

DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUA: CINÉTICA DO PROCESSO MICROBIOLÓGICO

Paulo Mário Machado Araújo – paulo_mario@unit.br

Lorna Falcão Félix – lorna_ambiental@hotmail.com.br

Tiago Campos Silva – tiagocmps@yahoo.com.br

Universidade Tiradentes, Laboratório de Energia e Materiais, Instituto de Tecnologia e Pesquisa.

2.6 - Outras Aplicações Térmicas

Resumo. Neste trabalho é realizado um estudo experimental e numérico da eficiência de desinfecção, visando a aplicação da energia solar no tratamento de água. A metodologia utilizada no tratamento de desinfecção é a proposta pela solar water disinfection (SODIS). As amostras de água contaminada foram coletadas nas comunidades do Robalo e Saramém locais onde a população é muito pobre e a incidência de doenças de veiculação hídrica é alta. Para as análises microbiológicas, pré e pós-desinfecção, foi utilizado o método Colilert. Os resultados obtidos mostraram uma média de 80 a 100% de eficiência na desinfecção. Trataram-se numericamente os resultados, através do balanço de massa e energia, permitindo assim comparações teóricas e experimentais. Diante dos bons resultados, este estudo apresenta considerações iniciais para o desenvolvimento de uma planta piloto experimental.

Palavras-chave: Energia solar, Desinfecção de água, Comunidades, Microrganismos patógenos.

1. INTRODUÇÃO

São cada vez mais presentes discussões entre organizações civis, instituições acadêmicas, científicas e autoridades governamentais sobre a escassez eminente dos recursos hídricos em nosso planeta. O Brasil, apesar de sua condição aparentemente confortável comparada a outros países, principalmente do oriente médio, não pode ficar alheio a essa questão uma vez que os recursos hídricos no Brasil não estão distribuídos de forma homogênea, e já são muitas as regiões brasileiras que sentem os problemas de falta de água e convivem com freqüentes conflitos por essa razão (Silva, 2004).

Estudos anteriores realizados pelo nosso grupo de pesquisa detectaram a existência de contaminação por bactérias fecais em amostras de água para consumo humano em pequenas comunidades do estado de Sergipe. As comunidades analisadas foram Robalo e Saramém, regiões que apresentavam altos índices de doenças de veiculação hídrica e conseqüentemente altos índices de mortalidade infantil, devido a falta de água tratada. Mas isto ocorre por diversos motivos (geográficos, financeiros, etc), sendo assim a população passa a ser obrigada a ter como fonte de água para sua sobrevivência rios, riachos, represas e poços artesianos freqüentemente contaminados.

A utilização de energia solar como proposta de desinfecção de águas no estado de Sergipe, pode ser tecnicamente viável uma vez que a intensidade solar na região é bastante favorável. Por este motivo e pela importância social que esta pesquisa tem, pois mais de meio milhão de pessoas nesse estado não tem acesso a água tratada. O estudo da utilização da energia solar para desinfecção de águas, além de ser acessível para comunidades menos favorecidas em infra-estrutura, tem a vantagem de utilizar materiais descartáveis como garrafas PET, de acordo com a metodologia proposta pelo SODIS (*Solar Water Disinfection Project*, www.sodis.ch). De acordo com a nota técnica nº 9 da SODIS este método consiste no tratamento da água através do efeito sinérgico da radiação so-

lar e temperatura, eliminando microrganismos causadores de doenças como disenterias, febre tifóide e cólera.

Dale Andreatta *et al.* descreveu diversos métodos para pasteurização de água usando energia solar. Lawand *et al.* descreve que vários litros de água contaminada exposta a radiação solar com intensidade mínima de 500 W/m^2 em um período de 2 a 4 h pode ser eficaz para sua pasteurização. No Brasil, estudos realizados por Brandão *et al.*, com água que apresentava turbidez de 110 NTU e concentração inicial de coliformes totais de $10^6 \text{ UFC (100ml)}^{-1}$ foram inativados 100% dos coliformes em um tempo de exposição de 2 horas e temperatura da água de 50°C .

