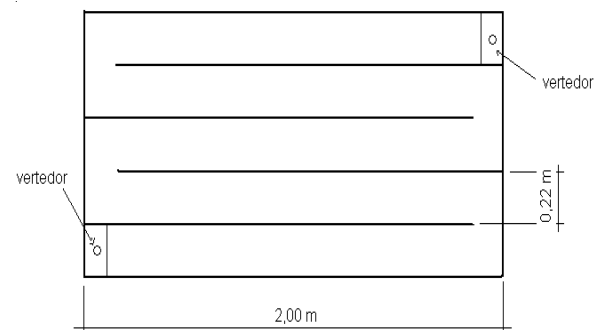


Figura 1- Esquema do Reator Solar.



Figura 2- Vertedores de Entrada e Saída do Reator Solar.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Desinfecção por Radiação Ultravioleta

A desinfecção por exposição à radiação ultravioleta operou com vazão média de sistema $31,5 \text{ Lh}^{-1}$, sendo a dose de radiação ultravioleta é superior à $30.000 \text{ iWscm}^{-2}$ e a vazão de projeto do equipamento de 2.000 Lh^{-1} .

O regime de fluxo laminar não contribuiu para um maior contato das partículas em

suspensão e conseqüentemente microorganismos, com os raios ultravioletas emitidos pela lâmpada resultando em uma baixa eficiência durante alguns ensaios.

Os valores de cor aparente, turbidez e sólidos em suspensão tiveram redução no processo de desinfecção por radiação ultravioleta, como mostra a TABELA 1.

Tabela 1 Concentração média de sólidos em suspensão, turbidez e cor aparente no afluente e efluente do reator ultravioleta

	Afluente	Efluente	Eficiência [%]
Conc. de Sol. em Suspensão [mgL^{-1}]	9,1	6,5	28,3
Concentração Turbidez [FAU]	14	11	20,1
Concentração Cor Ap. [mg(Pt-Co)L^{-1}]	107	84	21,2

As concentrações de ferro e manganês total presente do afluente e efluente do reator UV são baixas, como mostra a TABELA 2, não havendo

influência do sistema de UV sobre este parâmetro no efluente a ser desinfetado.

Tabela 2 - Concentração média de ferro total e manganês total no afluente e efluente do reator ultravioleta.

	Afluente	Efluente	Eficiência [%]
Concentração de Ferro Total [mg(Fe)L^{-1}]	1,64	1,07	34,4
Concentração de Manganês Total [mg(Mn)L^{-1}]	0,127	0,102	19,3

A DQO do efluente teve um aumento com a desinfecção por radiação ultravioleta que era em média de $37,9 \text{ mg[O}_2\text{]L}^{-1}$ para $48,8 \text{ mg[O}_2\text{]L}^{-1}$; em contrapartida a concentração de bactérias do

grupo coliformes e E.Coli tiveram redução média da ordem de 82,4% e 97,7%; respectivamente como mostra a TABELA 3.

Tabela 3- Valores médios de concentração de coliformes totais, *E.Coli* e DQO no afluente e efluente do processo de desinfecção por radiação ultravioleta.

	Afluente ao reator UV	Efluente ao reator UV
Coliformes totais [NMP(100ml)^{-1}]	$3,5 \times 10^5$	$6,1 \times 10^4$
E. Coli [NMP(100ml)^{-1}]	$1,3 \times 10^5$	$2,9 \times 10^3$
DQO [mgL^{-1}]	37,9	48,8

O aumento da DQO reflete um aumento na matéria orgânica a ser degradada devido à inativação de bactérias que passam de biomassa ativa à matéria orgânica não estabilizada.

A concentração de bactérias no efluente já desinfetado mostra que a utilização de radiação ultravioleta reduziu o número de microrganismos, mas não garantiu a inativação na totalidade das amostras.

Desinfecção por Radiação Solar (SODIS)

A desinfecção por radiação solar pelo método SODIS em fluxo contínuo operou com vazão média de $31,2 \text{ Lh}^{-1}$, que representa um tempo de detenção teórico de 4,2h.

durante o processo de desinfecção por radiação solar SODIS devido à proliferação de algas dentro do reator, como mostram as FIGURAS 5 e 6. Esse fato comprometeu a eficiência do sistema ao longo do tempo e indica a inviabilidade do método em fluxo contínuo se o desenvolvimento de algas não for controlado.

