



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental



JEFFERSON GREYCO CAMARGO

**APLICAÇÃO DO DIÓXIDO DE CLORO NA DESINFECÇÃO DE EFLUENTES
DOMÉSTICOS TRATADOS PELO SISTEMA DE LODOS ATIVADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental na área de Tecnologia de Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Flávio Rubens Lapolli., Dr.

Florianópolis
Estado de Santa Catarina – Brasil
agosto – 2004

**APLICAÇÃO DO DIÓXIDO DE CLORO NA DESINFECÇÃO DE EFLUENTES
DOMÉSTICOS TRATADOS PELO SISTEMA DE LODOS ATIVADOS**

JEFFERSON GREYCO CAMARGO

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Tecnologias de Saneamento Ambiental

Aprovado por

Prof. Maria Ángeles Lobo Recio., Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Paulo Belli Filho., Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Armando Borges de Castilhos Júnior., Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina
(Coordenador do Programa)

Prof. Flávio Rubens Lapolli., Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina
(Orientador)

Florianópolis
Estado de Santa Catarina – Brasil
agosto – 2004

Dedico esta pesquisa ao meus pais, Miraldo e Luzia,
pelos esforços e lutas para ter formado um filho.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por me dar saúde e força para conseguir cumprir minhas metas pessoais e profissionais.
- Ao meu orientador, Prof. Flávio Rubens Lapolli, que acreditou em mim aceitando-me como aluno, quero expressar meu reconhecimento pela competência profissional e humana com que conduziu minha orientação, pela sua compreensão, estímulo e incentivo.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnologia (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.
- À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) que através do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB) financiou o projeto.
- À empresa paranaense C. O. Muller que cedeu o gerador de dióxido de cloro.
- À Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) que permitiu a realização do trabalho junto a estação de tratamento de esgotos Insular e seus funcionários.
- Aos meus colegas: Waldir, Francini, Bianca, Alessandra, Alan Henn, Maria Eliza e Valquíria, Liamara pelos momentos de estudo e diversão.
- Ao bolsista de Iniciação Científica, João Paulo de Sá, pela grande amizade e seriedade durante toda realização do trabalho.
- À minha noiva Mirielle e seus pais Guido e Ieda, por estarem presente nos momentos importantes da minha vida, pelo carinho, companheirismo e incentivo durante a conclusão deste trabalho de Pós-Graduação.
- Ao meu irmão Greick, por me incentivar e compreender a minha ausência.
- A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

“A leitura, após certa idade, distrai excessivamente o espírito humano de suas reflexões criadoras. Todo o homem que lê demais e usa o cérebro de menos, adquire a preguiça de pensar”.

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 DESINFECÇÃO E ESTERILIZAÇÃO	4
2.1.1 Mecanismo de Desinfecção	6
2.1.2 Cinética de Desinfecção	7
2.2 SELEÇÃO DO PROCESSO DE DESINFECÇÃO	8
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DESINFECÇÃO	12
2.3.1 Tempo de Contato	12
2.3.2 Concentração e Tipo de Agente Químico	12
2.3.3 Intensidade e Natureza do Agente Físico	13
2.3.4 Temperatura	14
2.3.5 Número de Microrganismos	15
2.3.6 Tipo de Microrganismos	15
2.3.7 Natureza da Matéria Orgânica Presente	15
2.4 MÉTODOS DE DESINFECÇÃO	16
2.4.1 Desinfecção por Agentes Físicos	16
2.4.1.1 Calor e radiação ultravioleta	16
2.4.1.1.1 Cinética da desinfecção por radiação UV	17
2.4.1.1.2 Mecanismo de desinfecção por radiação UV	19
2.4.1.1.3 Vantagens e desvantagens do processo	20
2.4.2 Desinfecção por Agentes Químicos	20
2.4.2.1 Ozônio	20
2.4.2.1.1 Mecanismo de reação do ozônio	21

