

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

**SINERGISMO EM DESINFECÇÃO SEQUENCIAL COM
APLICAÇÃO DE CLORO E RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA**

Aluna: Natália Fischer

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Daniel

Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia Ambiental da
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo.

São Carlos, SP

2010


FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Natália Fischer

Monografia defendida e aprovada em: 30 de setembro de 2010 pela Comissão Julgadora:




Prof. Dr. Luiz Antonio Daniel



Profa. Dra. Marcia Helena R. Z. Damianovic



Dra. Luci Sartori



Prof. Dr. Marcelo Zaiat
Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

À minha família e a todos
os amigos que sempre
estiveram presentes.

AGRADECIMENTOS

À minha família e amigos, que sempre estiveram presentes, e me apoiaram em todas as escolhas.

Ao Professor Luiz Antonio Daniel, pela orientação e ajuda.

Aos amigos do curso de Engenharia Ambiental, sempre presentes.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, e a todos que compartilharam as dependências do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas Residuárias – LATAR, pela ajuda e companhia durante a execução deste trabalho e durante os anos de graduação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela concessão da bolsa de iniciação científica (Processo 07/59995-0).

RESUMO

FISCHER, N. **Sinergismo em desinfecção sequencial com aplicação de cloro e radiação ultravioleta**. 2010. 63 f. Monografia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

O presente trabalho teve por objetivo estudar a ação do cloro e da radiação ultravioleta na inativação dos organismos indicadores *Escherichia coli* e colifagos, durante o processo de desinfecção de esgoto sanitário submetido a tratamento biológico em reator anaeróbio do tipo UASB. Foi utilizado o efluente proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos do Campus USP – São Carlos - SP. Na primeira etapa do trabalho estudou-se a ação do cloro e da radiação ultravioleta, separadamente. Foram realizados 12 ensaios utilizando o cloro, nos quais se estudaram as concentrações de 5,5; 8,5; 10,0 e 16,7 mg/L, submetidas cada uma aos tempos de contato de 5, 10 e 15 minutos. Os ensaios com radiação ultravioleta foram realizados estudando-se as doses de 0,2; 0,4; 0,6; 1,0; 2,0 e 3,0 Wh/m³. A maior redução de *E. coli* observada foi de 5,40 log, obtida com o tempo de contato de 5 minutos com a aplicação de 8,5 mgCl₂/L. Pôde-se observar que, nos ensaios com cloro, o aumento da concentração não resultou necessariamente num aumento da inativação de *E. coli* e colifagos, sendo observada grande dependência das características físico-químicas do afluente bruto para a efetividade da ação do desinfetante. Quanto aos colifagos, a maior redução obtida foi de 2,59 log, com a dose de radiação ultravioleta de 0,4 Wh/m³. Observou-se maior resistência da *E. coli* à ação da radiação ultravioleta, e por sua vez, maior resistência dos colifagos à ação do cloro. Na segunda etapa, realizaram-se os ensaios de desinfecção sequencial, baseados nos resultados da primeira etapa. Foram realizados 9 ensaios, nos quais foram estudadas as concentrações de 1,5; 3,0 e 4,5 mgCl₂/L, cada uma com os tempos de contato de 3, 5 e 7 minutos. Cada combinação de concentração e tempo de contato foi submetida às doses recebidas de radiação ultravioleta de 0,1; 0,2 e 0,3 Wh/m³. Para *E. coli*, a maior redução observada com o ensaio seqüencial foi de 5,54 log, resultante de 4,5 mg/L de cloro com 3 minutos de contato seguido de 0,3 Wh/m³ de radiação ultravioleta. Para os colifagos, a maior inativação foi de 2,10 log, após cloro a 3,0 mg/L, por 7 minutos, seguido de dose 0,1 Wh/m³ de radiação ultravioleta. O sinergismo foi observado para os dois indicadores estudados, *E. coli* e colifagos, independentemente da concentração e tempo de contato de cloro, nos ensaios em que a dose recebida de radiação ultravioleta foi igual a 0,2 e 0,3 Wh/m³. A ocorrência do sinergismo mostra que a desinfecção sequencial pode trazer benefícios econômicos, pela redução das dosagens dos desinfetantes sem o comprometimento da eficiência da desinfecção.

Palavras-chave: Desinfecção de águas residuárias, esgoto sanitário, cloro, radiação ultravioleta, *E. coli*, colifagos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhes do reator de desinfecção com radiação ultravioleta (COLETTI, 2003)...	21
Figura 2 - Inativação de E. coli para os Experimentos A e B.....	30
Figura 3 - Inativação de colifagos para o Experimento B	30
Figura 4 - Inativação de E. coli para os Experimentos C (5,5 mgCl ₂ /L), D (8,5 mgCl ₂ /L) e E (10,0 mgCl ₂ /L)	36
Figura 5 - Inativação de colifagos para os Experimentos C (5,5 mgCl ₂ /L), D (8,5 mgCl ₂ /L), E (10,0 mgCl ₂ /L) e F (16,7 mgCl ₂ /L)	36
Figura 6 – Inativação de E. coli para a concentração de cloro 1,5 mg/L, para os Experimentos G (3 min), H (5 min) e I (7 min).....	50
Figura 7 – Inativação de E. coli para a concentração de cloro 3,0 mg/L, para os Experimentos J (3 min), K (5 min) e L (7 min).....	51
Figura 8 – Inativação de E. coli para a concentração de cloro 4,5 mg/L, para os Experimentos M (3 min), N (5 min) e O (7 min)	51
Figura 9 – Inativação de colifagos para a concentração de cloro 1,5 mg/L, para os Experimentos G (3 min) e H (5 min).....	52
Figura 10 – Inativação de colifagos para a concentração de cloro 3,0 mg/L, para os Experimentos J (3 min), K (5 min) e L (7 min).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento A	28
Tabela 2 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento B	29
Tabela 3 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento C	32
Tabela 4 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento D	33
Tabela 5 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento E.....	33
Tabela 6 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento F.....	34
Tabela 7 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento G	40
Tabela 8 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento H	41
Tabela 9 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento I.....	42
Tabela 10 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento J.....	43
Tabela 11 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento K	44
Tabela 12 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento L.....	45
Tabela 13 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento M.....	46
Tabela 14 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento N	47
Tabela 15 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento O	48
Tabela 16 – Verificação do sinergismo para E. coli, para a concentração de cloro 1,5 mg/L – valores de Ir	54
Tabela 17 – Verificação do sinergismo para E. coli, para a concentração de cloro 3,0 mg/L – valores de Ir	54
Tabela 18 – Verificação do sinergismo para E. coli, para a concentração de cloro 4,5 mg/L – valores de Ir	55

Tabela 19 – Verificação do sinergismo para colifagos, para a concentração de cloro 1,5 mg/L
– valores de Ir 55

Tabela 20 – Verificação do sinergismo para colifagos, para a concentração de cloro 3,0 mg/L
– valores de Ir 55

SUMÁRIO

RESUMO.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VI
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
3.1. Desinfecção com cloro	12
3.2. Desinfecção com radiação ultravioleta	14
3.3. Desinfecção sequencial	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1. Ensaio de desinfecção com cloro	18
4.2. Ensaio de desinfecção com radiação ultravioleta	20
4.3. Ensaio de desinfecção sequencial	23
4.4. Exames microbiológicos	24
4.4.1. Preparo das amostras e diluições	24
4.4.2. <i>Escherichia coli</i>	25
4.4.3. Colifagos	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1. Ensaio com radiação ultravioleta	27
5.2. Ensaio com Cloro	32
5.3. Ensaio sequenciais com cloro e radiação ultravioleta	39
6. CONCLUSÕES.....	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

APÊNDICE.....64

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Historicamente, acompanhou-se a relação entre questões de saneamento com a saúde humana. Estudos da Organização Mundial de Saúde demonstram que, no mundo, somente a diarreia, que tem como agentes etiológicos vírus, bactérias e protozoários, é responsável pela morte de 1,8 milhão de pessoas por ano. Estima-se que 88% dos casos de transmissão dessa enfermidade sejam causados por questões ligadas ao saneamento básico (WHO, 2004).

Ao mesmo tempo, o crescimento da demanda mundial por recursos naturais causa preocupação com a preservação dos recursos hídricos. O reúso de águas residuárias emerge como uma alternativa, mais sustentável ambientalmente, à irrigação de culturas agrícolas. A prática do reúso aumenta as preocupações com o controle da transmissão de organismos patogênicos, visto que o tratamento convencional de esgotos domésticos não promove redução satisfatória da concentração destes organismos, o que não elimina o risco da permanência do ciclo das doenças causadas por organismos patogênicos como *Giardia lamblia*.

Tanto para esta prática, quanto para o lançamento de efluentes em corpo d'água, deve-se enquadrar a qualidade microbiológica do efluente, minimizando o impacto gerado por estas atividades. No Brasil, a Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005) estabelece os padrões de emissão de efluentes, assim como a classificação dos corpos d'água. O controle microbiológico dos efluentes deve ser realizado levando em consideração a concentração de coliformes termotolerantes ou *E. coli*. Para a emissão de efluentes em corpos de água doce, classificados como classe 2, não deve ser excedido o limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros.

Nesse contexto, insere-se a importância dos processos de desinfecção de águas residuárias e de abastecimento. Destacam-se então os diferentes agentes desinfetantes utilizados, entre eles o cloro e a radiação ultravioleta.

O cloro é o desinfetante mais utilizado, em especial pelo seu caráter econômico, visto que se trata de um agente químico relativamente comum e de baixo custo. Seu uso é justificado e tem por vantagem o alto conhecimento de sua tecnologia e sua alta eficácia. (USEPA, 1999a)

A busca por desinfetantes alternativos ao cloro foi desencadeada especialmente pela descoberta do caráter carcinogênico de alguns dos subprodutos gerados pelo uso de cloro no processo de desinfecção de águas com elevado teor de matéria orgânica, como trihalometanos. Ainda, pela necessidade de realização do processo de descloração para minimização dos impactos gerados pelos residuais de cloro em ambientes aquáticos.

A radiação ultravioleta apresenta-se como um desinfetante alternativo ao cloro, constituindo-se em um agente físico para a desinfecção. Outros agentes químicos podem ser utilizados, como o ozônio ou o ácido peracético.

O diferente comportamento dos organismos indicadores frente à ação de diferentes agentes desinfetantes tem levado ao desenvolvimento de processos combinados de desinfecção. Busca-se, principalmente, aumentar, ou manter, a eficiência dos processos de desinfecção, promovendo benefícios econômicos, como a redução da dose dos desinfetantes quando usados em conjunto.

A proposta da presente pesquisa foi usar o cloro, numa das etapas, como referência por ser o desinfetante de uso mais difundido, embora esteja relacionado com a formação de subprodutos prejudiciais à saúde humana, e a possibilidade de manutenção de residual (massa não consumida que permanece em solução no efluente desinfetado) que é tóxico à biota do corpo receptor. Numa segunda etapa o cloro foi usado em conjunto com a radiação ultravioleta com duplo propósito: avaliar o efeito sinérgico da aplicação sequencial de desinfetantes e a descloração promovida pela radiação ultravioleta.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve por objetivos:

- Avaliar a inativação dos organismos indicadores *E. coli* e colifagos frente à ação dos desinfetantes cloro e radiação ultravioleta em duas etapas: cloro, radiação ultravioleta e o método combinado cloro seguido de radiação ultravioleta.

- Avaliar a ocorrência de efeitos sinérgicos decorrente da combinação dos desinfetantes cloro e radiação ultravioleta na desinfecção de *E. coli* e colifagos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Desinfecção com cloro

A desinfecção com o uso de cloro constitui a prática mais comum no Brasil, principalmente no abastecimento de água, sendo uma tecnologia bastante conhecida. Utiliza-se o cloro em sua forma gasosa ou por compostos de cloro na forma líquida ou sólida, como o hipoclorito de cálcio (GONÇALVES et al., 2003).

Os requerimentos para a cloração variam conforme as características do efluente, como pH e temperatura, sendo que compostos orgânicos podem afetar a demanda de cloro. A geração de subprodutos decorrentes do processo de cloração também depende dessas características (DIAS, 2001).

O cloro é um forte agente oxidante, e por isso sua utilização como desinfetante implica em alterações nas características químicas e biológicas da água. A respeito da influência da cloração na matéria orgânica presente na água, El-Rehaili (1995) observou, em estudos realizados com esgoto sanitário, que, para dosagens de cloro entre 5 e 50 mg/L houve um aumento contínuo da DQO e DBO₅

no efluente clorado. Para dosagens acima de 50 mg/L, o aumento foi de 100%. O aumento na DBO e DQO foi entendido como resultado da possível modificação provocada pelo cloro na matéria orgânica no efluente, que foi levada a uma forma mais biodegradável e passível de oxidação.

A interferência da cloração na DQO se dá ainda pela reação dos íons cloreto com os íons prata, um dos reagentes da análise de DQO. O cloreto reage com o íon prata, precipitando cloreto de prata, inibindo sua ação catalítica. Estas interferências restringem a ação oxidante o íon dicromato, outro reagente da análise. Como resultado, os valores de DQO aumentam (APHA, AWWA e WEF, 2005).