Os valores de cor aparente, turbidez e sólidos em suspensão (TABELA 4) aumentaram

Tabela 4 - Concentração média de sólidos em suspensão, turbidez e cor aparente no afluente e efluente do reator SODIS.

	Afluente	Efluente
Concentração de Sol. em Suspensão [mgL^{-1}]	8,2	13,0
Concentração Turbidez [FAU]	17,2	42,9
Concentração Cor Aparente [mg(Pt-Co)L^{-1}]	130,0	219,1



Figura 3 - Foto do reator SODIS após 20 dias de operação



Figura 4- Foto do reator SODIS após 20 dias de operação

As concentrações de ferro e manganês total não havendo influência do sistema de SODIS presente do afluente e efluente do reator UV são sobre este parâmetro no efluente a ser baixas, como mostra a TABELA 5, desinfetado.

Tabela 5- Concentração média de ferro total e manganês total no afluente e efluente do reator SODIS

	Afluente	Efluente
Concentração de Ferro Total [mg(Fe)L ⁻¹]	1,50	1,51
Concentração de Manganês Total [mg(Mn)L ⁻¹]	0,130	0,129

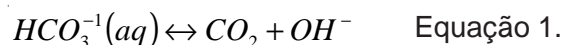
Os valores de pH do afluente e efluente do processo de desinfecção SODIS com mostra a sistema de desinfecção tiveram um aumento com TABELA 6.

Tabela 6 - Valores máximos e mínimos de pH no afluente e efluente do reator SODIS

	Afluente	Efluente
pH - máximo	7,48	9,03
pH - mínimo	6,89	6,89

A elevação do pH está relacionada à proliferação de algas que durante o processo de fotossíntese há consumo de CO₂, deslocando o equilíbrio do íon bicarbonato HCO₃⁻ para OH⁻

(Equação 1). A alteração do pH é sazonal diária pois com a redução da intensidade de luz e a predominância da respiração sobre a fotossíntese há produção de CO₂ (SPERLING, 1996).



O processo de fotossíntese é notado também pelo aumento da concentração de oxigênio dissolvido, em média, de 2,5 mg[O₂]L⁻¹

no afluente e de 8,04 mg[O₂]L⁻¹ no efluente como mostra a TABELA 7, chegando ao valor máximo de 16,70 mg[O₂]L⁻¹.

Tabela 7 Valores médios, máximos e mínimos de concentração de oxigênio dissolvido no afluente e efluente do SODIS, em mg[O₂]L⁻¹

	Média	Máxima	Mínima
Afluente ao SODIS	2,50	5,49	1,00
Efluente ao SODIS	8,04	16,70	2,42

A DQO do efluente sofreu um aumento com a desinfecção SODIS, em média, de 66,3 mg[O₂]L⁻¹ para 98,1 mg[O₂]L⁻¹. O ensaio de DQO foi realizado sem a filtração da amostra, sendo neste aumento de DQO inclusa a parcela referente à proliferação algas.

A temperatura e a concentração de bactérias estão diretamente relacionadas pois a eficiência do SODIS baseia-se apenas na radiação solar, num efeito de sinergismo entre a

radiação ultravioleta emitida pelos raios solares e a elevação da temperatura.

Os valores médios de temperatura do efluente e eficiência de inativação média de bactérias do grupo coliformes foram baixos, como pode ser observado na TABELA 8; não atingindo os valores esperados, durante o período da pesquisa.

A instalação de um concentrador solar semelhante ao desenvolvido pelo IMTA – Instituto

Mexicano de Tecnologia da Água, e estudado por PATERNIANI E SILVA (2005), bem como a instalação de um trocador de calor com isolantes térmicos na entrada do reator SODIS, com o

aproveitamento da água aquecida no mesmo, pode ser uma solução simples e de baixo custo que pode melhorar significativamente a eficiência do processo.

Tabela 8 - Valores médios, máximos e mínimos de concentração de coliformes totais, *E. Coli* e temperatura no afluente e efluente do processo de desinfecção por radiação solar.