O objetivo deste trabalho foi quantificar a eficiência de descontaminação de água por energia solar através do estudo da cinética de desinfecção (balanço de massa e energia) e do recrescimento bacteriano, após o tratamento. Com os resultados experimentais e numéricos obtidos são apresentadas considerações iniciais para o futuro desenvolvimento de uma planta piloto experimental, adaptada às necessidades da região.

2. EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Energia e Materiais e no Laboratório de Engenharia de Bioprocessos, Instituto de Tecnologia e Pesquisa, da Universidade Tiradentes. Localizado no município de Aracaju-SE (Latitude $10,9^\circ$ Sul), que recebe a intensidade média de radiação solar total de $1892 \text{ Wh/m}^2\text{ano}$ (Montenegro, 2002).

Foram utilizadas garrafas PET idênticas com capacidade de 2 litros cada. Três experimentos foram realizados com as garrafas: 1- garrafa lisa e transparente; 2 – garrafa lisa envolvida com papel alumínio e 3 – garrafa pintada de cor preto fosco. As garrafas eram transparentes e lisas, para otimizar a absorção da luz (ensaio 2). No ensaio 1, as mesmas garrafas transparentes e lisas foram envolvidas com papel alumínio e no ensaio 3, pintadas de preto fosco. As três garrafas são mostradas na Fig. 1.



Figura 1 – Ensaio realizados utilizando garrafas PET.

A limpeza das garrafas utilizadas no experimento foi feita com água destilada e uso de uma câmara UV, para descartar uma possível contaminação antes do tratamento. As garrafas foram expostas a luz solar durante quatro horas, desde as 11am até as 3pm. A cada hora três garrafas uma opaca, uma transparente e uma preta eram retiradas e analisadas para quantificação, em seu conteúdo, de *E. coli*. Outras três garrafas eram guardadas em uma caixa de isopor para a análise de recrescimento 48hs após o tratamento e assim sucessivamente durante as quatro horas correntes de experimento.

Ao longo do experimento foram obtidas as temperaturas da água, do ambiente, na superfície da garrafa e dentro do fogão solar através de termômetros. As temperaturas da água nos três ensaios são mostradas na Tab. 1. No intervalo de cinco em cinco minutos os dados da radiação solar total foram coletados durante quatro horas de experimento através do piranômetro.

Tabela 1. Temperatura da água ao longo do experimento.

Tempo (Hora)	Tempo de exposição solar (horas)	Temperatura (°C) Ensaio 1	Temperatura (°C) Ensaio 2	Temperatura (°C) Ensaio 3
11am	0	27	28	29
12pm	1	31	38	46
1pm	2	32	40	44,5
2pm	3	32	40	43
3pm	4	32,5	40	42

A quantificação de *Escherichia coli* nas amostras pré e pós-desinfecção foi realizada com a técnica NMP (Número Mais Provável de Microrganismos), utilizando-se o método Colilert, aceito pelo livro Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Todo material utilizado nos ensaios foi cuidadosamente esterilizado. Foram utilizadas cartelas Quanti-Tray/2000, que possuem limite máximo de detecção de 2400 NMP/100ml em amostras brutas. O substrato definido foi diluído em 100 ml de amostra de água a ser analisada, vertido em cartela Quanti-Tray/2000, selado com equipamento adequado, e incubado a 35° C durante 24 h. Para a leitura da concentração de *E. coli*, as cartelas foram expostas a luz UV de 365 nm, e o cálculo do NMP/100ml foi feito utilizando a tabela correspondente (IDEX Quanti-Tray/2000), que mostra os resultados de combinações de células positivas e negativas.

3. CINÉTICA DE DESINFECÇÃO

Balanco de Massa

A cinética de desinfecção é regida pela lei de Chick, que representa o decaimento do número de microrganismos viáveis presentes no meio, num dado instante (Davis & Cornwell, 1997).