Os sólidos em suspensão apresentam grande relação com a eficiência da desinfecção com cloro, pois a ocorrência de organismos associados às partículas em suspensão limita a ação do desinfetante. A esse respeito, Winward et al (2007) observaram, em estudos realizando cloração de água cinza visando o reuso, que acima de 91% dos coliformes totais encontrados na água cinza clorada, para um tempo de contato de 10 minutos, estavam em associação com partículas. Neste estudo observou-se ainda que o aumento do tempo de contato resultou num aumento da penetração do cloro nas partículas. Entretanto, mesmo com o maior tempo de contato estudado, de 120 min, concentração de cloro inicial de 20 mg/L e residual de cloro livre superior a 5,0 mg/L, a penetração completa do cloro nas partículas não foi atingida.

Para estudos da inativação de *E. coli* utilizando cloro, Souza (2005) obteve baixas eficiências de inativação para águas com maior concentração de matéria orgânica. A matéria orgânica presente na água foi apontada como um fator influente na eficiência de inativação de *E. coli* devido à competição que ocorre com reações de oxidação e redução e substituição que se iniciam quando o cloro é adicionado à água. Como residual, no mesmo estudo, foi encontrada baixa quantidade de cloro livre, estando este em compostos combinados, reduzindo assim sua ação bactericida.

Estudos como os realizados por Tyrrell et al. (1995) demonstram que o cloro é mais eficaz em inativar populações bacterianas do que vírus. Neste estudo, comparou-se o cloro e o ozônio como desinfetantes de esgoto doméstico submetido a tratamento biológico, provenientes de quatro diferentes

estações de tratamento. Observou-se que o cloro, em sua forma combinada, foi eficaz em reduzir a densidade de coliformes fecais e eliminar bactérias vegetativas, mas, no geral não foi eficaz em eliminar os indicadores virais colifagos somáticos e bacteriófagos (*male-specific*). O mesmo estudo expõe a fragilidade do uso de somente coliformes fecais como indicador de poluição fecal.

3.2.Desinfecção com radiação ultravioleta

A radiação ultravioleta é um processo físico de desinfecção, que provoca reações fotoquímicas que alteram componentes moleculares essenciais às células. Conforme a radiação penetra na parede celular do organismo, a alteração provocada em ácidos nucléicos e outros componentes vitais às células provocam a morte destas. (USEPA, 1999b)

USEPA (1999a) destaca que a efetividade da ação da radiação ultravioleta não é limitada por fatores químicos. Os mesmos autores, citando AWWA e ASCE (1990), afirmam que fatores como pH, temperatura e alcalinidade não apresentam impacto sobre a efetividade da desinfecção com UV.

Entretanto, interferências físicas podem existir. O mais significativo é a existência de material dissolvido ou suspenso. O material suspenso age como escudo para os organismos, protegendo-os da ação do desinfetante, e reduzindo a efetividade da desinfecção. (USEPA, 1999b)

Potencialmente, subprodutos podem surgir como resultado da desinfecção com UV. Tais subprodutos podem ser resultantes de reações fotoquímicas, ou de reações com produtos originados de reações fotoquímicas. A formação de tais subprodutos depende tanto da concentração dos reagentes quanto da dose de UV. Pode ocorrer a conversão da matéria orgânica em formas mais facilmente degradáveis. (USEPA, 2006)

Aguiar et al. (2002), em ensaios para determinação da inativação de *E. coli* utilizando a radiação ultravioleta obteve, para tempos de contato de 3 e 5 minutos, eficiência de 100 %, para águas com cor e turbidez moderadas. As menores eficiências foram obtidas para o tempo de contato de 1

minuto, sendo da ordem de 4 log.

Koivunem et al. (2005), realizando ensaios em escala laboratorial utilizando meio sintético similar a águas residuárias, obtiveram com a radiação ultravioleta maiores inativações de colifagos MS2 em relação a *E. coli*. Neste estudo, doses de UV de 6 a 18 mWs/cm² levaram a inativação de 1 a 3 log de bactérias entéricas, como *E. coli* e *Enterococcus faecalis*. No entanto, foram necessárias doses de 22 a 38 mWs/cm² para obter inativação de 1 a 1,5 log de colifagos MS2.

Liberti et al (2002) realizaram experimentos utilizando esgoto sanitário submetido a tratamento por lodos ativados seguido de sedimentação, e efluente submetido a tratamento posterior com precipitação com policloreto de alumínio, clarificado e submetido a filtração em filtro de areia. No primeiro caso, foi utilizada dose de 160 mWs/cm², contra 100 mWs/cm² no segundo caso. Em ambos, a radiação ultravioleta mostrou-se eficaz na inativação de *Giardia lamblia* e *Cryptosporidium parvum*, com remoção média de 60 e 65%, respectivamente. O mesmo estudo mostrou que para as doses utilizadas para a desinfecção de águas residuárias não foi observada a formação de subprodutos da desinfecção, como nitrofenol.

A ausência de um residual após a desinfecção pode ser apontada como um problema no uso da radiação ultravioleta, pois pode ocorrer o recrescimento de microrganismos. A esse respeito, Gilboa (2008), em estudos realizados com água cinza, observou o recrescimento significativo de bactérias heterotróficas após seis horas da aplicação de altas doses de UV, de 147 e 439 mWs/cm². O efluente da desinfecção foi armazenado em câmara escura durante o período de análise. Entretanto, para doses baixas a médias, 19 a 69 mWs/cm², esse recrescimento não foi observado.

3.3.Desinfecção sequencial

A maioria dos estudos de aplicação de desinfecção sequencial está relacionada à desinfecção de água de abastecimento. Por esse motivo as citações são referentes ao tratamento de água.

Entretanto, a ação dos desinfetantes sobre os microrganismos é semelhante tanto em água de abastecimento quanto em esgoto sanitário.

O uso de múltiplos desinfetantes é uma alternativa no processo de desinfecção que visa conjugar os efeitos dos desinfetantes, buscando uma ação sinérgica entre eles. É prática usual a combinação entre um desinfetante químico e um físico, buscando não promover a geração de potenciais subprodutos tóxicos da desinfecção (USEPA,1999^b).

A desinfecção seqüencial é considerada opção viável de tratamento para inativar microrganismos patogênicos tais como (oo)cistos de protozoários, bactérias que formam esporos, os quais não podem ser inativados efetivamente com somente uma etapa de desinfecção, normalmente com cloro. No método de desinfecção seqüencial o desinfetante primário, seja ozônio, dióxido de cloro ou radiação ultravioleta, é aplicado no primeiro estágio e o desinfetante secundário, por exemplo, cloro, é aplicado para completar a desinfecção com inativação dos organismos mais resistentes (CHO et al, 2006).

Os efeitos sinérgicos decorrentes da conjugação de um desinfetante químico e um físico foram observados por Koivunem et al. (2005) que no uso de ácido peracético seguido de radiação ultravioleta obtiveram aumento na inativação de bactérias entéricas (*E. coli*, *E. faecalis* e *S. enteritidia*). Para colifagos, esse aumento não foi observado, indicando a maior resistência deste organismo aos processos de desinfecção, mesmo quando combinados.

Especificamente para a água de abastecimento, pelo fato de a radiação ultravioleta não deixar residual no efluente tratado, é interessante seu uso combinado com outro desinfetante que mantenha residual para garantir a continuidade da desinfecção, como o cloro. (USEPA,1999^b)

Driedger et al (2000) obtiveram que a inativação de *Cryptosporidium parvum* com cloro livre foi caracterizada por fase de retardo (*lag*) seguida de cinética de pseudo-primeira ordem. Ao se utilizar o método seqüencial com ozônio e cloro livre foi observado o efeito sinérgico com rápido decaimento da viabilidade dos oocistos de *C. parvum* para pH 6 a 7,5, não havendo efeito sinérgico em pH 8,5. Concluíram que o efeito sinérgico estava relacionado mais ao ácido hipocloroso que ao íon

hipoclorito. Resultados semelhantes foram obtidos por Corona-Vasquez et al (2002).

Jung et al (2007) demonstraram que o processo combinado ozônio-radiação ultravioleta resulta em maior efeito sinérgico para inativação de *Bacillus subtilis* quando comparado a outros métodos – ozônio, radiação ultravioleta, seqüência de radiação ultravioleta-ozônio, seqüência de ozônio-radiação ultravioleta. Cabe destacar a diferença entre processo combinado e processo seqüencial de desinfecção. No processo combinado os desinfetantes são aplicados ao mesmo tempo e no seqüencial aplica-se um desinfetante aguardando-se o tempo de contato para depois aplicar outro desinfetante.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de desinfecção foram realizados com efluente proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos do campus da USP - São Carlos. A ETE dispõe de reator anaeróbio UASB, alimentado com esgoto *in natura* submetido a tratamento preliminar (gradeamento, remoção de areia e remoção de gorduras).

Na primeira etapa do trabalho foram realizados os ensaios de desinfecção com cloro e com radiação ultravioleta, separadamente, tendo como organismos indicadores *E. coli* e colifagos. A metodologia dos ensaios de desinfecção com cloro está apresentada em 5.1 – Ensaio de desinfecção com cloro, e dos ensaios de desinfecção com radiação ultravioleta em 5.2 – Ensaio de desinfecção com radiação ultravioleta.

Na segunda etapa foram realizados os ensaios de desinfecção seqüencial aplicando o cloro seguido da radiação ultravioleta. A metodologia dos ensaios de desinfecção seqüencial está apresentada em 5.3 – Ensaio de desinfecção seqüencial.

Em todos os ensaios foram quantificados pH, temperatura, sólidos totais, sólidos suspensos totais, alcalinidade e DQO (APHA, AWWA e WEF, 2005), *Escherichia coli* e colifagos para o

afluente e efluente.

4.1. Ensaios de desinfecção com cloro

Os ensaios de desinfecção com cloro foram realizados em equipamento de Jartest, utilizando béqueres de 2 L de capacidade, contendo 1,5 L do efluente do reator UASB. Para os ensaios, foi utilizada solução-mãe de hipoclorito de sódio, armazenada em frasco de vidro âmbar mantido em câmara fria. A concentração desta solução foi determinada no início da realização de cada ensaio.

Para a determinação da concentração de cloro na solução-mãe é realizada sua diluição, adicionando-se 0,5 mL de solução à 1500 mL de água destilada. Após homogeneização da amostra realiza-se a leitura de cloro residual livre, pelo método DPD colorimétrico (APHA, AWWA e WEF, 2005). Do valor da concentração da solução diluída de cloro calcula-se a concentração da solução-mãe, segundo as equações (1) e (2):

$$C1 \times V1 = C2 \times V2 \quad (1)$$

$$C1 = \frac{C2 \times 1500}{0,5} \quad (2)$$

C1: Concentração da solução-mãe de cloro

V1: Volume da solução-mãe de cloro

C2: Concentração da solução diluída

V2: Volume da solução diluída

De posse da concentração de cloro na solução-mãe, calcula-se o volume da solução-mãe necessário para obter a concentração requerida de cloro para os ensaios, segundo as equações (3) e (4):

$$C1 \times V1 = C3 \times V3 \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{C_3 \times 1500}{C_1} \quad (4)$$

C1: Concentração da solução-mãe de cloro

V1: Volume da solução-mãe de cloro

C3: Concentração a ser obtida

V3: Volume do efluente do reator UASB utilizado no ensaio

Para a execução do ensaio, adiciona-se o volume requerido da solução-mãe de cloro ao béquer contendo o volume de 1500 mL do efluente do reator UASB. Tomou-se o cuidado de manter o gradiente de agitação do Jarrest por volta de 70 s^{-1} , de maneira a obter uma boa homogeneização da amostra. Essa agitação é mantida constante durante o tempo de contato pré-estabelecido para o ensaio.

Após o fim do tempo de contato, é realizada a leitura de cloro residual livre e total, pelo método DPD colorimétrico (APHA, AWWA e WEF, 2005). A ação do cloro é interrompida com a adição de metabissulfito de sódio ao conteúdo do béquer para a realização das análises e exames, excluía a análise de cloro residual.

Após o término do ensaio, são coletadas as amostras necessárias à realização dos exames físico-químicos e microbiológicos, observando-se os procedimentos para a sua preservação até o momento da realização dos exames.

Neste trabalho foram estudadas as concentrações de cloro (C) de 5,5; 8,5; 10,0 e 16,7 mg/L, submetidas cada uma aos tempos de contato (T) de 5, 10 e 15 min. Obteve-se 12 combinações CT, que foram divididas em quatro experimentos.

Em relação à análise da eficiência do processo de desinfecção, a variabilidade da qualidade do esgoto coletado, ao longo dos dias de execução dos ensaios, dificulta a análise dos resultados. Então, é utilizada a fração sobrevivente (N/No), - N: concentração de microrganismos após a desinfecção, No: concentração de microrganismos anterior à desinfecção - para análise dos resultados de inativação dos microrganismos indicadores *E. coli* e colifagos.

Em todos os ensaios foram determinados para o afluente e efluente da desinfecção: temperatura, pH, alcalinidade total, sólidos totais, sólidos suspensos totais e DQO (APHA, AWWA e WEF, 2005), além da quantificação de *E. coli* e colifagos, conforme a metodologia apresentada em 4.4.1 Preparo das amostras e diluições, 4.4.2 *Escherichia coli* e 4.4.3. Colifagos. Todas as análises de cloro residual livre e total foram realizadas pelo método DPD colorimétrico (APHA, AWWA e WEF, 2005).

Toda a vidraria, frascos de coleta e frascos de diluição utilizados nos ensaios foi esterilizada em autoclave ou em câmara de radiação ultravioleta.