2.4.2.1.2	Aplicações em efluentes domésticos	22
2.4.2.1.3	Vantagens e desvantagens do processo	23
2.4.2.2	Cloro	24
2.4.2.2.1	Reações químicas de compostos clorados	25
2.4.2.2.2	Fatores que influem na eficácia da desinfecção com cloro	28
2.4.2.2.3	Vantagens e desvantagens do processo	28
2.4.2.3	Dióxido de cloro	29
2.4.2.3.1	Produção do dióxido de cloro	30
2.4.2.3.2	Fatores que afetam a eficiência da desinfecção com o dióxido de cloro	31
2.4.2.3.3	Toxicidade do dióxido de cloro	33
2.4.2.3.4	Aplicação do dióxido de cloro	33
2.4.2.3.5	Vantagens e desvantagens do processo	36
2.4.3	Subprodutos da Desinfecção	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	EQUIPAMENTOS	43
3.1.1	Sistema de Desinfecção com o Dióxido de Cloro	43
3.1.1.1	Produção do dióxido de cloro durante os ensaios	43
3.1.1.2	Dimensionamento do reator	45
3.1.2	Equipamentos Auxiliares	46
3.2	PARÂMETROS DE MONITORAMENTO PARA DESINFECÇÃO	47
3.2.1	Parâmetros Físico-Químicos	47
3.2.1.1	Residual de dióxido de cloro	47
3.2.1.2	Cor aparente	47
3.2.1.3	Potencial hidrogeniônico	48
3.2.1.4	Demanda química de oxigênio	48
3.2.2	Parâmetros Microbiológicos	48
3.2.2.1	Concentração de coliformes fecais	48
3.2.3	Parâmetros Auxiliares	49
3.2.3.1	Tempo de detenção hidráulica (TDH)	49
3.2.3.2	Dosagem do desinfetante	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	53
4.2	PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS	54

4.2.1	Remoção de Coliformes Fecais	54
4.3	ANÁLISE DE CUSTO DE DESINFECÇÃO	57
4.3.1	Custo de Implantação	57
4.3.1.1	Capacidade de geração e custo por economia para implantação do sistema	58
4.3.2	Custos Operacionais do Sistema	60
4.3.2.1	Custos dos reagentes	60
4.3.2.2	Custos operacionais totais	62
4.3.3	Custo da Desinfecção	62
4.3.4	Estudo de Caso	63
4.3.4.1	Custo financeiro para aquisição do gerador de dióxido de cloro	64
4.3.4.2	Custos operacionais	64
4.3.4.3	Custos totais	65
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66
	REFERÊNCIAS	68

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- Inativação de microrganismos em função do tempo para valores observados (◆ = 0,45; ■ = 2,64) e estimados (-◆- = 0,45; -■- = 2,64) segundo modelo de Chick	8
FIGURA 2	- Inativação de microrganismos em função do tempo para valores observados (◆ = 0,45; ■ = 2,64) e estimados (-◆- = 0,45; -■- = 2,64) segundo o modelo de Hom	10
FIGURA 3	- Dimerização fotoquímica de duas bases nitrogenadas	19
FIGURA 4	- Esquema da geração do ozônio pelo efeito corona	21
FIGURA 5	- Oxidação de substratos durante a aplicação do ozônio em água	21
FIGURA 6	- Esquema do sistema de ozonização em contínuo (a) e (b)	23
FIGURA 7	- Concentração de cloro residual livre disponível em função do pH	26
FIGURA 8	- Adição de derivados clorados em água	27
FIGURA 9	- Produção de dióxido de cloro a partir do ácido clorídrico (a) e do gás cloro (b)	30
FIGURA 10	- Efeito da inativação da bactéria <i>Escherichia coli</i> de efluentes domésticos em diferentes valores de pH para o dióxido de cloro e gás cloro	31
FIGURA 11	- Efeito do tempo de contato na efetividade durante a inativação da bactéria <i>Escherichia coli</i> em águas de abastecimento para o dióxido de cloro e gás cloro	32
FIGURA 12	- Efeito do tempo de contato na efetividade durante a inativação da bactéria <i>Staphylococcus aureus</i> em águas de abastecimento para o dióxido de cloro e gás cloro	32
FIGURA 13	- Doses requeridas de dióxido de cloro para alcançar níveis de inativação de <i>Giardia</i> e <i>Cryptosporidium</i> a 1 e 24 horas de contato	34
FIGURA 14	- Taxa de Inativação da bactéria <i>Escherichia coli</i> em diferentes doses de dióxido de cloro e cloro líquido em água de abastecimento	35
FIGURA 15	- Taxa de Inativação da bactéria <i>Escherichia coli</i> em diferentes doses de dióxido de cloro e cloro líquido em efluentes domésticos	36
FIGURA 16	- Estrutura molecular dos principais trihalometanos (THM)	37
FIGURA 17	- Efeito da concentração de brometo na formação de THM	39