Com o objetivo de calcular a constante de morte dos microrganismos (K):

$$dN/d(t) = -k(t) N \quad (1)$$

Logo,

$$-dN/N = -k(t) d(t) \quad (2)$$

Onde:

N: número de microrganismos

K: taxa de decaimento (morte)

t: tempo

De acordo com Donaire & Jardim (1998) a eficiência do tratamento foi determinada pela Eq. (3).

$$E = -\log\left(\frac{N_f}{N_o}\right) \quad (3)$$

Onde:

E: eficiência

N_0 : número de microrganismos antes do tratamento
 N_f : número de microrganismos depois do tratamento

Integrando a Eq. (2) de N_0 até N_f , tem-se;

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t k(t) dt \quad (4)$$

Logo:
$$\int_0^t k(t) dt = \frac{1}{0,434295} * E(t) \quad (5)$$

Então:
$$k(t) = \frac{1}{0,434295} * E'(t) \quad (6)$$

As eficiências para as garrafas pretas e transparentes foram obtidas através da equação 2 e através da interpolação dos dados experimentais, utilizando o polinômio interpolador de Gregori Newton. As taxas de decaimento $k(t)$ foram obtidas através da Eq. (6).

Balanco de Energia

Tabela 2. Dados Adicionais

Propriedades	Fase	
	Água	PET
Viscosidade (μ)	425,76 P	
Calor específico (Cp)	2762,33 kg/m ³	1170 j/kg k
Densidade (ρ)	2434,6261 kg/m ³	1,35 g/cm ³

Dados na temperatura de 37°C
 Supondo a área da garrafa (A) = 706,85 cm²
² h_A : convecção natural = 5-25 kcal/hm² °C
 $T_a = 32^\circ\text{C}$

Fase sólida (PET)

$$\mu_s \rho_s C_{ps} dT_s/dt = \epsilon A I(t) - h_i A (T_s - T_a) - h_i A (T_s - T_a) \quad (7)$$

Fase líquida (Água)

$$\mu_L C_{pL} dT_L/dt = \epsilon_L T A I(t) + h_i A (T_s - T_L) \quad (8)$$

Onde:

μ viscosidade

C_p : calor específico

ρ : densidade

ϵ emissividade

A: área total da garrafa

I: intensidade luminosa (W/m²)

T : Transmissividade

h_i : convecção natural

Ts: temperatura na superfície da garrafa

Ta: temperatura ambiente

T_L: temperatura no líquido

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pH inicial nas amostras de água foi de 6,06. Dentro do limite estabelecido pela Legislação Brasileira, que limita uma faixa de pH entre 6,0 - 9,5.

No início dos experimentos a turbidez inicial da água foi de 1,32 NTU. Segundo a nota técnica nº 7 da SODIS “Para assegurar uma desinfecção eficiente e segura, a água deve ter um teor de turbidez menor que 30 NTU”.

A temperatura das amostras de água nos ensaios 1 e 2 tiveram significativo aumento durante a primeira hora de exposição solar, mas se observa que o ensaio 3, com garrafas pretas, foi sempre superior no período total de exposição solar.

Os dados da radiação solar total estão representados na Figura 2. Percebe-se que após duas horas de exposição solar (1:00 às 15:00hs) a radiação solar caiu devido a presença de nuvens.