4.2. Ensaios de desinfecção com radiação ultravioleta

Os ensaios de desinfecção com radiação ultravioleta foram realizados em batelada, em unidade de bancada, conforme apresentado na Figura 1. A opção por uma unidade de bancada foi tomada por possuir melhor controle operacional da dose de UV que um reator de vazão constante (pela necessidade de conhecimento da hidrodinâmica).

Neste estudo, o reator foi utilizado com 3 lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio, cada qual com uma potência de 15 W. Os ensaios foram realizados com lâmina líquida de 3 cm. Tomou-se o cuidado de alocar o reator sobre quatro agitadores magnéticos, mantidos ligados durante a execução dos ensaios, de modo a garantir que houvesse uma homogeneização adequada da amostra.

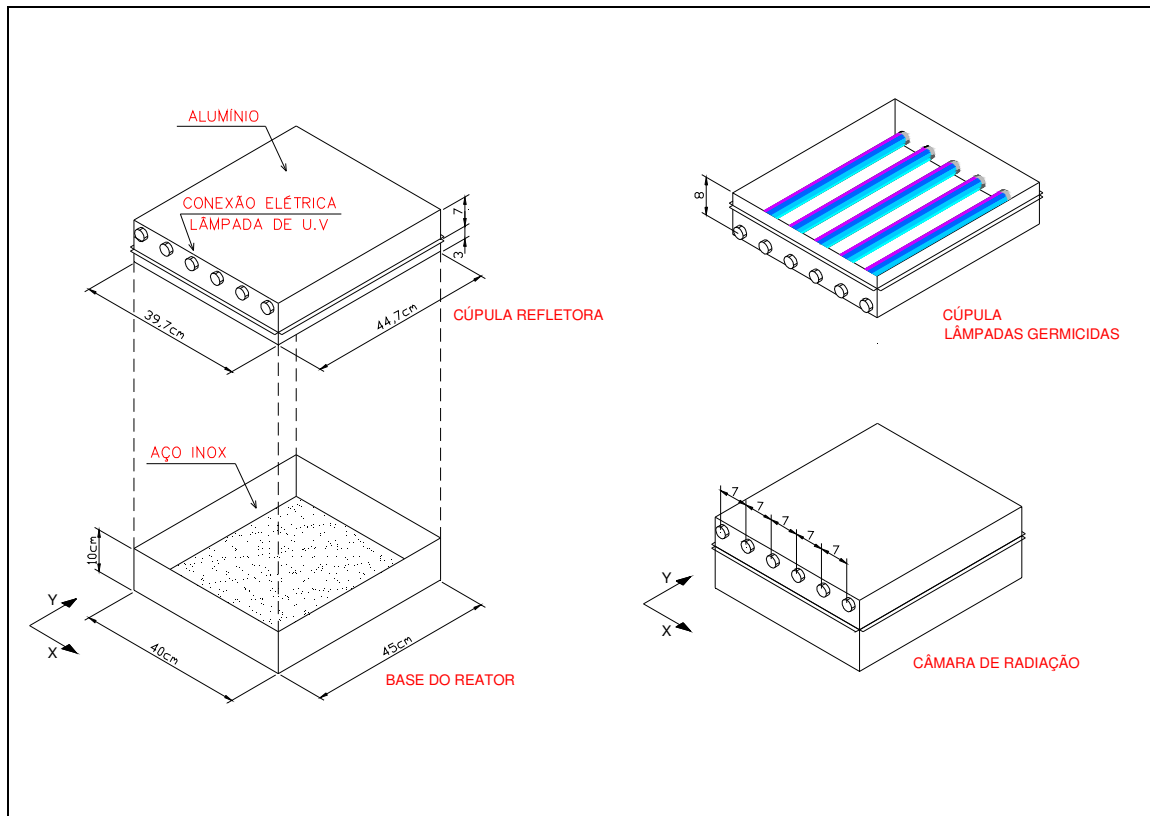


Figura 1 – Detalhes do reator de desinfecção com radiação ultravioleta (COLETTI, 2003)

A determinação da radiação emitida pela lâmpada de baixa pressão de vapor de mercúrio, em comprimento de onda de 254 nm, foi feita por radiometria. Foram determinados 9 pontos na base do reator, onde foram medidas a intensidade da radiação emitida pelas lâmpadas. A partir da média aritmética dos valores encontrados, obtém-se a intensidade da radiação ultravioleta na superfície da lâmina líquida, I_0 .

Para obtenção das doses uma alíquota do esgoto é coletada e é medida a sua absorvância em comprimento de onda de 254 nm, com a qual, considerada a espessura da lâmina líquida do reator, é calculada a dose média recebida em Wh/m^3 . A intensidade média de radiação é calculada pela lei de BEER-LAMBERT, obtendo-se o coeficiente de extinção em comprimento de onda de 254 nm em espectrofotômetro com cubeta de quartzo com trajetória de 1 cm. A partir do valor desejado para a dose recebida calcula-se o tempo necessário para seu alcance.

O roteiro para o cálculo da dose recebida, conforme descrito por Daniel et al (2001), está apresentado nas equações (5) a (7).

$$a = 2,303 \times Abs \quad (5)$$

$$I_m = \frac{I_o}{a \times L} \times [1 - \exp(-a \times L)] \quad (6)$$

$$Dr = \frac{I_m \times t}{L} 0,2778 \quad (7)$$

a: Coeficiente de extinção (cm^{-1})

Abs: Absorbância

I_m : Intensidade média de radiação ultravioleta (mW/cm^2)

I_o : Intensidade de radiação ultravioleta na superfície do líquido (mW/cm^2)

L: Espessura da lâmina líquida

t: Tempo de exposição (s)

Dr: Dose recebida por volume (Wh/m^3)

Na primeira etapa foram estudadas as doses recebidas de 0,2; 0,4; 0,6; 1,0; 2,0 e 3,0 Wh/m^3 , resultando num total de 6 ensaios envolvendo radiação ultravioleta.

Em todos os ensaios foram determinados para o afluente pH, temperatura, alcalinidade total, sólidos totais, sólidos suspensos totais, e DQO (APHA, AWWA e WEF, 2005). No afluente e no efluente foi realizada a quantificação de *E. coli* e colifagos.

Toda a vidraria, frascos de coleta e frascos de diluição utilizados nos ensaios foi esterilizada em autoclave ou em câmara de radiação ultravioleta. O reator de desinfecção foi lavado com água corrente, e antes de cada ensaio, as lâmpadas permaneceram ligadas por pelo menos 10 minutos para desinfecção do reator.

4.3. Ensaios de desinfecção sequencial

Os ensaios de desinfecção sequencial foram realizados em batelada, analogamente ao descrito para os ensaios utilizando os desinfetantes separadamente. O desinfetante primário utilizado foi o cloro, seguido da radiação ultravioleta.

A desinfecção com cloro foi realizada seguindo a metodologia aplicada na primeira etapa da pesquisa. Utilizou-se equipamento de Jarrest, com 5 béqueres contendo 1,5 L do efluente do reator UASB, para cada ensaio. Foi utilizada solução de hipoclorito de sódio, armazenada em vidro âmbar em câmara fria.

Após o fim do tempo de contato estudado, realizava-se a leitura de cloro residual total e livre de um dos béqueres, e em seguida interrompia-se a reação do cloro adicionando-se uma alíquota de metabissulfito de sódio ao seu conteúdo. Deste béquer, eram retiradas as amostras necessárias aos exames físico-químicos e microbiológicos.

Nos demais béqueres não foi adicionado metabissulfito de sódio, e do conteúdo destes se seguia a desinfecção com a radiação ultravioleta, analogamente ao realizado na primeira etapa do trabalho. Não se realizou a interrupção da reação do cloro no ensaio visando observar os efeitos sinérgicos da ação dos dois desinfetantes, cloro e radiação ultravioleta, sequencialmente. Por este motivo, poderá ter ocorrido efeito combinado – residual de cloro e radiação ultravioleta – conjuntamente ao efeito seqüencial.

Nesta etapa, submeteu-se o efluente da desinfecção com cloro a 3 doses de radiação ultravioleta, aplicadas em seqüência. Ao final do tempo de cada dose estudada, retiravam-se as amostras necessárias para os exames microbiológicos, interrompendo-se então a reação do cloro com a adição de metabissulfito de sódio. Ao final da última dose aplicada realizava-se a leitura do cloro residual total e livre.

Para que não houvesse um aumento significativo do tempo de contato da reação com o cloro, resultante do tempo necessário à leitura da absorbância a 254 nm do efluente clorado para o cálculo do

tempo necessário à aplicação das doses estudadas de radiação ultravioleta, este cálculo foi realizado com a absorbância a 254 nm do afluente bruto. Posteriormente à desinfecção, lia-se a absorbância do efluente clorado, e recalculava-se a dose recebida. Em nenhum dos ensaios observou-se alteração significativa da dose recebida.

Nesta etapa do trabalho foram estudadas as concentrações de cloro (C) de 1,5; 3,0 e 4,5 mg/L, submetidas cada uma aos tempos de contato (T) de 3, 5 e 7 minutos. Resultou-se assim em três combinações CT. As doses recebidas de radiação ultravioleta foram de 0,1; 0,2 e 0,3 Wh/m³. Resultou-se num total de 9 ensaios com a desinfecção sequencial.

Em todos os ensaios foram determinados para o afluente e efluente da desinfecção: temperatura, pH, alcalinidade total, sólidos totais, sólidos suspensos totais e DQO (APHA, AWWA e WEF, 2005), além da quantificação de *E. coli* e colifagos.

As análises de cloro residual foram realizadas pelo método DPD colorimétrico (APHA, AWWA e WEF, 2005).

Toda a vidraria, frascos de coleta e frascos de diluição utilizados nos ensaios foi esterilizada em autoclave ou em câmara de radiação ultravioleta. O reator de desinfecção foi lavado com água corrente, e antes de cada ensaio, as lâmpadas permaneceram ligadas por pelo menos 10 minutos para desinfecção do reator.

4.4.Exames microbiológicos

4.4.1. Preparo das amostras e diluições

As amostras utilizadas para os exames microbiológicos foram submetidas a diluições decimais, com valores variáveis em função da concentração e tempo de contato do cloro, bem como da dose recebida de radiação ultravioleta.

Para a realização das diluições, utiliza-se água de diluição preparada com a adição de duas soluções estoque. A solução estoque A é preparada com a adição de 34 g de fosfato monopotássico (KH_2PO_4), a 1000 mL de água destilada, e a solução estoque B com a adição 81 g de cloreto de magnésio hexahidratado ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a 1000 mL de água destilada.

Para o preparo da água de diluição, são adicionados 1,25 mL da solução estoque A e 5,00 mL da solução estoque B a 1000 mL de água destilada. Transferem-se 90 ± 2 mL para frascos, que devem ser autoclavados 121°C por 15 min, e armazenados em geladeira.

Para a realização das diluições, transfere-se alíquotas de 10 mL da amostra, ou da respectiva diluição, para os frascos contendo 90 ± 2 mL da água de diluição. Assim, obtém-se a primeira, ou respectiva diluição decimal (10^{-1} , 10^{-2} , ..., 10^{-n}).

4.4.2. *Escherichia coli*

Para a quantificação de *E. coli* foi utilizada a técnica de filtração em membranas, usando o meio Chromocult® Coliform Agar (Merck Cat.No.1.10426) que determina simultaneamente a presença de coliformes totais e *E. coli*.

Para o teste, um volume de 100 mL de amostra, ou diluição, são filtrados em membrana estéril de porosidade 0,45 μm , marca Gelman GN-6. Após a filtração as membranas contendo as células bacterianas são colocadas em placa de Petri contendo o referido meio de cultura e incubadas a $36 \pm 1^\circ\text{C}$ por 24 ± 1 h.

As colônias que apresentarem coloração salmão/vermelha são reconhecidas como coliformes totais (sem *E. coli*) e coloração azul-escuro/violeta como *E. coli*. Os coliformes totais incluem *E. coli* e, portanto, a quantidade de *E. coli* é somada aos coliformes totais (coloração salmão/vermelha).

O preparo do meio Chromocult exige alguns cuidados, visto que este meio não pode ser levado à autoclave. Deve-se prepará-lo adicionando-se 26,5 g do meio a 1000 mL de água destilada, e levando esta solução ao banho-maria por 30 min. Após este tempo, transferem-se 10 mL do meio para placas de Petri estéreis. Toda a vidraria utilizada na manipulação e preparação do meio foi esterilizada.

4.4.3. Colifagos

A determinação do número de unidades formadoras de placa (UFP) de colifagos foi efetuada seguindo as orientações do método CETESB L5.225. Destaca-se que os ensaios basearam-se ainda nas experiências descritas por Sartori (2004) e Soares (2007).

O meio de cultura utilizado para os colifagos é o TSA modificado. O preparo deste meio envolve a adição de 40 g de TSA (Difco), 1,6 g de nitrato de amônia e 0,21 g de nitrato de estrôncio a 1000 mL de água destilada, que são levados ao aquecimento, até que ocorra sua total dissolução. Após seu preparo, o meio é distribuído em volumes de 5,5 mL em tubos de ensaio, e levado a autoclave a 121°C por 15 min, sendo então armazenado em geladeira.

O preparo do inóculo contendo a cepa hospedeira de *E. coli* é realizado utilizando a cepa de *Escherichia coli* CIP 55.30, em meio sólido, Ágar Nutriente, fornecida pela Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia “André Tosello”.