FIGURA 18	- Efeito da concentração de brometo na formação de THM	39
FIGURA 19	- Distribuição do aldeído em águas subterrâneas (a) e águas superficiais (b)	41
FIGURA 20	- Correlação entre a concentração de aldeídos e a dosagem de ClO_2	41
FIGURA 21	- Instalação do sistema de desinfecção	42
FIGURA 22	- Gerador de dióxido de cloro utilizado durante os ensaios	44
FIGURA 23	- Bombas dosadoras de HCl (alaranjada), H_2O (verde) e NaClO_2 (violeta)	44
FIGURA 24	- Reator tubular usado para a desinfecção com o dióxido de cloro	45
FIGURA 25	- Chicanas utilizadas para a homogeneização dos fluídos	45
FIGURA 26	- Inativação de coliformes fecais em função do tempo para doses reais e estimadas de dióxido de cloro	55
FIGURA 27	- Custo unitário de desinfecção em função da capacidade de geração	58

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1	- Os principais agentes etiológicos relacionados a doenças de veiculação hídrica	5
----------	--	---

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- As formas de representação da eficiência da desinfecção	4
TABELA 2	- Intervalos Ct de produtos na inativação de vários microrganismos	13
TABELA 3	- Constantes de inativação de alguns microrganismos	18
TABELA 4	- Principais propriedades físicas do cloro	25
TABELA 5	- Parâmetros técnicos que influem na eficácia da desinfecção com o cloro	28
TABELA 6	- Descrição dos reagentes utilizados	46
TABELA 7	- Descrição dos equipamentos utilizados	46
TABELA 8	- Resultados de ensaio com o traçador químico	50
TABELA 9	- Valores da distribuição de idade $t.E$ para cada instante	51
TABELA 10	- Características físico-químicas do efluente doméstico	53
TABELA 11	- Concentração de CF (NMP/100mL) no efluente antes e após a aplicação do ClO_2	54
TABELA 12	- A eficiência do dióxido de cloro durante a desinfecção	56
TABELA 13	- Custo do sistema de geração do dióxido de cloro	57
TABELA 14	- Custo de instalação para o sistema de geração de ClO_2 por economia	59
TABELA 15	- Vazão de $NaClO_2$ e HCl para várias capacidades de geração	61
TABELA 16	- Custo mensal dos reagentes clorito de sódio e ácido clorídrico	62
TABELA 17	- Custo operacional total mensal	62
TABELA 18	- Custos de implantação e de operação para processos de desinfecção	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	-	American Public Health Association
AWWA	-	American Water Work Association
Ca ⁺⁺	-	Cálcio
Ca(ClO) ₂	-	Hipoclorito de Cálcio
CASAN	-	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CF	-	Coliformes fecais
CG	-	Capacidade de geração
CHCl ₃	-	Triclorometano
CHBrCl ₂	-	Bromodiclorometano
CHBr ₂ Cl	-	Dibromoclorometano
CHBr ₃	-	Tribromometano
CIE	-	Custo de instalação
Cl ₂	-	Cloro gasoso
Cl ⁻	-	Íon cloreto
ClO ₂ ⁻	-	Íon clorito
ClO ₃ ⁻	-	Íon clorato
CN ⁻	-	Ion cianeto
CO ₂	-	Dióxido de carbono
COT	-	Carbono orgânico total
CRC	-	Cloro residual combinado
CRL	-	Cloro residual livre
CRT	-	Cloro residual total
CUN	-	Custo unitário de aquisição
DNA	-	Ácido desoxirribonucléico
ETE	-	Estação de tratamento de esgotos
HCl	-	Ácido clorídrico
HClO	-	Ácido hipocloroso
Kh	-	Constante de hidrólise
Mn ²⁺	-	Manganoso
Mn ⁴⁺	-	Mangânico