	Afluente			Efluente		
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
Col. totais [NMP(100ml) ⁻¹]	2,4 x 10 ⁵	2,4 x 10 ⁶	8,3 x 10 ³	8,0 x 10 ⁴	5,3 x 10 ⁵	6,3 x 10 ³
<i>E. Coli</i> [NMP(100ml) ⁻¹]	5,9 x 10 ⁴	2,4 x 10 ⁵	1,6 x 10 ³	7,5 x 10 ⁴	6,3 x 10 ⁵	0
Temperatura [°C]	24,1	31,4	18,0	31,5	52,0	17,6

Na presente pesquisa utilizou-se o fluxo contínuo como premissa de funcionamento do sistema, não havendo restrições de vazão no reator SODIS para promover o aquecimento, nem

o esvaziamento do reator em períodos noturno, ficando todo o volume de água no reator mesmo em períodos onde é sabido que não há desinfecção.

Desinfecção por Cloração

A desinfecção por cloração com a aplicação de hipoclorito de sódio utilizou o efluente tratado sendo a vazão média de 31,5 Lh⁻¹, sendo o tempo de detenção da caixa de contato superior à 1 hora e a dose de solução de hipoclorito de sódio aplicada de 5 mgL⁻¹

Os valores de sólidos em suspensão, turbidez e cor aparente cada um desses parâmetros podem ser considerados baixos quando se trata de efluentes domésticos tratados, como mostra a TABELA 9.

Tabela 9 - Concentração média, máxima e mínima de sólidos em suspensão, turbidez e cor aparente no afluente e efluente do processo de cloração

	Afluente			Efluente		
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
Sol. em Suspensão [mgL ⁻¹]	8,9	25	3,3	8,5	25	5
Turbidez [FAU]	13,9	24	4	11,1	45	1
Cor Apar. [mg(Pt-Co)L ⁻¹]	106,7	211	28	89,5	190	47

Numericamente o processo de cloração apresentou eficiência de remoção de turbidez de 19,9%, cor aparente de 16,2% e sólidos em suspensão de 4,4%; porém os valores absolutos mostram que não houve variação significativa no processo de desinfecção por cloração.

As concentrações de ferro e manganês total presente do afluente e efluente ao sistema de cloração, assim como nos processos já discutidos anteriormente são baixas, como mostra a TABELA 10.

Tabela 10 - Concentração média, máxima e mínima de ferro total e manganês total no afluente e efluente do processo de cloração.

	Afluente			Efluente		
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
Ferro [mg(Fe)L ⁻¹]	1,64	3,20	0,54	1,25	2,57	0,61
Manganês [mg(Mn)L ⁻¹]	0,127	0,250	0,072	0,103	0,205	0,037

Os valores de pH e Oxigênio Dissolvido do efluente do sistema de cloração apresentaram um pequeno aumento em relação ao afluente (TABELAS 11 e 12).

Tabela 11 - Valores máximos e mínimos de pH no afluente e efluente do sistema de desinfecção por cloração.

	Afluente	Efluente
pH - máximo	7,65	7,73
pH - mínimo	6,52	6,28

Tabela 12 - Valores médios, máximos e mínimos de concentração de oxigênio dissolvido no afluente e efluente do sistema de desinfecção por cloração, em mg[O₂]⁻¹

	Média	Máxima	Mínima
Afluente	3,14	6,37	0,94
Efluente	4,76	9,67	2,12

A elevação desses parâmetros, do mesmo modo que no SODIS, está relacionada à atividade biológicas de algas no tanque de contato que é aberto ficando este exposto a luminosidade, entretanto, a proliferação de algas no tanque de contato é muito menor que no reator SODIS, sendo observada a presença significativa de algas neste.

A DQO do efluente clorado, do mesmo

modo nos processos de desinfecção por radiação ultravioleta e radiação solar, teve um aumento, sendo no afluente em média de 38,8 mg[O₂]⁻¹ e no efluente de 59,5 mg[O₂]⁻¹.

A concentração de bactérias do grupo coliformes e *E.Coli* tiveram redução média da ordem de 85,5% e 82,0%; respectivamente como mostra a TABELA 13, sendo a concentração de *E.Coli* nula em 35% das amostras.