O meio de cultura utilizado para o crescimento e manutenção da cepa hospedeira é o TSB glicerinado. O meio é preparado seguindo a proporção de 30 g de TSB (Difco) para 1000 mL de água destilada, adicionando-se 100 mL de glicerina. Esta mistura é levada ao aquecimento até sua total dissolução, sem atingir a temperatura de ebulição. Transferem-se então 10 mL do meio para tubos de ensaio, e 25 mL em erlenmeyers. O meio é então autoclavado a 121°C por 15 min, e mantido em geladeira.

Próximo aos ensaios é realizada a repicagem da cepa hospedeira de *E. coli*. Transfere-se, com

uma alça de platina esterilizada no bico de Bunsen, uma alçada da referida cepa de *E. coli* aos tubos de ensaio contendo o meio TSB glicerinado. Os tubos são levados para a incubadora, a 36°C por 24 horas. Após este período, o conteúdo dos tubos de ensaio é vertido ao conteúdo dos erlenmeyers, que são levados novamente à incubadora, por um período de 1 hora a 1 hora e 30 minutos. O conteúdo do erlenmeyer é então transferido, adicionando-se 1 mL a flaconetes previamente autoclavados a 121°C por 15 min. Estes flaconetes são armazenados no congelador, até o momento do seu uso, por um período máximo de 15 dias.

Para a execução dos ensaios, seguiu-se o roteiro:

1. fundir quatro tubos de TSA modificado para cada amostra, ou respectiva diluição, e levá-los ao banho-maria a 44,5 °C;
2. descongelar os frascos contendo a bactéria hospedeira (CIP 55.30) em banho-maria a 44,5 °C;
3. transferir 5 mL da amostra ou de sua diluição e 1 mL de suspensão de *E. coli* em cada um dos quatro tubos contendo o TSA modificado;
4. homogeneizar cada tubo, esfregando-os entre as mãos, e verter em uma placa de Petri, homogeneizando-a em movimentos circulares em forma de oito;
5. incubar as placas invertidas a 35 °C por 4 a 6 horas.

A leitura dos resultados é feita realizando-se a contagem de placas de lise que se desenvolvem em cada placa de Petri. Deve-se somar o valor das 4 placas e multiplicá-lo por 5. Se um fator de diluição foi utilizado, o resultado deve ser corrigido multiplicando-o pelo inverso do fator de diluição. O resultado é expresso em UFP/100mL.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Ensaio com radiação ultravioleta

Os ensaios com radiação ultravioleta foram realizados estudando-se 6 doses de radiação, de

0,2; 0,4; 0,6; 1,0; 2,0 e 3,0 Wh/m³. Os ensaios foram divididos em dois experimentos, A e B. A caracterização física, química e microbiológica, dos Experimentos A e B está apresentada nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento A

Experimento A				
Variáveis	Afluente bruto	Efluente da desinfecção		
		Dr = 1,0 Wh/m ³	Dr = 2,0 Wh/m ³	Dr = 3,0 Wh/m ³
Temperatura (°C)	21,5	NR	NR	NR
pH	6,47	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	69	NR	NR	NR
Sólidos Totais (ST) (mg/L)	272	NR	NR	NR
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	133,8	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	341	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	1,047	NR	NR	NR
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	2,0x10 ⁶	2,1x10 ³	1,0x10 ²	1,0x10 ¹
Colifagos (UFP/100mL)	2,25x10 ²	ND	ND	ND

Notas: Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 2 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento B

Experimento B				
Variáveis	Afluente bruto	Efluente da desinfecção		
		Dr = 0,2 Wh/m³	Dr = 0,4 Wh/m³	Dr = 0,6 Wh/m³
Temperatura (°C)	22	NR	NR	NR
pH	6,87	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	106	NR	NR	NR
Sólidos Totais (ST) (mg/L)	308	NR	NR	NR
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	87,4	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	300	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	0,625	NR	NR	NR
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	1,0x10 ⁶	1,3x10 ⁵	9,0x10 ³	4,0x10 ³
Colifagos (UFP/100mL)	1,95x10 ³	5,0x10 ¹	5	ND

Notas: Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Para o efluente da desinfecção utilizando a radiação ultravioleta não foi realizada novamente a caracterização físico-química. A radiação ultravioleta, sendo um processo físico de desinfecção, não provoca alterações significativas nas características físico-químicas do efluente. Ainda, pode-se ressaltar que o efluente é exposto, durante o processo de desinfecção, por um tempo muito pequeno à radiação, o que não resulta em alterações significativas em suas características físico-químicas. Os tempos de exposição, para cada dose recebida de UV nos experimentos A e B, calculados em função da absorbância do efluente do reator UASB, conforme descrito em 4.2 Ensaio de desinfecção com radiação ultravioleta, podem ser observados na Tabela A.1 (Apêndice).

A inativação dos microrganismos indicadores *E. coli* e colifagos está representada nas Figuras 2 e 3.

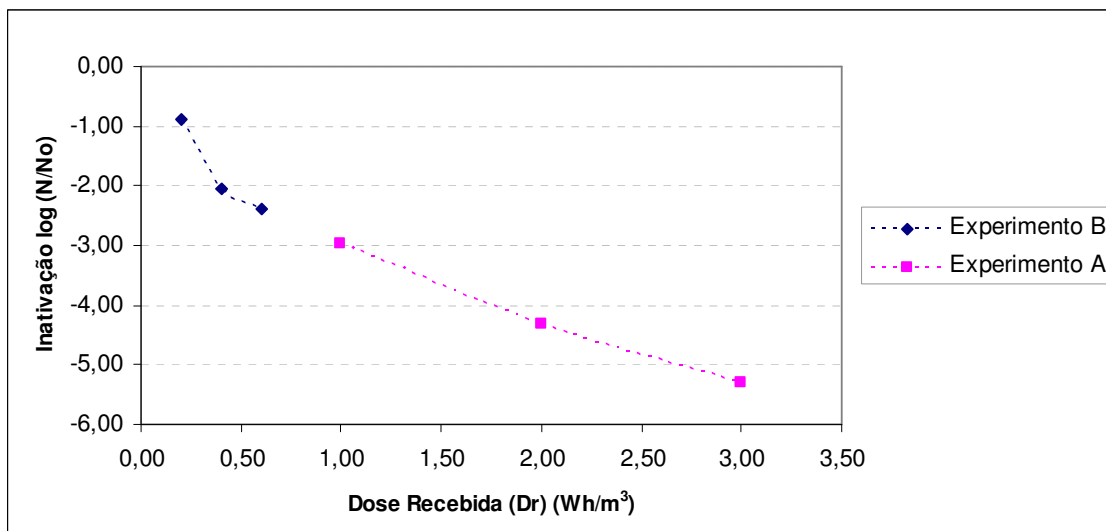


Figura 2 - Inativação de *E. coli* para os Experimentos A e B

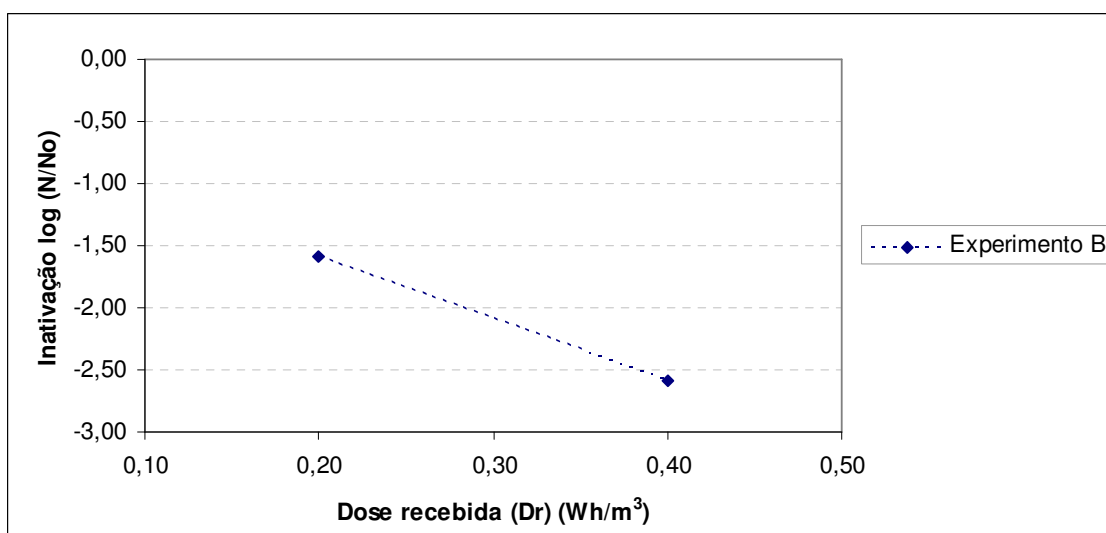


Figura 3 - Inativação de colifagos para o Experimento B

Cabe, diante da Figura 2, destacar que nos efluentes da desinfecção do Experimento A, e para a dose recebida de $0,6 \text{ Wh/m}^3$ no Experimento B, não foi detectada a presença de colifagos. Por esta razão, tais resultados não se encontram apresentados nas Figuras 2 e 3. Tal fato é resultado da forma de análise dos dados, expressos em função de $\log(N/N_0)$. Entretanto, vale ressaltar que tais resultados podem ser decorrentes do limite de detecção do método, não sendo possível afirmar que houve inativação total destes microrganismos.

Observa-se, pela Figura 2, que a inativação de *E. coli* obtida com o uso da radiação

ultravioleta, foi crescente com o aumento da dose utilizada. A maior redução deste indicador foi de 5,30 log, obtida com a aplicação da maior dose recebida, de 3,0 Wh/m³.

Em relação aos colifagos, como destacado, não foi detectada a presença destes organismos nos efluentes do Experimento A, assim como para a dose recebida de 0,6 Wh/m³ no Experimento B. Para as demais doses recebidas estudadas no Experimento B, obtiveram-se reduções de 1,59 log para 0,2 Wh/m³ e de 2,59 log para 0,4 Wh/m³.

Pode-se, com base nos resultados apresentados, observar o comportamento dos indicadores estudados frente à ação da radiação ultravioleta. Verificou-se maior resistência de *E. coli* em comparação aos colifagos. Isso fica bastante claro no Experimento A, em que o efluente dos ensaios, submetidos às doses de 1,0, 2,0 e 3,0 Wh/m³, apresentaram ausência de colifagos. Entretanto, não foi observada ausência de *E. coli* para nenhum destes casos, sendo que a maior inativação obtida foi de 5,30 log, para a dose de 3,0 Wh/m³. Tal resultado pode ser confirmado por Koivunen et al (2005), que também observaram maior resistência de *E. coli* em relação a colifagos MS2.

Quanto aos fatores que interferem na efetividade da ação da radiação ultravioleta como desinfetante, os sólidos suspensos são os que possuem maior importância. Observou-se que, no Experimento A, a concentração de sólidos suspensos totais foi de 133,8 mg/L, bastante superior à encontrada no Experimento B, de 87,4 mg/L. Tal fator tem influência negativa no processo de desinfecção, visto que os sólidos agem como uma barreira à ação do desinfetante sobre os organismos. Entretanto, a inativação em A foi maior devido à maior dose aplicada. Nestas condições não é possível avaliar a influência dos sólidos suspensos totais.

Vale destacar ainda que, no caso do Experimento A, a absorvância do efluente do reator UASB, de 1,047, foi bastante superior à do Experimento B, de 0,625. A absorvância influencia diretamente o consumo de energia, visto que, quanto maior seu valor, maior será o tempo que as lâmpadas deverão permanecer ligadas para atingir a dose requerida para a desinfecção.

As concentrações de *E. coli* no efluente desinfetado foram equivalentes à qualidade para Classe 2 (Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005)) para as doses maiores e à Classe 3 para as

doses menores.

5.2. Ensaios com Cloro

Os ensaios foram realizados estudando-se quatro concentrações de cloro, de 5,5; 8,5; 10,0 e 16,7 mg/L, submetidas, cada uma, a três tempos de contato, de 5, 10 e 15 minutos. Resultou-se, portanto, em 12 ensaios, que foram divididos em quatro experimentos: C, D, E e F. Os resultados dos experimentos, com sua caracterização física, química e microbiológica, estão apresentados nas Tabelas 3 a 6.

Tabela 3 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento C

Variáveis	Experimento C			
	Afluente bruto	Efluente clorado (C = 5,5 mg/L)		
		t = 5 min	t = 10 min	t = 15 min
Temperatura (°C)	21	21	21	21
pH	6,68	5,91	5,90	6,0
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	100	66	62	64
Sólidos Totais (ST) (mg/L)	211	328	295	287
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	46,3	42,9	40,2	38,7
DQO (mg/L)	182	234	239	229
Cloro residual total (mg/L)	-	1,35	1,79	1,54
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,07	0,83	1,37
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	1,1x10 ⁶	7x10 ²	2x10 ¹	ND
Colifagos (UFP/100mL)	1,05x10 ³	1,8x10 ²	2,0x10 ¹	2,0x10 ¹

Notas: ND: não detectado.