N	- Economias atendidas
Na ⁺	- Sódio
NaCl	- Cloreto de sódio
NCl ₃	- Tricloramina
NaClO	- Hipoclorito de sódio
NaClO ₂	- Clorito de sódio
NHCl ₂	- Dicloramina
NH ₂ Cl	- Monocloramina
NMP	- Número mais provável
NO ₂ ⁻	- Nitrito
NO ₃ ⁻	- Nitrato
O ₂	- Oxigênio
O ₃	- Ozônio
OCl ⁻	- Íon hipoclorito
POA	- Processos Oxidativos Avançados
PRE	- Valor da prestação mensal
OCN ⁻	- Cianato
*OH	- Radical hidroxila
OMS	- Organización Mundial de la Salud
OPS	- Organización Panamericana de la Salud
POP	- População
PROSAB	- Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
RNA	- Ácido ribonucléico
SWBIC	- Southwest Biotechnology and Informatics Center
TAS	- Tanque de água de serviço
T _t	- Tempo teórico de detenção hidráulica
t'	- Tempo de detenção hidráulico real
THM	- Trihalometano
USEPA	- United States Environmental Protection Agency
UV	- Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos	- Descrição	Grandezas
A	- Área	L^2
A'	- Fator de frequência	-
C	- Concentração final	ML^{-3}
C _{ae}	- Cor aparente do efluente	uC
CC _i	- Cor do corante inicial	uC . min
C _p	- Carga de dióxido de cloro produzida	MT^{-1}
Ct	- Produto da concentração do desinfetante com o Tempo de contato	$ML^{-1}T$
D _(ClO₂)	- Dosagem do dióxido de cloro	mg/L
D _i	- Dose de irradiação ultravioleta	$\mu Ws/cm^2$
E	- Distribuição de idade para cada instante	-
E _a	- Energia de ativação	J/mol
I	- Intensidade da radiação	μW
K'	- Coeficiente de eficiencia do desinfetante	-
k _{uv}	- Constante de decaimento para radiação UV	$cm^2/\mu W s$
k	- Constante de decaimento	T^{-1}
k'	- Constante de decaimento de Hom	T^{-1}
k _T	- Constante de reação de van't Hoff-Arrhenius	-
Ln	- Logaritmo natural	-
Log	- Logaritmo	-
N	- Número de organismos no tempo t	NMP/100 mL
N ₀	- Número de organismos no tempo t = 0	NMP/100 mL
n	- Coeficiente de diluição	-
m	- Constante empírica	-
Q	- Vazão	$ML^{-3}T^{-1}$
pH	- Potencial hidrogeniônico	-
R	- Constante universal dos gases	8,31 J/mol K
T _a	- Temperatura absoluta	K
t	- Tempo	T
V	- Volume	L^3

CAMARGO, J. G. **Aplicação do dióxido de cloro na desinfecção de esgotos domésticos tratados pelo sistema de lodos ativados**. 2004. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RESUMO

O lançamento de esgotos domésticos sem tratamento prévio nos corpos receptores afeta seu uso posterior, pois representa um problema de saúde pública devido a elevada densidade de microrganismos patogênicos presentes no meio. Além disso, a maioria dos sistemas de tratamento de esgotos no Brasil, como exceção dos sistemas de lagoas de estabilização, são insuficientes para remoção destes microrganismos causadores de doenças de veiculação hídrica. Este trabalho de pesquisa teve como objetivo determinar a dosagem mínima e segura de dióxido de cloro necessária para atender os padrões de lançamento de esgotos tratados em águas superficiais e seu reúso, posteriormente, realizou-se um estudo econômico do custo de implantação, operação do processo de desinfecção e um estudo de caso para 35.000 economias atendidas. Os resultados obtidos demonstram que a dose mínima foi de 2,0 mgClO₂/L, pois com esta dose houve eficiência de 99,94% (3,23 log) na remoção de coliformes fecais num tempo de contato de 15 minutos e também atendeu todos os padrões de lançamentos de esgotos tratados em águas superficiais e seu reúso, conforme determina a ABNT. O custo de implantação do sistema de dióxido de cloro é menos oneroso em relação ao sistema de desinfecção por ozônio e também ao sistema de desinfecção por radiação UV. O custo de operação do dióxido de cloro a R\$ 0,073/m³ aproximou-se do hipoclorito de sódio R\$ 0,089/m³, enquanto que o custo de operação do ozônio mostrou ser de todas a opção mais cara R\$ 0,091/m³. O estudo de caso realizado para 35.000 economias atendidas apresentou custo estimado com valor total mensal de R\$ 1,38 por economia mês, incluindo os custos de aquisição do gerador, de operação e manutenção do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Desinfecção, esgoto doméstico, dióxido de cloro, análise econômica

CAMARGO, J. G. **Application of chlorine dioxide in the disinfection of domestic wastewater treated by the system of activated**. 2004. 79 f. Dissertation (Masteral in Environmental Engineering) – Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis.