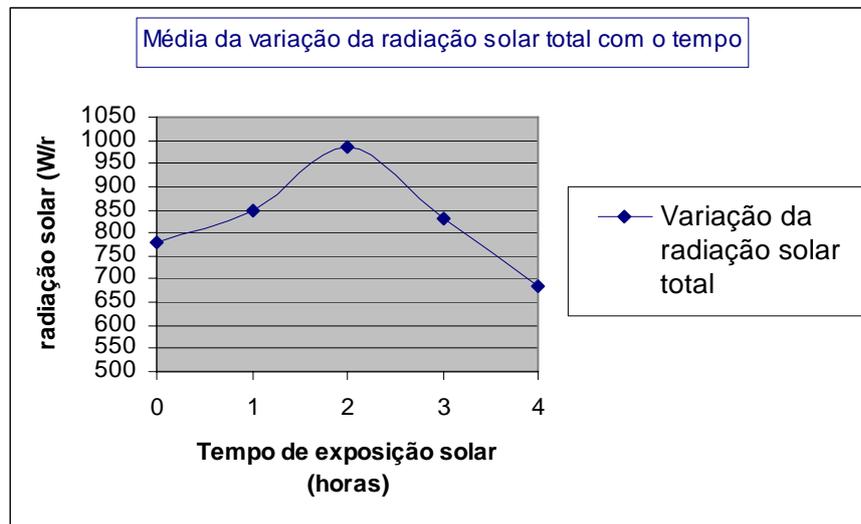


Figura 2: Média da radiação solar total ao longo do tempo de exposição solar (11:00 às 15:00hs).

O estudo da cinética de desinfecção leva em consideração a eficiência do tratamento (Eq. 2 e Fig. 3) e a análise numérica para o cálculo da constante de morte (Eq. 3 e Fig. 4), conjuntamente revelam que o tempo ótimo para o processo de descontaminação da água ocorreu no intervalo das 2-3h de exposição, no ensaio 3 e para o ensaio 2 entre 1-2h de exposição.

Como era de se esperar, o ensaio na garrafa opaca apresentou eficiência zero. Este experimento serviu como referencial.

O ensaio 2, (garrafas pretas) obteve bons índices na eficiência de descontaminação, mas com significativo decaimento, devido a ausência da radiação solar (figura 3).

A análise do tratamento mostra, a partir do estudo da cinética de desinfecção, que a melhor eficiência foi obtida no ensaio 3, com papel fundamental da temperatura ao longo do tempo. Observa-se na figura 3 que o efeito da temperatura começa a ser expresso após 1h de experimento, atingindo uma eficiência máxima de 0,6176 e em seguida observa-se um leve decaimento.

A eficiência do SODIS, segundo revisão bibliográfica, está diretamente relacionada com a temperatura da água e com presença de radiação solar, sendo recomendado o mínimo de 50°C e tempo de exposição de 6 horas; entretanto em algumas regiões com baixa incidência de radiação solar ou presença de nuvens é recomendado que a exposição seja feita por períodos maiores, devido à fatores que possam limitar a eficiência da desinfecção, como a própria latitude do local, presença de nuvens, época do ano, entre outras (Silva, 2004).

O recrescimento bacteriano tem função importante na manutenção da potabilidade da água, uma vez que este tipo de tratamento não possui caráter residual. Os dados desta fase dos experimentos estão na Tab. (2), onde mostra que em todos os ensaios ocorreu recrescimento bacteriano depois de 48 horas de confinamento. Pode-se justificar este recrescimento devido a alta contaminação inicial, ao tempo de exposição solar e a temperatura não terem sido adequados para o tratamento.

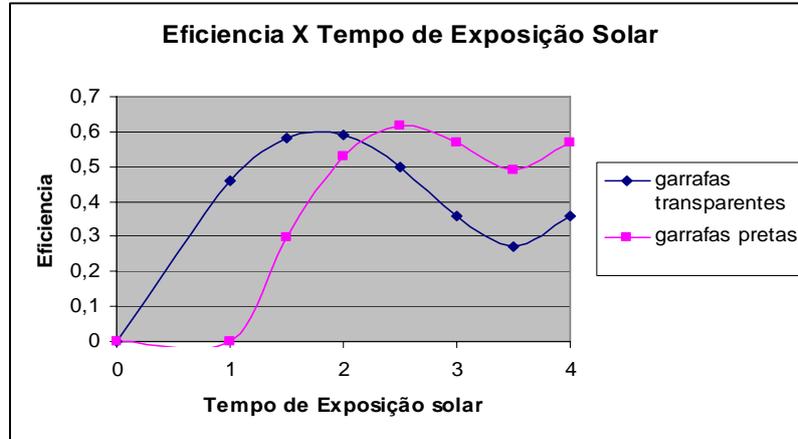


Figura 3. Variação da eficiência de desinfecção da água, para a E. coli, em função do período de exposição solar, das 11:00 às 15:00hs.