Tabela 4 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento D

Experimento D				
Variáveis	Afluente bruto	Efluente clorado (C = 8,5 mg/L)		
		t = 5 min	t = 10 min	t = 15 min
Temperatura (°C)	21	21	21	21
pH	6,82	5,61	5,67	5,82
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	81	54	54	57
Sólidos Totais (ST) (mg/L)	186	364	344	308
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	40,1	36,2	34,2	34,9
DQO (mg/L)	161	249	329	271
Cloro residual total (mg/L)	-	4,01	4,26	4,62
Cloro residual livre (mg/L)	-	2,30	3,91	3,93
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	2,5x10 ⁶	1,0x10 ¹	ND	ND
Colifagos (UFP/100mL)	1,25x10 ³	1,0x10 ¹	5	5

Notas: ND: não detectado.

Tabela 5 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento E

Experimento E				
Variáveis	Afluente bruto	Efluente clorado (C = 10,0 mg/L)		
		t = 5 min	t = 10 min	t = 15 min
Temperatura (°C)	21,5	21,5	21,5	21,5
pH	6,22	5,97	6,18	6,20
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	246	245	224	241
Sólidos Totais (ST) (mg/L)	474	813	150	746
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	66,1	78,0	64,5	69,7
DQO (mg/L)	707	739	731	736
Cloro residual total (mg/L)	-	0,13	0,11	0,10
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,06	0,06	0,08
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	4,6x10 ⁶	1,07x10 ⁵	5,2x10 ³	3,5x10 ³
Colifagos (UFP/100mL)	1,82x10 ³	8,45x10 ²	1,35x10 ²	9,5x10 ¹

Tabela 6 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento F

Variáveis	Experimento F			
	Afluente bruto	Efluente clorado (C = 16,7 mg/L)		
		t = 5 min	t = 10 min	t = 15 min
Temperatura (°C)	21	21	21	21
pH	6,6	5,02	4,84	5,0
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	61	17	12	14
Sólidos Totais (ST) (mg/L)	423	516	482	493
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	66,0	57,6	55,0	58,2
DQO (mg/L)	311	425	239	366
Cloro residual total (mg/L)	-	8,14	7,20	7,64
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,30	4,52	4,14
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	9,6x10 ⁵	ND	ND	ND
Colifagos (UFP/100mL)	1,35x10 ²	4,5x10 ¹	3,0 x10 ¹	2,0 x10 ¹

Notas: ND: não detectado.

Em relação à temperatura e pH do afluente bruto, não foram observadas alterações significativas. Em todos os experimentos, o afluente bruto apresentou temperatura na faixa de 21 a 22°C e pH entre 6 e 7, como pode ser visto nas Tabelas 3 a 6.

Para o efluente clorado, em todos os casos, observou-se redução do pH em relação ao afluente, não necessariamente havendo maior redução com o aumento do tempo de contato. De fato, nos Experimentos D e E, a maior redução do pH se deu com o menor tempo de contato, de 5 minutos.

Em relação à alcalinidade, observou-se grande variação no afluente. Neste caso, destaca-se o Experimento E, que apresentou alcalinidade total de 246 mgCaCO₃/L, valor bastante superior ao encontrado no Experimento F, por exemplo, de 61 mgCaCO₃/L.

Observou-se que, para todos os Experimentos, houve no efluente clorado redução da alcalinidade. Nos Experimentos C, D e F, observou-se queda acentuada da alcalinidade. Da mesma maneira que o pH, esta queda não foi necessariamente proporcional ao tempo de contato, ou seja, o aumento do tempo de contato não implicou em maior redução de alcalinidade. No caso do Experimento E, a redução da alcalinidade não foi acentuada como nos demais Experimentos, sendo que, para todos os tempos de contato neste caso, a alcalinidade do efluente clorado manteve-se

bastante próxima à do afluente bruto, como pode ser observado na Tabela 5.

Assim como o pH e alcalinidade total, a DQO apresentou grande variabilidade. A DQO é uma das características mais importantes, visto que dá uma indicação da matéria orgânica presente no efluente. A quantidade de matéria orgânica influencia no consumo de cloro, já que há um maior consumo de cloro com maior concentração de matéria orgânica, o que reduz a eficiência de inativação. Pode-se destacar o Experimento E como o de maior DQO, sendo encontrado o valor de 707 mg/L para o afluente bruto (Tabela 5).

No efluente clorado observou-se aumento da DQO, resultado condizente com o esperado por estudos como os conduzidos por El-Rehaili (1995). Neste caso, assim como para a variação de pH e alcalinidade, não se observou relação do aumento com o aumento do tempo de contato. A diminuição da DQO, entretanto, foi observada em um único caso. No Experimento F, apresentado na Tabela 6, o tempo de contato de 10 minutos resultou em DQO de 239 mg/L, contra 311 mg/L para o afluente.

Os sólidos, totais e suspensos totais, foram as características físico-químicas que apresentaram maior variabilidade.

De maneira geral, observou-se aumento na concentração de sólidos totais no efluente clorado, como pode ser observado nas Tabelas 3 a 6. Tal alteração não tem explicação clara, podendo ser resultado, sob uma hipótese, da interferência causada por sais adicionados pelos fabricantes à solução de hipoclorito de sódio (normalmente NaCl), ou, pelo metabissulfito de sódio, utilizado para cessar a reação do cloro. Em um único caso, entretanto, observou-se diminuição da concentração de sólidos totais. No Experimento E, apresentado na Tabela 5, o tempo de contato de 10 minutos resultou em concentração de sólidos totais de 150 mg/L, contra 474 mg/L no afluente.

A concentração de sólidos suspensos totais, por sua vez, diminuiu no efluente clorado. À exceção do Experimento E, que apresentou pequeno aumento na concentração de sólidos suspensos totais, nos Experimentos C, D e F (Tabelas 3, 4 e 6), pode-se observar esta diminuição.

Os resultados para a inativação de *E. coli* e colifagos nos Experimentos C, D E e F estão

apresentados nas Figuras 4 e 5.

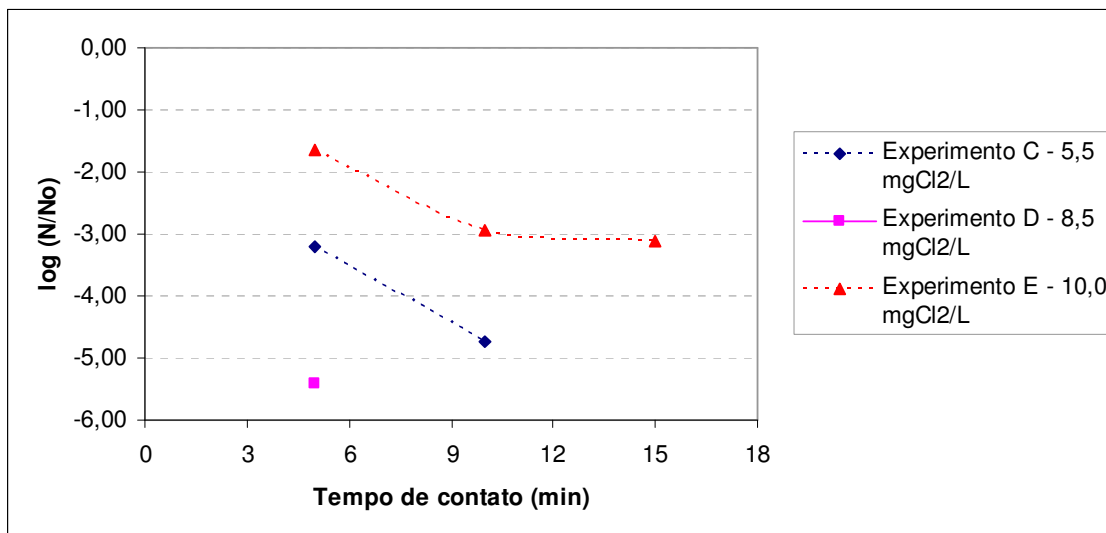


Figura 4 - Inativação de *E. coli* para os Experimentos C (5,5 mgCl₂/L), D (8,5 mgCl₂/L) e E (10,0 mgCl₂/L)

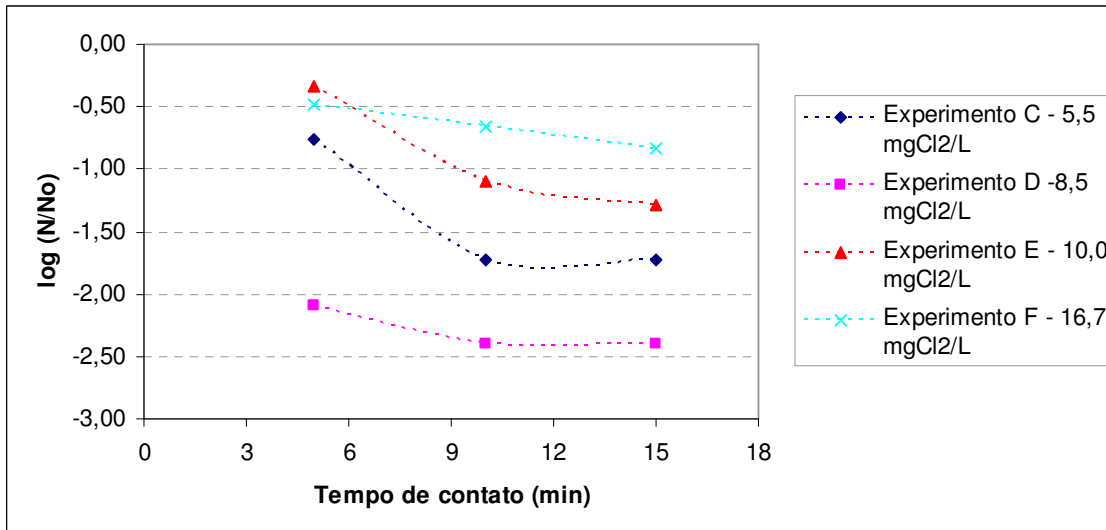


Figura 5 - Inativação de colifagos para os Experimentos C (5,5 mgCl₂/L), D (8,5 mgCl₂/L), E (10,0 mgCl₂/L) e F (16,7 mgCl₂/L)

Cabe, diante da Figura 4, destacar que para alguns casos nos Experimentos D, E e F, conforme apresentado nas Tabelas 4, 5 e 6, não foi detectada a presença de *E. coli*. Por esta razão, tais resultados não se encontram apresentados na Figura 4, fato decorrente da forma de interpretação dos

resultados, em função de $\log(N/N_0)$.

Pode-se observar, diante da Figura 4, que o cloro mostrou-se bastante eficaz na inativação de *E. coli*. De fato, no Experimento F, e nos tempos de contato de 15 minutos para o Experimento C e de 10 e 15 minutos no Experimento D não foi detectada a presença de *E. coli*. Nos demais ensaios, a maior inativação encontrada foi de 5,40 log, correspondente ao tempo de contato de 5 minutos, no Experimento D.

A Figura 5, por sua vez, mostra o resultado da ação do cloro sobre os colifagos. Observa-se maior resistência destes organismos, em relação à *E. coli*, à ação desinfetante do cloro. A maior inativação obtida foi de 2,40 log, para os tempos de contato de 10 e 15 minutos no Experimento D.

Quanto ao tempo de contato, pode-se observar que seu aumento implicou no aumento da redução de *E. coli* e colifagos, para os casos estudados. Em dois casos somente, o aumento do tempo de contato não resultou em aumento, mas na manutenção da inativação de colifagos. Nos experimentos C e D a inativação de colifagos foi a mesma para os tempos de contato de 10 e 15 minutos, sendo de 1,70 log no C e 2,40 log no D.

Em relação à concentração de cloro aplicada, entretanto, pode-se observar que o aumento da concentração de cloro não proporcionou necessariamente aumento na inativação de *E. coli* e colifagos. Isto porque a ação do cloro depende diretamente das características do efluente estudado. Ainda, pode-se dizer que a concentração de cloro residual também tem relação com a eficiência do processo de desinfecção. Baixas concentrações de cloro residual livre, em relação ao cloro residual total, implicam em menor ação desinfetante, visto que o cloro em sua forma combinada (calculada pela diferença entre as concentrações de cloro residual total e livre) possui menor capacidade de inativação de organismos.

A influência das características físico-químicas é bastante visível entre os Experimentos C e E. No caso da *E. coli*, como pode ser observado na Figura 4, o Experimento E foi o que resultou nas menores inativações deste indicador. O maior valor atingido foi de 3,12 log, para o maior tempo de contato, de 15 minutos. Neste experimento foi aplicada concentração de cloro de 10,0 mg/L. Por sua vez, no Experimento C, essas inativações foram superiores, de 4,74 log com 10 minutos de contato,

com a utilização de concentração de cloro inferior, de 5,5 mg/L.

Tal diferença é explicada em função das características físico-químicas do efluente utilizado nos dois experimentos. O Experimento E apresentou DQO bastante superior à do Experimento C, sendo estes valores de 707 e 182 mg/l, respectivamente, conforme apresentado nas Tabelas 3 e 5. A maior concentração de matéria orgânica no afluente implica em maior consumo de cloro, devido às reações de óxido-redução que ocorrem entre o cloro e outros compostos presentes no efluente.

O Experimento E apresentou ainda alto consumo de cloro, sendo encontrado, para o tempo de 15 minutos, cloro residual livre de apenas 0,08 mg/L, e total de 0,10 mg/L (Tabela 5). Para o mesmo tempo de contato no Experimento C, foi obtida concentração de 1,37 mg/L (Tabela 3).