ABSTRACT

The discharge of domestic wastewater without previous treatment into the receiving body affects, its later use because it represents a public health problem due to the high density of pathogenic microscopic organisms present in the water. Moreover, the majority of the sewage treatment systems in Brazil, with the exception of the stabilization ponds are insufficient to remove the water-born disease causing microscopic organisms. This research had the propose of determining the minimum safe dose of chlorine dioxide necessary to meet the standard for the discharge water and its later reuse. An economic study of the cost of implementation, operation of the process of disinfection and case study of 35.000 economy attended were also realised. The results obtained demonstrated that the minimum dose was 2,0 mgClO₂/L, because this dose was 99,94% efficient (3,23 log) in the removal of fecal coliforms in a contact time of 15 minutes and also met all the standards for the discharge of sewage in the surface water and its reuse, as determined by ABNT. The cost of the implementation of the chlorine dioxide system is less onerous that the system of disinfection with ozone or the system of disinfection with UV radiation. The cost of the chlorine dioxide operation at R\$ 0,073/m³ was close to the cost of sodium hypochlorate R\$ 0,089/m³, while the cost of the operation with ozone showed that was the most expensive R\$ 0,091/m³. The case study realised for the 35.000 economy served presented an estimated cost of R\$ 1,38 per economy month, including the cost of buying the generator, the operating cost and the maintenance of the system.

KEYWORDS: Disinfection, domestic wastewater, chlorine dioxide, economic analysis

1 INTRODUÇÃO

No Brasil apenas 41,60% da população é beneficiada com redes de esgotos. Do total do volume tratado pelos sistemas de esgoto, apenas 35% recebem tratamento prévio antes de serem lançados para um corpo receptor, ou antes, de serem usados na irrigação direta de áreas cultivadas, na proteção das comunidades aquáticas e, principalmente na recreação de contato primário ou na criação intensiva de espécies destinadas á alimentação humana (BIO, 2002).

O lançamento de esgotos domésticos sem tratamento prévio nos corpos receptores afeta seu uso posterior, pois representa um problema de saúde pública devido a elevada densidade de microrganismos patógenos presentes no meio. Além disso, a maioria dos sistemas de tratamento de esgotos no Brasil, como exceção dos sistemas de lagoas de estabilização, são insuficientes para remoção destes microrganismos causadores de doenças de veiculação hídrica. Deste modo, os sistemas requerem uma terceira etapa destinada para a desinfecção dos efluentes domésticos tratados pelos tratamentos secundários.

A desinfecção de esgotos é pouco consolidada a nível mundial. A prática norte-americana usualmente envolve a desinfecção do esgoto, enquanto a estratégia européia normalmente efetua a desinfecção apenas no tratamento de águas (VON SPERLING, 1996a).

A desinfecção é uma etapa seletiva destinada a redução da concentração de microrganismos patógenos para níveis não prejudiciais à saúde pública. Enquanto que, a esterilização acontece quando há total eliminação de patógenos abaixo dos níveis tolerantes conforme a legislação vigente.

O desinfetante usualmente utilizado é o cloro, o qual apresenta diversas vantagens como, por exemplo: economia, alta eficiência na oxidação e efeito residual. Entretanto, a desvantagem é formação de subprodutos indesejáveis como os trihalometanos (THM) que são carcinogênicos e são questionados desde 1974.

Devido este fato houve a necessidade de pesquisar novos processos de desinfecção para efluentes domésticos de modo que houvesse melhoria nas condições de vida da população. Os efluentes domésticos desinfetados podem ser lançados nas águas litorâneas,

nos rios, nas praias freqüentadas para recreação direta de pessoas. Quanto a aplicação do efluente doméstico desinfetado no cotidiano, o seu reuso pode ser utilizado na lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, reuso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados, entre outros.

O processo de seleção do desinfetante a ser utilizado deve ser dividido em algumas etapas, como obter as informações sobre os microrganismos que estão presentes na água antes de começar o do processo de desinfecção, analisar a infra-estrutura existente para auxiliar o processo de desinfecção proposto, avaliar as habilidades técnicas disponíveis, considerar as informações sobre subprodutos nocivos à saúde pública e avaliar o custo da desinfecção (REIFF e WITT, 1995).

No Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, foram desenvolvidas pesquisas destinadas para desinfecção de efluentes domésticos, sendo estas foram financiadas pelo PROSAB (Programa de Saneamento Básico) e posteriormente publicadas nos diversos meios de comunicação. Os processos estudados foram a desinfecção de efluentes domésticos tratados pela radiação UV, pelo o ozônio e o dióxido de cloro; sendo que o último desinfetante usualmente é utilizado na desinfecção de efluentes domésticos tratados por lagoas de estabilização no município de Balneário Camboriú – SC.