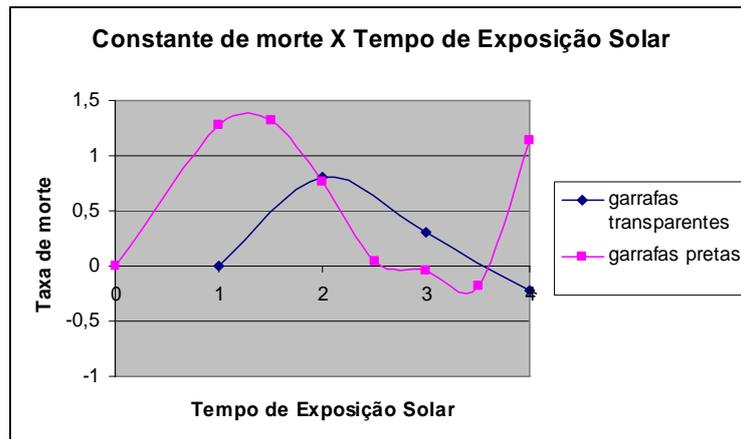


Figura 4. Variação da taxa de decaimento na garrafa preta e transparente, com o tempo.

Tabela 3. Quantificação de E. coli do ensaio 2 (garrafa transparente)

Garrafa Transparente Tempo exp. Solar (horas)	<i>Escherichia coli</i>			
	N_0 NMP/100ml	N NMP/100ml	Eficiência $-(\log N/N_0)$	Porcentagem (%)
11:00-T0	$2,4 \times 10^3$	$2,4 \times 10^3$	0	0
12:00-T1	$2,4 \times 10^3$	$8,2 \times 10^2$	0,46	46
13:00-T2	$2,4 \times 10^3$	$6,1 \times 10^2$	0,59	59
14:00-T3	$5,5 \times 10^3$	$2,4 \times 10^3$	0,36	36
15:00-T4	$5,5 \times 10^3$	$2,4 \times 10^3$	0,36	36

Tabela 4. Quantificação de *E. coli* do ensaio 3(garrafa preta)

Garrafa Preta Tempo exp. Solar (horas)	<i>Escherichia coli</i>			
	N ₀ NMP/100ml	N NMP/100ml	Eficiência -(logN/N ₀)	Porcentagem (%)
11:00-T0	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³	0	0
12:00-T1	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³	0	0
13:00-T2	2,4 x 10 ³	6,8 x 10 ²	0,53	53
14:00-T3	2,4 x 10 ³	6,4 x 10 ²	0,57	57
15:00-T4	2,4 x 10 ³	6,4 x 10 ²	0,57	57

Tabela 5. Recrescimento de *Escherichia coli* nas garrafas preta, transparente e opaca depois de 48 horas de confinamento.

Tempo exp. Solar (horas)	<i>Escherichia coli</i> Recrescimento (48 horas)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
11:00-T0	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³
12:00-T1	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³
13:00-T2	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³
14:00-T3	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³
15:00-T4	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³	2,4 x 10 ³

A partir desses estudos pretende-se projetar uma planta piloto experimental de desinfecção de água utilizando energia solar em comunidades sergipanas carentes, como Robalo e Saramém. No entanto, para o desenvolvimento da planta piloto, entender o mecanismo de eficiência da cinética de desinfecção torna-se de fundamental importância para responder questões importantes, por exemplo: Qual a influência da radiação solar no tratamento? A temperatura é primordial para que ocorra desinfecção? E o efeito combinado da radiação com a temperatura? Qual a relação custo/benefício/operacionalidade? Esses questionamentos poderão ser respondidos com a realização de novos experimentos, utilizando amostras de água com diferentes graus de contaminação microbológica, e diferentes condições de tratamento. Por exemplo, poderá ser verificada a eficiência da desinfecção de água em outra estação do ano, como o verão, quando a intensidade da radiação solar é maior.