Ressalta-se ainda que, apesar de no Experimento F não ter sido detectada a presença de *E. coli* no efluente clorado, a inativação de colifagos observada neste experimento, de 0,83 log com 15 minutos de contato, foi bastante inferior à do Experimento D. Neste, também foi observada a ausência de *E. coli*, para os tempos de contato de 10 e 15 minutos, e a redução de colifagos atingiu 2,40 log, para os mesmos tempos (Figura 5). Novamente, tal diferença mostra a influência das características do afluente na eficiência do processo de desinfecção. No Experimento F, a concentração de cloro aplicada foi de 16,7 mg/L, bastante superior aos 8,5 mg/L aplicados no Experimento D. Entretanto, tanto DQO e sólidos suspensos foram superiores no caso do Experimento F. Ainda, observa-se novamente a maior resistência de colifagos à ação do cloro.

Vale destacar que o experimento que possibilitou maiores inativações tanto de *E. coli* quanto de colifagos foi o D. A inativação de colifagos atingiu 2,40 log para os tempos de contato de 10 e 15 minutos, e, para estes mesmos tempos, não foi detectada a presença de *E. coli*, como pode ser observado nas Figuras 4 e 5. Tal experimento foi o que apresentou afluente com características mais favoráveis ao processo de desinfecção com cloro. Neste caso, tanto DQO quanto sólidos suspensos totais apresentaram as menores concentrações dentre todos os experimentos, sendo de 161 e 40,1 mg/L, respectivamente, como pode ser observado na Tabela 4. Também se observou, neste experimento, que a concentração de cloro residual livre foi maior que a dos experimentos C e E, de

3,93 mg/L para o tempo de contato de 15 minutos, em relação ao inicial aplicado, de 8,5 mgCl₂/L. Isto mostra que houve maior disponibilidade de cloro para a inativação dos organismos, e que o efluente não apresentou grande demanda de cloro, como ocorreu com o Experimento E.

Quanto ao comportamento dos indicadores estudados, observou-se maior resistência dos colifagos em relação à *E. coli*, frente à ação do cloro. Em nenhum dos experimentos foi identificada ausência de colifagos no efluente clorado, enquanto ocorreu ausência de *E. coli* nos Experimentos C, D e F. Tyrrell et al. (1995) também observaram maior resistência de colifagos somáticos e bacteriófagos (male-specific), em relação a coliformes fecais, no processo de desinfecção com cloro.

Pode-se dizer ainda que, à exceção dos resultados do Experimento E, as demais concentrações de cloro estudadas atingiram o padrão de qualidade em relação à concentração de *E. coli*, para corpos de água enquadrados em classe 2, estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005), ou seja, concentração inferior a 1000 NMP/100mL.

Entretanto, o cloro residual total, em todos os casos, excede a concentração de 0,01 mgCl₂/L, fixada como o máximo permitido para rios Classe 2, conforme Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005). Como há o efeito de diluição do corpo d'água, a concentração de cloro total no efluente clorado poderia ser superior a este valor. Todavia, por medida de precaução é recomendável que seja feita a descloração.

5.3. Ensaios sequenciais com cloro e radiação ultravioleta

Os ensaios de desinfecção sequencial aplicando cloro e em seguida radiação ultravioleta foram realizados estudando-se as concentrações de cloro de 1,5; 3,0 e 4,5 mg/L, cada uma com tempo de contato de 3, 5 e 7 minutos. Cada uma destas combinações de concentração e tempo de contato foi submetida às doses recebidas¹ de radiação ultravioleta de 0,1; 0,2 e 0,3 Wh/m³, aplicadas

¹ Dose recebida refere-se à correção de dose decorrente da absorção da radiação ultravioleta pelas substâncias dissolvidas e pelos sólidos em suspensão

sequencialmente. Resultou-se em 9 ensaios de desinfecção sequencial, denominados Experimentos G a O, apresentados nas Tabelas 7 a 15.

Tabela 7 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento G

Experimento G					
Variáveis	Afluente bruto	Efluente clorado (1,5 mg/L, 3 min)	Efluente da radiação ultravioleta		
			Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
Temperatura (°C)	22	22	22	22	22
pH	6,2	5,66	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	129	128	NR	NR	NR
ST (mg/L)	1097,5	1391,5	NR	NR	NR
SST (mg/L)	576,9	295	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	886	885	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	1,667	1,600	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	0,44	NR	NR	0,21
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,22	NR	NR	0,06
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	1,4x10 ⁷	1,44x10 ⁶	1,36x10 ⁵	1,12x10 ⁵	6,5x10 ⁴
Colifagos (UFP/100mL)	1,45x10 ²	1,20x10 ²	2,5x10 ¹	5	5

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 8 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento H

Experimento H					
Variáveis	Afluente	Efluente clorado	Efluente da radiação ultravioleta		
	bruto	(1,5 mg/L, 5 min)	Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
Temperatura (°C)	23	23	23	23	23
pH	6,88	6,15	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	98	76	NR	NR	NR
ST (mg/L)	244	817	NR	NR	NR
SST (mg/L)	67,5	70,1	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	208	287	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	0,518	0,500	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	0,34	NR	NR	ND
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,15	NR	NR	ND
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	4,0x10 ⁶	3,8x10 ⁶	7,1x10 ⁵	3,5x10 ⁵	5,4x10 ⁴
Colifagos (UFP/100mL)	4,5x10 ²	5	ND	ND	ND

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 9 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento I

Experimento I					
Variáveis	Afluente	Efluente clorado	Efluente da radiação ultravioleta		
	bruto	(1,5 mg/L, 7 min)	Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
Temperatura (°C)	24	24	24	24	24
pH	6,80	6,15	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	69	53	NR	NR	NR
ST (mg/L)	1290,5	2636	NR	NR	NR
SST (mg/L)	50,6	48,4	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	180	467	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	0,503	0,560	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	0,37	NR	NR	0,30
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,31	NR	NR	0,28
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	2,4x10 ⁶	1,9x10 ⁵	1,3x10 ⁵	1,2x10 ⁵	2,9x10 ⁴
Colifagos (UFP/100mL)	4,9x10 ²	ND	ND	ND	ND

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 10 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento J
Experimento J

Variáveis	Afluente bruto	Efluente clorado (3,0 mg/L, 3 min)	Efluente da radiação ultravioleta		
			Dr = 0,11 Wh/m ³	Dr = 0,22 Wh/m ³	Dr = 0,33 Wh/m ³
Temperatura (°C)	22	22	22	22	22
pH	5,5	5,21	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	95	80	NR	NR	NR
ST (mg/L)	550	2756	NR	NR	NR
SST (mg/L)	289,7	276,4	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	803	886	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	1,374	1,246	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	0,44	NR	NR	0,25
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,40	NR	NR	0,16
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	3,0x10 ⁶	2,1x10 ⁵	2,1x10 ⁵	1,3x10 ⁵	3,0x10 ⁴
Colifagos (UFP/100mL)	1,05x10 ²	1,5x10 ¹	1,0x10 ¹	5	ND

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 11 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento K

Experimento K					
Variáveis	Afluente bruto	Efluente clorado (3,0 mg/L, 5 min)	Efluente da radiação ultravioleta		
			Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
Temperatura (°C)	24	24	24	24	24
pH	6,92	5,82	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	104	85	NR	NR	NR
ST (mg/L)	483,5	1947	NR	NR	NR
SST (mg/L)	259,9	166,6	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	688	676	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	0,710	0,700	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	0,59	NR	NR	0,47
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,46	NR	NR	0,29
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	4,6x10 ⁶	6,3x10 ⁵	2,6x10 ⁵	1,6x10 ⁵	4,2x10 ⁴
Colifagos (UFP/100mL)	6,4x10 ²	2,5x10 ¹	1,0x10 ¹	ND	ND

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 12 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento L

Experimento L					
Variáveis	Afluente bruto	Efluente clorado (3,0 mg/L, 7 min)	Efluente da radiação ultravioleta		
			Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
Temperatura (°C)	23	23	23	23	23
pH	6,67	5,73	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	86	69	NR	NR	NR
ST (mg/L)	510	1404	NR	NR	NR
SST (mg/L)	309	218,1	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	655	629	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	1,224	0,970	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	0,23	NR	NR	ND
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,13	NR	NR	ND
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	3,5x10 ⁶	1,0x10 ⁵	3,2x10 ⁴	1,3x10 ⁴	1,2x10 ⁴
Colifagos (UFP/100mL)	6,25x10 ²	10	5	ND	ND

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 13 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento M

Experimento M					
Variáveis	Afluente bruto	Efluente clorado (4,5 mg/L, 3 min)	Efluente da radiação ultravioleta		
			Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
Temperatura (°C)	24	24	24	24	24
pH	6,98	5,74	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	82	47	NR	NR	NR
ST (mg/L)	199,5	1415,5	NR	NR	NR
SST (mg/L)	42,55	39,45	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	88	236	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	0,339	0,343	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	2,71	NR	NR	2,61
Cloro residual livre (mg/L)	-	0,41	NR	NR	0,43
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	3,5x10 ⁶	8,0x10 ¹	5,0x10 ¹	3,0x10 ¹	1,0x10 ¹
Colifagos (UFP/100mL)	3,75x10 ²	ND	ND	ND	ND

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 14 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento N

Experimento N					
Variáveis	Afluente bruto	Efluente clorado (4,5 mg/L, 5 min)	Efluente da radiação ultravioleta		
			Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
pH	6,96	6,12	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	102	70	NR	NR	NR
ST (mg/L)	219,5	867,5	NR	NR	NR
SST (mg/L)	52,3	70,1	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	191	242	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	0,475	0,480	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	2,15	NR	NR	1,46
Cloro residual livre (mg/L)	-	1,74	NR	NR	1,16
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	2,9x10 ⁶	2,6x10 ⁴	2,1x10 ⁴	9,0x10 ³	8,0x10 ³
Colifagos (UFP/100mL)	9,5x10 ³	ND	ND	ND	ND

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Tabela 15 - Caracterização física, química e microbiológica para o Experimento O

Experimento O					
Variáveis	Afluente	Efluente clorado	Efluente da radiação ultravioleta		
	bruto	(4,5 mg/L, 7 min)	Dr = 0,1 Wh/m³	Dr = 0,2 Wh/m³	Dr = 0,3 Wh/m³
Temperatura (°C)	22	22	22	22	22
pH	6,93	5,53	NR	NR	NR
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	87	35	NR	NR	NR
ST (mg/L)	938	1361,5	NR	NR	NR
SST (mg/L)	73,8	38,4	NR	NR	NR
DQO (mg/L)	223	302	NR	NR	NR
Absorbância (254 nm)	0,556	0,548	NR	NR	NR
Cloro residual total (mg/L)	-	2,79	NR	NR	2,21
Cloro residual livre (mg/L)	-	2,56	NR	NR	1,96
E. coli (UFC/100mL)	3,0x10 ⁶	1,9x10 ⁴	3,2x10 ³	2,8x10 ³	2,1x10 ³
Colifagos (UFP/100mL)	2,215x10 ³	2,20x10 ²	ND	ND	ND

Notas: Afluente bruto: efluente do reator UASB utilizado nos ensaios de desinfecção; Dr: dose recebida; NR: não realizado; ND: não detectado.

Vale destacar que para o efluente da desinfecção com radiação ultravioleta não foram executadas novamente as análises físico-químicas, pois, sendo esta um agente físico de desinfecção, não provoca alterações significativas nas características físico-químicas do efluente.

Em relação à caracterização físico-química dos ensaios, podem ser destacados alguns pontos, relacionados aos resultados obtidos na primeira etapa do trabalho. Quanto à temperatura e pH do afluente bruto, não foram observadas alterações significativas. A temperatura manteve-se na faixa de 22 a 25°C, e o pH na faixa de 5,5 a 7,0.

As características que merecem mais destaque, pela sua variabilidade durante os diversos ensaios são DQO, SST e ST.

A DQO apresentou grande variabilidade, e, em alguns casos, como nos experimentos F, G, J e K, (Tabelas 6, 7, 10 e 11, respectivamente) alcançou valores bastante elevados (acima de 600 mg/L). Tal característica se apresenta desfavorável à desinfecção, visto que a DQO elevada provoca uma maior demanda de cloro, o que reduz a disponibilidade deste para a desinfecção.

A cloração provocou, na maioria dos casos (exceto para os experimentos K e L, apresentados nas Tabelas 11 e 12), o aumento da DQO, analogamente ao observado na primeira etapa do trabalho, apresentado em 5.2 Ensaio com Cloro. Vale destacar os experimentos I e M (Tabelas 9 e 13), onde a DQO do efluente clorado quase triplicou em relação à do efluente bruto, tendo aumentado de 180 para 487 mg/L no experimento I e de 88 para 236 mg/L no experimento M. Tal comportamento da DQO foi observado em 5.2 Ensaio com Cloro, sendo esperado e estando de acordo com estudos como os realizados por El-Rehaili (1995).

Da mesma maneira, os SST e ST apresentaram valores elevados, como os encontrados no experimento G (Tabela 7), de 576,9 mg/L para os SST e 1097,5 mg/L de ST. Vale lembrar que, conforme discutido na primeira etapa, altos valores de SST se apresentam desfavoráveis à desinfecção, visto que os sólidos agem como um escudo para os organismos, protegendo-os da ação dos desinfetantes.

No efluente clorado observou-se a redução da concentração de SST. Tal redução é benéfica para a desinfecção com a radiação ultravioleta, devido à diminuição dos sólidos que protegem os organismos da ação da radiação. Não se observou esta redução somente nos experimentos H e N, apresentados nas Tabelas 8 e 14.