O dióxido de cloro é uma molécula relativamente pequena, volátil e energética. Entretanto, ele é estável em soluções diluídas, desde que abrigado da luz solar. É o mais efetivo desinfetante e o agente oxidante mais forte entre todos contendo cloro. Uma das grandes vantagens do uso está no fato de que não reage com amônia, evitando assim a formação de cloraminas potencialmente tóxicas. Além dessas vantagens o dióxido de cloro opera em doses pequenas, não favorece a formação de trihalometanos (THM), apresenta efetiva ação desinfetante sob todos os tipos de microrganismos (bactérias, protozoários e vírus) e as propriedades biocida não são influenciadas pelo pH.

O dióxido de cloro é duas vezes mais barato em relação ao sistema de implantação com o ozônio. Enquanto que a implantação do sistema de desinfecção com a radiação UV e o ozônio são os que apresentam custos relativamente altos. Desse modo houve a necessidade de

pesquisar a aplicação do dióxido de cloro em efluentes domésticos tratados pelo sistema de lodos ativados em virtude da sua eficiência durante a remoção de microrganismos patógenos e também pelo custo relativamente acessível ao usuário.

Objetivo

Este estudo pretende contribuir para avaliar a aplicação do dióxido de cloro na desinfecção de efluentes domésticos tratados através de lodos ativados utilizando bactérias do grupo coliformes como indicadores de contaminação fecal.

Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Determinar a dosagem mínima e segura de dióxido de cloro necessária para atender os padrões de lançamento de esgotos tratados em águas superficiais e seu reuso.
- Realizar um estudo econômico do custo de implantação e operação do processo de desinfecção usando o dióxido de cloro como desinfetante alternativo e compará-lo com outros processos de desinfecção de efluentes domésticos tratados para diferentes populações.
- Realizar um estudo de caso para 35.000 economias atendidas com base na dosagem mínima e segura, incluindo os custos de aquisição do gerador, de operação e manutenção do sistema de desinfecção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DESINFECÇÃO E ESTERILIZAÇÃO

A desinfecção da água consiste no seu processo de purificação por meio do emprego de um agente físico, químico ou biológico, cuja finalidade é a inativação dos microrganismos patogênicos como: (bactérias, protozoários e vírus) que são os agentes transmissores de doenças que podem infectar direta ou indiretamente, o homem. (DANIEL, 2001; LEME, 1979; BABBIT et al., 1973). Para TARRÁN (2002) e SÃO PAULO (1974) a desinfecção é um processo seletivo, isto é, que reduz a concentração de patógenos para níveis não infecciosos, assim a desinfecção atinge vários níveis de redução. Usualmente, os níveis de redução do número de microrganismos patogênicos podem ser representados pelo percentual da eficiência de remoção, pela fração remanescente ou pela escala logarítmica, segundo a Tabela 1.

TABELA 1 - As formas de representação da eficiência da desinfecção.

Eficiência de remoção	Fração remanescente	Escala logarítmica
(%)	(N/No)	(log N/No)
90 %	10^{-1}	- 1
99 %	10^{-2}	- 2
99,9 %	10^{-3}	- 3
99,99 %	10^{-4}	- 4
99,999 %	10^{-5}	- 5

Fonte: Adaptado de HOYOS (2002) e DANIEL (2001).

Ao contrário da desinfecção, a esterilização acontece quando há total eliminação de patógenos abaixo de um nível de medição especificado. A esterilização é definida como uma redução de contaminantes igual ou superior a 8 log (10^{-8} ou 99,999999%).

Para TEUNIS et al. (1997), quando a condição de saneamento é insuficiente, conseqüentemente não há um tratamento apropriado do esgoto, assim os poluentes acabam sendo eliminados e descartados junto com o esgoto no corpo d'água, e deste modo são transmitidos por meio da água contaminada, já que ela é considerada um vetor em potencial para a transmissão de doenças. Em geral, as doenças de veiculação hídrica causam fortes distúrbios gastrintestinais, tais como: vômitos, cólicas e diarreias. No Brasil as mais comuns

são a hepatite, a leptospirose, a febre tifóide e a cólera. No Quadro 1 são apresentados alguns tipos de bactérias, protozoários e vírus encontrados nas águas; o tamanho médio destes organismos; algumas características e as doenças que podem provocar no homem (MATOS, 2001).

QUADRO 1 - Os principais agentes etiológicos relacionados a doenças de veiculação hídrica.