Tabela 13 - Valores médios de concentração de coliformes totais, *E.Coli* e DQO no afluente e efluente do processo de desinfecção por cloração.

	Afluente	Efluente
Coliformes totais [NMP(100ml) ⁻¹]	3,5 x 10 ⁵	5,1 x 10 ⁴
<i>E. Coli</i> [NMP(100ml) ⁻¹]	1,3 x 10 ⁵	2,4 x 10 ⁴
DQO [mgL ⁻¹]	38,8	59,5

O aumento da DQO reflete um aumento na matéria orgânica a ser degradada, tanto pela devido à inativação de bactérias que passam de biomassa ativa à matéria orgânica não estabilizada como pelo desenvolvimento de algas na caixa de contato.

CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que processos utilizando tecnologia de baixo custo reduzem a concentração dos contaminantes presentes no efluente de esgoto tratado.

Os processos de desinfecção utilizados, assim como as filtrações, conferiram ao efluente características mais próximas as desejadas.

A desinfecção por radiação ultravioleta teve como característica principal, confirmando relatos de literatura, a não alteração das características físicas e químicas do efluente a ser desinfetado, restringindo sua atuação à inativação de microorganismos.

A desinfecção por exposição à radiação solar (SODIS) em fluxo contínuo, teve baixa eficiência, sendo esta proporcional à temperatura da água e apresentou grande proliferação de algas.

A desinfecção com aplicação de hipoclorito de sódio teve bons resultados bacteriológicos, sendo possível esterilizar o efluente e manter um residual de cloro livre como exige a portaria 518/2004, entretanto a formação de trihalometanos é tanto maior quanto for o excedente de cloro residual livre no efluente.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo aporte financeiro destinado a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - AWWA. *Água: tratamento e qualidade*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1964. 465p.

CENTRO DE ECOFISIOLOGIA E BIOFÍSICA - CIAGRO. Instituto Agronômico de Campinas. Disponível em <http://www.CIAGRO.br/~ceb>. Acesso em: 1/10/2001.

DANIEL, L.A., BRANDÃO, C.C.S.; GUIMARÃES, J.R.; LIBÂNIO, M.; LUCA, S.J. *Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável*. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB 2., 2001. 139p.

ELETROBRAS; *Energia solar: princípios e aplicações*, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em março de 2009. 28p.

PATERNIANI, J.E.S., SILVA, M.J.M. DESINFECÇÃO DE EFLUENTES COM TRATAMENTO TERCIÁRIO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR (SODIS): AVALIAÇÃO DO USO DO DISPOSITIVO PARA CONCENTRAÇÃO DOS RAIOS SOLARES. *REVISTA ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - ABES*, RJ, VOL.10, N1, JAN/MAR. P. 9-13. 2005.

PIRES, M.R. *Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta: influência da qualidade do efluente e da fotoreativação*. Campinas, 2002. (Tese de Doutorado) – FEAGRI/ UNICAMP.

RICHTER, C.A.; AZEVEDO NETTO, J.M., *Tratamento da água: tecnologia atualizada*. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 332p.

ROOK, J. J.. Formation of haloforms during chlorination of natural water *Water Treatment Examination*; Washington D. C.; vol.23; p. 234-243; 1974.

SOARES, J. B.; MAIA, A. C. F. *Água: microbiologia e tratamento*, Fortaleza: EUFC; 1999; 206p.

SODIS; *Climatic conditions*: solar radiation, Technical Note 5. Disponível em <http://www.sodis.ch> Acessado em: março de 2009.

SPERLING, M.V. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1996. v. 1, 243p.

TOMINAGA, M. Y. & MIDIO, A. F.; Exposição humana a trihalometanos presentes em água tratada. *Revista de Saúde Pública – FSP/USP*; São Paulo; v.33; n. 4; p. 413-421; agosto, 1999.

WEGELIN, M.; CANONICA, S.; MECHSNER, K., ; FLEISHMANN, T. ; PESARO, F.; METZLER, A. Solar water disinfection: scope on process and analysis of radiation experiments. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, IWA Publishing, London, UK, v. 43, n. 3, p. 154 – 169, 1994.