O aumento da concentração de ST observada no efluente clorado, por sua vez, pode ser fruto da interferência causada por sais adicionados pelos fabricantes à solução de hipoclorito de sódio (normalmente NaCl), ou pelo metabissulfito de sódio. Vale destacar que, tanto para SST e ST, o mesmo comportamento foi observado na primeira etapa da pesquisa.

As concentrações de cloro residual livre e total após a última dose de radiação ultravioleta foram, em todos os experimentos, com exceção do experimento M para o cloro residual livre,

inferiores às observadas após a cloração. Tal redução pode ser devida ao tempo adicional que o cloro continua reagindo durante a desinfecção com a radiação ultravioleta ou pela descloração promovida pela radiação ultravioleta.

Outro parâmetro cujo comportamento deve ser destacado é a absorvância a 254 nm do afluente bruto e do efluente clorado, utilizado para o cálculo da dose recebida. De modo geral, valores mais elevados de absorvância do efluente bruto corresponderam aos ensaios que apresentaram as características físico-químicas mais desfavoráveis, como maior DQO e maiores concentrações de SST e ST, como é o caso dos ensaios J e L, apresentados nas Tabela 10 e Tabela 12. De modo geral, a cloração provocou a redução da absorvância 254 nm, sendo que esta somente não foi observada nos experimentos I, M e N (Tabelas 9, 13 e 14, respectivamente). A redução da absorvância pode ser atribuída à oxidação da matéria orgânica promovida pela cloração.

Em relação à inativação dos organismos indicadores *E. coli* e colifagos, os resultados, expressos na forma de $\log(N/N_0)$, onde N_0 é o número de organismos no início e N é o número de organismos ao final da desinfecção, estão apresentados nas Figuras 6 a 10.

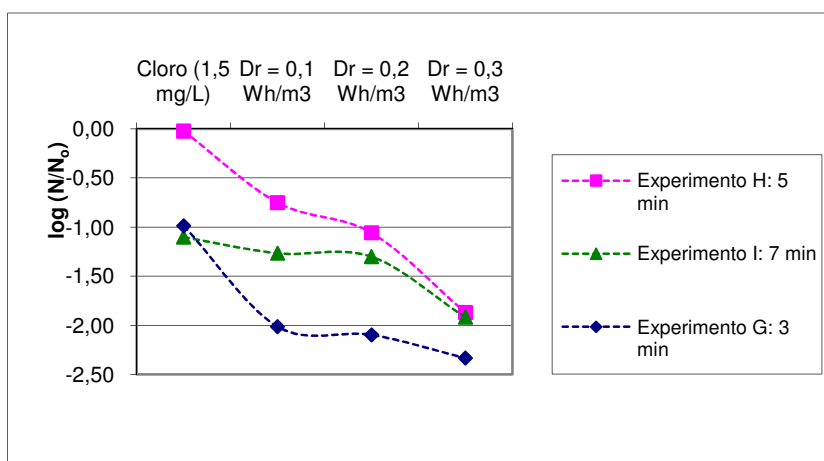


Figura 6 – Inativação de *E. coli* para a concentração de cloro 1,5 mg/L, para os Experimentos G (3 min), H (5 min) e I (7 min)

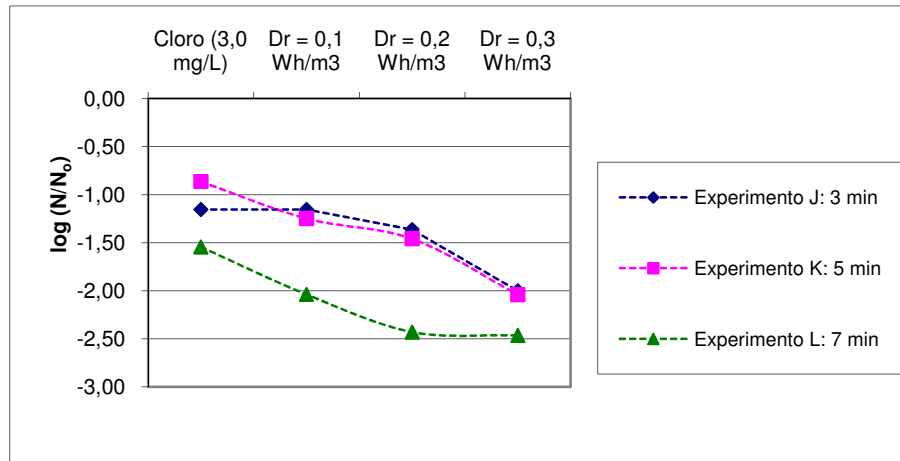


Figura 7 – Inativação de *E. coli* para a concentração de cloro 3,0 mg/L, para os Experimentos J (3 min), K (5 min) e L (7 min)

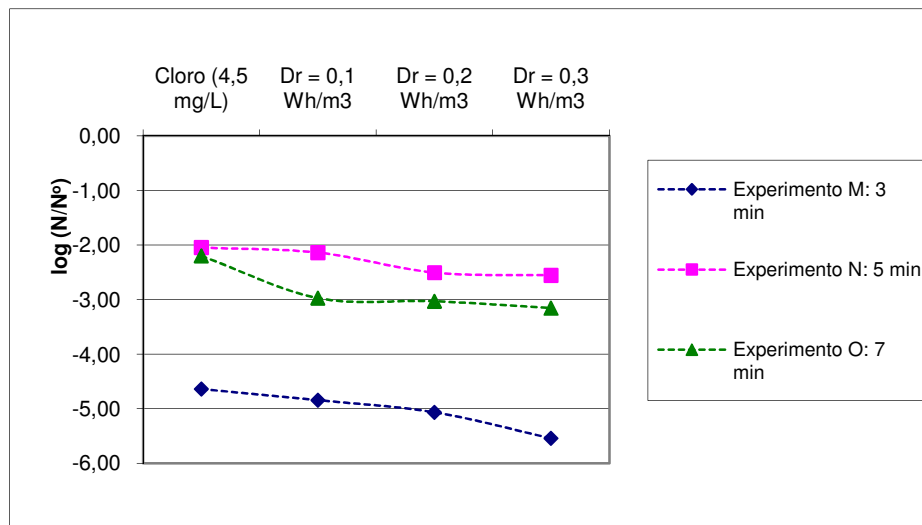


Figura 8 – Inativação de *E. coli* para a concentração de cloro 4,5 mg/L, para os Experimentos M (3 min), N (5 min) e O (7 min)

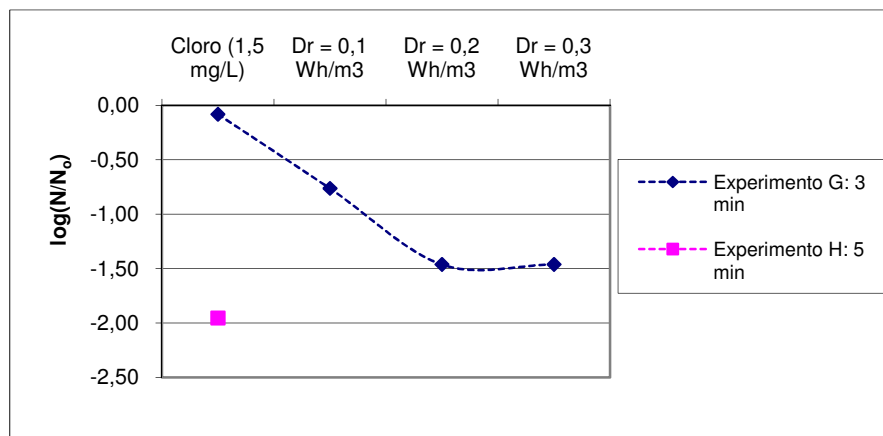


Figura 9 – Inativação de colifagos para a concentração de cloro 1,5 mg/L, para os Experimentos G (3 min) e H (5 min)

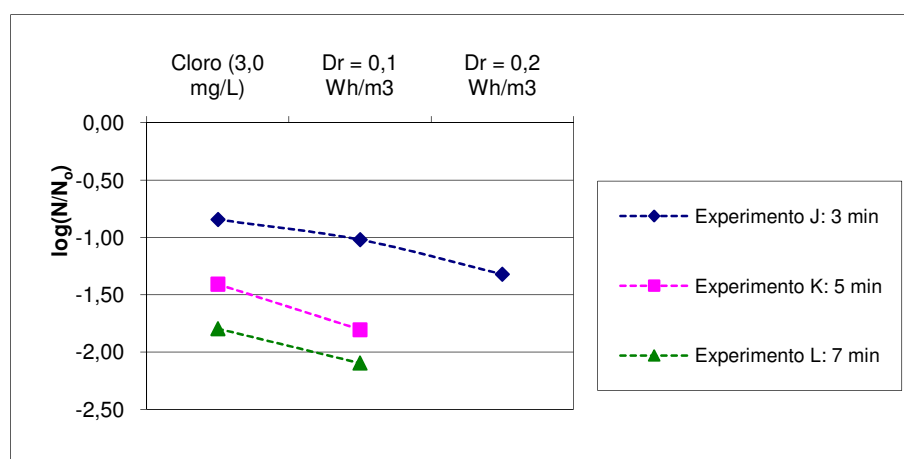


Figura 10 – Inativação de colifagos para a concentração de cloro 3,0 mg/L, para os Experimentos J (3 min), K (5 min) e L (7 min)

Cabe ressaltar que em alguns casos não foi detectada a presença de colifagos. Tais resultados não se encontram apresentados nas Figuras 9 e 10, assim como os resultados dos Experimentos M, N e O não se encontram em forma de gráfico, devido à forma de interpretação dos resultados, em função de $\log(N/N_0)$.

Para *E. coli*, a maior inativação atingida foi de 5,54 log, para o experimento M, resultante da ação de 4,5 mg/L de cloro com 3 minutos de contato seguido de 0,3 Wh/m³ de radiação ultravioleta.

Esta inativação foi superior à mais alta obtida na primeira etapa do trabalho, de 5,40 log com concentração de 8,5 mg/L com 5 minutos de contato.

Para os colifagos, a maior inativação foi de 2,10 log, obtida após concentração de 3,0 mg/L de cloro por 7 minutos seguida da dose recebida de 0,1 Wh/m³ de radiação ultravioleta.

Pode-se observar, na inativação dos colifagos, que o aumento do tempo de contato do cloro resultou em maiores inativações, tanto para o cloro, quanto decorrente da radiação ultravioleta, apresentadas nas Figuras 9 e 10. Observa-se que o aumento do tempo de contato com o cloro aumentou a inativação de colifagos, e que este aumento resultou numa maior inativação após a radiação ultravioleta.

Para *E. coli*, os resultados de inativação apresentaram o mesmo comportamento, tendo o aumento do tempo de contato aumentado a inativação. Exceção para os experimentos G e M, que mesmo com o menor tempo de contato, de 3 minutos, resultaram em inativação superior à observada para os demais experimentos que utilizaram as mesmas concentrações de cloro. De fato, o experimento M foi o que resultou na maior inativação de *E. coli* observada. Tal fato pode ser explicado em função das características físico-químicas deste experimento, que apresentou os menores valores de DQO e SST dentre todos os ensaios, apresentando por isso características favoráveis a uma desinfecção mais eficaz.

A verificação do sinergismo foi realizada conforme apresentado por Finch et al (2000). Os autores verificam o sinergismo a partir da premissa de que a inativação decorrente da ação sequencial deve ser superior à soma das inativações individuais de cada desinfetante. Assim, o sinergismo pode ser verificado pelas Equações (8) e (9):

$$\text{Sinergismo} = I_r - (I_1 + I_2) \quad (8)$$

$$I = -\log(N / N_0) \quad (9)$$

I_r : inativação decorrente do processo seqüencial

I_1 : inativação decorrente do desinfetante primário (cloro)

I_2 : inativação decorrente do desinfetante secundário (radiação ultravioleta)

N : número final de organismos

N_0 : número inicial de organismos

Desta maneira, pôde-se verificar a ocorrência ou não de sinergismo para a inativação de *E. coli* e colifagos, para cada combinação estudada de concentração de cloro, tempo de contato e doses de radiação ultravioleta. Se $I_r > 0$ há sinergismo; se $I_r = 0$ não há sinergismo e se $I_r < 0$ há antagonismo.

Os resultados da verificação do sinergismo estão apresentados nas Tabelas 16 a 20.