Tipo	Tamanho	Características e efeitos
Bactérias		
	(μm)	
<i>Escherichia coli</i>	1,1-1,5x 2,0-6,0	Bacilo reto, gram-negativo, anaeróbio facultativo, pode provocar diarreia, dores abdominais.
<i>Leptospira interrogans</i>	0,1x 6,0-12	Célula em forma de hélice flexível, gram-negativo, aeróbio, causa leptospirose.
<i>Vibrio cholerae</i>	0,5-0,8x 1,4 - 2,6	Bacilo reto ou curvo, gram-negativo, anaeróbio facultativo, causa cólera.
<i>Legionella pneumophila</i>	0,3 – 0,9 x 2,0 – 20	Bacilo, gram-negativo, aeróbio, pode provocar pneumonia e febre.
Protozoários		
	(μm)	
<i>Cryptosporidium</i>	4 – 6	Resistente à cloração. Provoca gastroenterite.
<i>Giardia lamblia</i>	6 – 12	Apresenta simetria bilateral. Causa gastroenterite.
<i>Entamoeba histolytica</i>	20 – 40	Locomove-se e alimenta-se por meio de pseudópodes.
<i>Salmonella typhi</i>	0,7 - 1,5 x 2,0 - 5,0	Gram-negativo, anaeróbio facultativo, causa febre tifóide.
Vírus		
	(nm)	
Adenovírus	100	Resistente no ambiente. Provoca infecções respiratórias.
Hepatite A	22 – 30	Muito estável e resistente em meio ácido e em elevada temperatura. Provoca hepatite e gastroenterite.
Rotavírus grupo B	70	Icosaedro, estável até o pH 3,0 e relativamente resistente ao calor. Provoca gastroenterite.
Poliovírus humano 1, 2, 3	22 – 30	Doenças associadas: paralisia, meningite, febre.

Fonte: Adaptado de UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA (1993); MADIGAN, MARTINKO e PARKER¹ (apud MATOS, 2001).

¹ MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. **Brock biology of microorganisms**. 8 ed. New Jersey: Prentice Hall, 986 p. 1997 apud MATOS, B. A. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo**. 2001. 172f.. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

As bactérias são microrganismos procariontes. Algumas têm papéis importantes na natureza, como nos processos de decomposição e fermentação da matéria orgânica, enquanto outras são prejudiciais à saúde humana. Os seres procariontes são caracterizados por uma estrutura celular simples desprovidos de membrana nuclear. O envoltório celular destes organismos é formado pela membrana citoplasmática e pela parede celular. A membrana citoplasmática é uma estrutura altamente especializada, constituída de lipídeos e proteínas (MATOS, 2001).

Segundo VON SPERLING (1996a), os protozoários são seres unicelulares, constituídos por citoplasma e núcleo. Algumas variedades de protozoários patógenos são causadoras de doenças tanto ao homem como aos animais. Podem ser encontrados em ambientes aquáticos ou presentes no lodo de esgoto. O citoplasma destes microrganismos é constituído por uma camada externa mais densa, que possui função de proteção, locomoção e ingestão de alimentos, e uma camada interna que é constituída por várias organelas necessárias para a sobrevivência do organismo (PESSÔA e MARTINS, 1982).

Segundo a ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD - OMS (1979), ao contrário de outros microrganismos patógenos, os vírus não possuem a capacidade de viver e reproduzir sem a presença de uma célula hospedeira que forneça energia. São constituídos de uma molécula de ácido nucléico (DNA ou RNA), circundado por uma capa protéica.

2.1.1 Mecanismos de Desinfecção

No tratamento de água, a desinfecção é um dos primeiros métodos usado para inativação de patógenos. Segundo a POLYTECHNIC (2002) e USEPA (1999a) há três modos de ação dos desinfetantes:

- destruição da organização estrutural da célula;
- interferência no nível energético do metabolismo;
- interferência na biossíntese e no crescimento.

O mecanismo de desinfecção dos desinfetantes químicos no tratamento da água ocorre pela oxidação ou ruptura da parede celular dos microrganismos, e a difusão do desinfetante no

interior das células, com conseqüente interferência na atividade celular (MONTGOMERY² apud USEPA, 1999a).

A inativação dos microrganismos por desinfetantes físicos ocorre pela transferência de energia eletromagnética para o material genético, DNA ou RNA, por exemplo, radiação UV. Quando a radiação UV penetra na parede celular de um microrganismo, a mesma destrói a habilidade das células de se reproduzirem (USEPA, 1999b).

2.1.2 Cinética de Desinfecção

Durante muito tempo vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para descreverem a cinética de desinfecção dos microrganismos pela ação dos desinfetantes (PRETORIUS e PRETORIUS, 1999). Os principais modelos matemáticos estabelecidos na literatura são os de Chick-Watson e Hom (OXIDATION, 199?). Em 1908, Chick percebeu que o número remanescente de microrganismos (N) na água decresce com o tempo de contato com o desinfetante (t), ou seja, quanto maior o tempo de contato com o desinfetante, maior é o número de microrganismo inativados, de acordo com a equação (2.1) e posteriormente integra-se para formar a equação (2.2) substituindo os limites (N = N₀ e t = 0).