O método SODIS tem um custo/benefício/operacionalidade vantajoso, uma vez que pode ser aplicável em comunidades carentes, pois seu custo é baixo. Porém, para que essa tecnologia seja tecnicamente viável, deve-se atingir uma eficiência de desinfecção maior, bem como índices aceitáveis na diminuição do recrescimento bacteriano.

5. Conclusão

Com os resultados obtidos no presente trabalho pode-se concluir que:

A presença de nuvens reduz a incidência de radiação solar, bem como a eficiência do SODIS, ou seja, a radiação solar foi primordial no ensaio 2.

No ensaio 3, a temperatura da água foi a mais elevada durante a desinfecção, ocasionado uma melhor eficiência na desinfecção.

Em todas as amostras ocorreu recrescimento bacteriano, após 48hs de confinamento.

A pesquisa realizada mostrou-se atrativa pelo fato de possibilitar o estudo científico de uma tecnologia que tem como principal objetivo a disponibilização de água tratada para comunidades carentes, com baixo custo. Tais tecnologias muitas vezes são utilizadas sem o conhecimento da confiabilidade do processo, o que não é adequado quando se trata de tratamento de água. Na revisão de literatura percebe-se que a metodologia proposta pelo SODIS é uma tecnologia promissora que beneficiará milhares de pessoas, mas sua utilização, apesar da simplicidade operacional, deve ser feita de forma adequada e correta. Fatores como a alta concentração inicial de *E. coli*, o tempo de exposição solar e a temperatura da água devem ser levados em consideração, evitando assim sua ineficiência no tratamento da água.

Espera-se nos próximos experimentos atingir uma média de 80-100% na eficiência de descontaminação e índices aceitáveis no recrescimento bacteriano, para assim projetar uma planta piloto experimental em comunidades como Robalo e Saramém-SE.

REFERÊNCIAS

- Apha, awwa, wef; Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater; 20th ed.; Washington D. C., 1998, 11p.
- Brandão, C.C.S., Monteiro, P.C.G., Fonseca, B.M., Arantes, C., Avaliação da Desinfecção Solar na Região Centro-Oeste do Brasil Usando Diferentes Organismos Indicadores de contaminação, XX-VII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.
- Davis, M. L. Cornwel, D. A. Introduction to environmental engineering. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1998. 919 p.
- Dale Andreatta PE, Yegian DT, Connelly L, Metcalf RH. Recent Advances in devices for the Heat Pasteurization of drinking water in the Developing World. 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC-94), vol. 4, 1994. p. 1741-6.
- Donaire, P.P.R Jardim, W. de F. Desinfecção Solar de Aguas repressa em Campina Grande, Paraíba, Brasil, projeto OEA, 2003.
- Herrera, A. G., Desinfecção Solar Del Agua, IMTA – Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua, Mexico, 2003.
- Montenegro, A. A. Fontes não convencionais de energia as tecnologias solar, eólica e de biomassa. 3. ed. rev. modificada e ampl. Florianópolis: 2000, 208p.
- Moreira da Silva, M.J. Desinfecção de Água utilizando Energia Solar. (SODIS):Inativação e Recrescimento Bacteriano. Campinas : UNICAMP, 2004. 81p. Tese de Mestrado.
- Sodis Efficiency: The Process, Technical Note #9, <http://www.sodis.ch>, outubro de 2004.
- Sodis in Brief, Technical Note #1, <http://www.sodis.ch>, outubro de 2003.
- Sodis; Climatic Conditions: Seasonal Effects and Weather Changes, Technical Note #2, <http://www.sodis.ch>, outubro de 2004.
- Sodis; Climatic Conditions: Seasonal Effects and Weather Changes, Technical Note #7, <http://www.sodis.ch>, outubro de 2004.
- Sodis; Climatic Conditions: Seasonal Effects and Weather Changes, Technical Note #11, <http://www.sodis.ch>, outubro de 2004.
- Sodis; Climatic Conditions: Seasonal Effects and Weather Changes, Technical Note #16, <http://www.sodis.ch>, outubro de 2004.