Tabela 16 – Verificação do sinergismo para *E. coli*, para a concentração de cloro 1,5 mg/L – valores de I_r
Cloro (1,5 mg/L)

Tempo (min)	Cloro (1,5 mg/L)		
	Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
3,0	0,00	1,02	1,11
5,0	0,00	0,73	1,04
7,0	0,00	0,16	0,20

Tabela 17 – Verificação do sinergismo para *E. coli*, para a concentração de cloro 3,0 mg/L – valores de I_r

Tempo (min)	Cloro (3,0 mg/L)		
	Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
3,0	0,00	0,00	0,21
5,0	0,00	0,38	0,60
7,0	0,00	0,49	0,89

Tabela 18 – Verificação do sinergismo para *E. coli*, para a concentração de cloro 4,5 mg/L – valores de I_r

Tempo (min)	Cloro (4,5 mg/L)		
	Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
3,0	0,00	0,20	0,43
5,0	0,00	0,09	0,46
7,0	0,00	0,77	0,83

Tabela 19 – Verificação do sinergismo para colifagos, para a concentração de cloro 1,5 mg/L – valores de I_r

Tempo (min)	Cloro (1,5 mg/L)		
	Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
3,0	0,00	0,68	1,38

Tabela 20 – Verificação do sinergismo para colifagos, para a concentração de cloro 3,0 mg/L – valores de I_r

Tempo (min)	Cloro (3,0 mg/L)		
	Dr = 0,1 Wh/m ³	Dr = 0,2 Wh/m ³	Dr = 0,3 Wh/m ³
3,0	0,00	0,18	-
5,0	0,00	-	-
7,0	0,00	-	-

Notas: - : Não calculado pois os colifagos não foram detectados no efluente desinfetado

O sinergismo foi observado para os dois indicadores estudados, *E. coli* e colifagos. De maneira geral, pode-se observar a ocorrência de sinergismo para todos os ensaios seqüenciais com dose recebida de radiação ultravioleta superior a 0,1 Wh/m³.

Vale destacar que nos casos em que a dose recebida de radiação ultravioleta foi igual a 0,1 Wh/m³, o sinergismo não foi observado, tanto para *E. coli* quanto para colifagos. Nestes casos, não ocorreu qualquer efeito sinérgico, visto que a soma das ações individuais foi igual à inativação decorrente do processo seqüencial. Desta maneira, pode-se perceber que doses muito baixas da radiação ultravioleta não promovem a ocorrência do sinergismo, independentemente da concentração de cloro e tempo de contato aplicados previamente.

Foi ainda observado, de maneira geral, que o aumento da dose de radiação ultravioleta proporcionou aumento do sinergismo, para mesma concentração e tempo de contato do cloro.

Em relação à influência da concentração e tempo de contato do cloro no sinergismo, pôde-se observar nos ensaios realizados com concentração de cloro de 3,0 mg/L, que o aumento do tempo de contato proporcionou o aumento no sinergismo para *E. coli*, conforme apresentado na Tabela 17. Estes experimentos apresentaram, coincidentemente, características físico-químicas semelhantes, conforme apresentado nas Tabelas 10, 11 e 12. Nos demais experimentos, que apresentaram características físico-químicas bastante divergentes, este comportamento não foi observado.

O mecanismo pelo qual o sinergismo é explicado não é totalmente esclarecido na literatura. Alguns autores, como Cho et al (2006), apontam que o sinergismo é decorrente do dano subletal causado pelo desinfetante primário, que facilita a ação do desinfetante secundário.

No caso estudado, um dos fatores que pode explicar o sinergismo observado é decorrente dos efeitos dos desinfetantes nos organismos estudados. Como foi observado na primeira etapa do trabalho, *E. coli* apresenta maior resistência à ação da radiação ultravioleta, enquanto os colifagos são mais resistentes ao cloro. A combinação destes efeitos pode ser um dos fatores responsáveis pela observação do sinergismo.

A ocorrência do sinergismo leva a crer que o uso combinado de dois desinfetantes traga ganhos econômicos, em função da redução de suas doses. Outro benefício pode ser obtido com a redução do consumo de desclorantes em consequência da menor dosagem de cloro. A descloração é

necessária para atender o padrão de qualidade do corpo receptor conforme estabelecido na Resolução CONAMA 357/05.

Nesse sentido, cabe destacar a diferença nas dosagens de cloro e radiação ultravioleta utilizadas nas duas etapas da pesquisa. A maior inativação de *E. coli* atingida com uso somente de cloro foi de 5,40 log, resultante da concentração de 8,5 mg/L, num tempo de contato de 5 minutos. Neste mesmo ensaio, obteve-se 2,40 log de inativação de colifagos, com 10 e 15 minutos de contato. Com a aplicação seqüencial de 4,5 mg/L de cloro com 3 minutos de contato seguido de 0,3 Wh/m³ de radiação ultravioleta obteve-se 5,54 log de inativação de *E. coli*, e não foram detectados colifagos no efluente desinfetado. Pode-se observar a redução da dosagem de cloro, além dos efeitos sinérgicos na inativação de *E. coli* e colifagos, resultantes do processo seqüencial.

A mesma redução da dosagem pode ser observada em relação aos ensaios utilizando somente radiação ultravioleta. Em relação à *E. coli*, a maior inativação alcançada com a radiação ultravioleta foi de 5,30 log, resultante da dose de 3,0 Wh/m³. Os colifagos não foram detectados após esta dose. A inativação neste caso foi próxima à maior obtida com o processo seqüencial, mas a dose de radiação ultravioleta, de 3,0 Wh/m³, foi bastante superior àquela empregada no processo seqüencial, de 0,3 Wh/m³.

Cabe ainda destacar, em relação aos resultados apresentados, a diferença no comportamento dos organismos com os desinfetantes estudados.

6. CONCLUSÕES

Pôde-se observar o diferente comportamento dos indicadores estudados, *E. coli* e colifagos, frente à ação de dois desinfetantes, o cloro e a radiação ultravioleta, primeiramente na desinfecção com cada agente, e depois com eles seqüencialmente.

Considerando-se as características físicas, químicas e microbiológicas do esgoto e as

condições operacionais dos ensaios, pode-se concluir na primeira etapa do trabalho que:

- A radiação ultravioleta foi o agente que proporcionou maior redução de colifagos, em relação a *E. coli*, sendo obtida redução de 2,59 log, com a dose de 0,4 Wh/m³. Observou-se que, em relação às interferências das características do efluente no processo de desinfecção, as mais significativas são a concentração de sólidos suspensos, que agem como um escudo, protegendo os organismos da radiação ultravioleta; e a absorvância do efluente, que influencia no tempo em que o efluente deve ser exposto à radiação, e conseqüentemente no consumo de energia.
- Por sua vez, o cloro proporcionou maior inativação de *E. coli*, em relação aos colifagos. A maior redução observada foi de 5,40 log, para o tempo de contato de 5 minutos, com a aplicação de 8,5 mgCl₂/L. Verificou-se que, nos ensaios utilizando cloro, as características físico-químicas do efluente utilizado afetaram diretamente a eficácia do processo. Quanto maiores a DQO e sólidos suspensos totais, o efluente apresentou maior demanda de cloro, comprometendo a disponibilidade de cloro para a desinfecção. Por esta razão, o aumento da concentração aplicada não resultou, necessariamente, no aumento da eficiência da desinfecção.

Tais resultados sugerem que o uso do processo seqüencial cloro seguido de radiação ultravioleta pode proporcionar benefícios econômicos, por meio da diminuição de dosagem de ambos os desinfetantes, e resultar em efeitos sinérgicos na inativação de *E. coli* e colifagos. Tendo consideradas estas primeiras conclusões, pode-se afirmar, para a segunda etapa do trabalho que:

- Nos ensaios seqüenciais com a aplicação de cloro e radiação ultravioleta, pôde-se observar os efeitos sinérgicos decorrentes da aplicação dos dois desinfetantes. Para a realização destes ensaios, foram reduzidas as concentrações e tempo de contato do cloro, e as doses de radiação ultravioleta, em relação à desinfecção com somente cloro e com somente radiação ultravioleta.

- Ocorreu sinergismo na inativação dos dois organismos estudados, *E. coli* e colifagos. O sinergismo foi observado em todos os experimentos em que o efluente clorado foi submetido à doses de radiação ultravioleta superiores à $0,1 \text{ Wh/m}^3$, independentemente da concentração e tempo de cloro aplicados.

- A redução das dosagens dos desinfetantes utilizados deve ser realizada cuidadosamente, visto que doses muito baixas podem não resultar em efeitos sinérgicos.

- A ocorrência do sinergismo pode ser uma ferramenta de importante aplicação em desinfecção, tanto de água de abastecimento quanto de esgoto sanitário. Para o esgoto sanitário em particular, é de grande interesse a redução da concentração de desinfetantes, como o cloro, que deixam residual após a desinfecção. O uso combinado do cloro com outro desinfetante pode reduzir esta concentração residual, o que evita, ou minimiza, o processo de descloração a que o efluente da desinfecção deve ser submetido. A verificação do sinergismo nestas condições garante que a desinfecção seja realizada com dosagens reduzidas de desinfetantes sem que haja o comprometimento da eficiência do processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. M. S. et al.(2002). Avaliação do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de águas com turbidez e cor moderadas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 07, n. 12, 2002 .

APHA/AWWA/Water Environment Federation.(2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington, DC, USA, 2005.

AWWA e ASCE(1990). Water Treatment Plant Design.Second edition, McGraw-Hill, Inc., New York, NY.

BISWAS, K.; CRAIK, S.; SMITH, D. W.; BELOSEVIC, M.(2003). Synergistic inactivation of *Cryptosporidium parvum* using ozone followed by free chlorine in natural water. *Water Research*, v. 37, 4737-4747.

BRASIL(2005). Resolução CONAMA 357. Disponível em: www.mma.gov.br. Acesso em 01 de setembro de 2008.

CHO, M., KIM, J. H., YOON, J.(2006) Investigating synergism during sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with several disinfectants. *Water Research*, v. 40, 2911-2920.

COLETTI, F. J.(2003).Inativação de microorganismos indicadores presentes em esgoto sanitário com radiação ultravioleta. 239p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

CORONA-VASQUEZ, B., SAMUELSON, A., RENNECKER, J. L., MARIÑAS, B. J.(2002) Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone and free chlorine. *Water Research*, v.36, 4053-4063.

DANIEL, L. A. (coord.)(2001) Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável Rio de Janeiro: RIMA ABES 139p Projeto PROSAB

- DIAS, V. D.(2001) Radiação ultravioleta e ozônio aplicados como métodos alternativos de desinfecção de efluentes secundários de esgoto sanitário. 150p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- DRIEDGER, A. M., RENNECKER, J. L., MARIÑAS, B. J.(2000) Sequential inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone and free chlorine. *Water Research*, v.24. n.14, 3591-3597.
- EL-REHAILI, A. M, I.(1995) Response of BOD, COD and TOC of secondary effluents to chlorination. *Water Research*, v. 29, n. 6, p. 1571-1577
- FINCH, G. R.; LIYANAGE, L. R. J.; GYURÉK, L. L.; BRADBURY, J. S.(2000). Synergistic effects of multiple disinfectants. AWWA Research Foundation. And American Water Works Association, USA, 52p.
- GILBOA, Y., FRIEDLER, E.(2008). UV disinfection of RBC-treated light greywater effluent: Kinetics, survival and regrowth of selected microorganisms. *Water Research*, v.42. p. 1043 – 1050.
- GONÇALVES, R. F.; JORDÃO, E. P.; SOBRINHO, P. A.(2003) Introdução. In: GONÇALVES, R. F (coord.) Desinfecção de Efluentes Sanitários. Rio de Janeiro : ABES, RiMa. 438 p. Projeto PROSAB
- JUNG, Y. J, OH, B.S., KANG, J.(2007) Synergistic effect of sequential or combined use of ozone and UV radiation for the disinfection of *Bacillus subtilis* spores. *Water Research*, .42. p. 1613 – 1621.
- KOIVUNEN, J; HEINONEN-TANSKI, H.(2005) Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV radiation and combined chemical/UV treatments. *Water Research*, v. 39 n. p. 1519-1526
- LIBERTI, L., NOTARNICOLA M., PETRUZZELLI, D.(2002). Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. UV disinfection: parasite removal and by-product formation. *Desalination* v.152, p.315-324

SOARES, L. V. (2007) Ozonização de esgoto sanitário: estudo da hidrodinâmica, transferência de massa e inativação de microorganismos indicadores. 249p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

SARTORI, L. (2004) Adequação da qualidade microbiológica de efluentes de tratamento secundário de esgoto sanitário pela aplicação dos desinfetantes ozônio, permanganato de potássio e ácido peracético. 200p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

SOUZA, J. B.; DANIEL, L. A.(2005) Comparação entre hipoclorito de sódio e ácido peracético na inativação de *E. coli*, colifagos e *C. perfringens* em água com elevada concentração de matéria orgânica. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, 111-117.

TYRRELL, S. A, RIPPEY, S. R., WATKINS, W. D.(1995) Inactivation of bacterial and viral indicators in secondary sewage effluents, using chlorine and ozone *Water Research*, v. 29 n.11. p. 2483-2490

USEPA(1999a) U.S. Environmental Protection Agency. Wastewater technology fact sheet chlorine disinfection. Washington, DC

USEPA(1999b) U.S. Environmental Protection Agency. Alternative disinfectants and oxidants guidance manual. Washington, DC

USEPA(2006) U.S. Environmental Protection Agency. Ultraviolet disinfection guidance manual. Washington, DC.

WHO(2004) Burden of disease and cost-effectiveness estimates. Disponível em http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/burden/en/index.html Acesso em 27 set. 2007.

WINWARD et al (2007) Chlorine disinfection of grey water for reuse: Effect of organics and particles. *Water Research* v. 42, p. 483-491

APÊNDICE**Tabela A.1 – Tempos de exposição à radiação ultravioleta para o Experimento A**

Experimento A			
	Dr = 1 Wh/m³	Dr = 2 Wh/m³	Dr = 3 Wh/m³
Tempo (s)	43	86	129

Tabela A.2 – Tempos de exposição à radiação ultravioleta para o Experimento B

Experimento B			
	Dr = 0,2 Wh/m³	Dr = 0,4 Wh/m³	Dr = 0,6 Wh/m³
Tempo (s)	5	10	16