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -kN \quad (2.1)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -kt \quad (2.2)$$

onde:

N = número de organismos no tempo t (NMP/100mL)

N₀ = número de organismos no tempo t = 0 (NMP/100mL)

k = constante de decaimento (T⁻¹)

t = tempo de contato (T)

² MONTGOMERY, J. M. **Water treatment principles and design**. New York: John Wiley & Sond. 1985 apud UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Microbial and disinfection rules simultaneous compliance guidance manual**: EPA 815-R-99-015. Washington, 1999a. p. 2.1-5.23.

Segundo DANIEL (2001), para cada dose de desinfetante obtém-se um valor de k. A constante (k) poder ser obtida por análise de regressão linear, plotando e linearizando, por meios de softwares matemáticos. De acordo com a lei de Chick a reta tem declividade negativa (-k). A Figura 1 apresenta valores estimados pelo modelo de matemático de Chick, a degradação microrganismos patógenos.

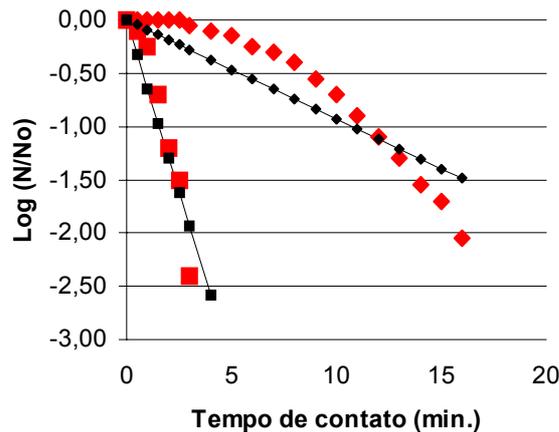


FIGURA 1 - Inativação de microrganismos em função do tempo para valores observados (♦ = 0,45; ■ = 2,64) e estimados (-♦- = 0,45; -■- = 2,64) segundo o modelo de Chick.

Fonte: Adaptado e modificado de DANIEL (2001).

Para uma reação de primeira ordem a concentração do desinfetante é constante. Em 1908, Watson verificou que a concentração do desinfetante está relacionada com a sobrevivência de microrganismos (HART e HOM, 2003; PERNITSKY, FINCH e HUCK, 1995; KEEVIL, MACKERNESS e COLBOURNE, 1990). A equação (2.3) descreve o modelo matemático de Chick-Watson.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -kC^n N \quad (2.3)$$

Substituindo os limites ($N = N_0$ e $t = 0$), considerando a concentração do desinfetante constante, ou seja, a concentração não varia com o tempo e posteriormente integra-se à equação (2.3).

$$\text{Ln} \frac{N}{N_0} = -kC^n t \quad (2.4)$$

onde:

k = constante de decaimento (T^{-1})

t = tempo de contato (T)

n = coeficiente de diluição

N = número de organismos no tempo t (NMP/100mL)

N_0 = número de organismos no tempo $t = 0$ (NMP/100mL).

O modelo proposto por Hom considera a concentração dos desinfetantes, tempo de contato e a taxa de decaimento de microrganismos (BARBEAU et al., 1999; PRETORIUS e PRETORIUS, 1999; HAAS e JOFFE; 1994). A equação (2.5) descreve o modelo matemático.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -kC^n t^{m-1} N \quad (2.5)$$

Considerando que a concentração do desinfetante é constante no tempo, integrando os limites ($N = N_0$ e $t = 0$) da equação (2.5).

$$\text{Ln} \frac{N}{N_0} = -k' t^m \quad (2.6)$$

Sendo: $k' = kC^n$

k' = constante de decaimento de Hom (T^{-1})

t = tempo de contato (T)

n = coeficiente de diluição

m = constante empírica

N = número de organismos no tempo t (NMP/100mL)

N_0 = número de organismos no tempo $t = 0$ (NMP/100mL)

PRETORIUS e PRETORIUS (1999), citam que as constantes (m e k') e o coeficiente (n) para o modelo de decaimento de Hom são obtidas por regressão múltipla a partir dos resultados experimentais com o auxílio de softwares matemáticos. Plotando os valores obtidos a partir dos resultados experimentais e dos resultados estimados pela equação (2.6) pode-se obter a Figura 2.

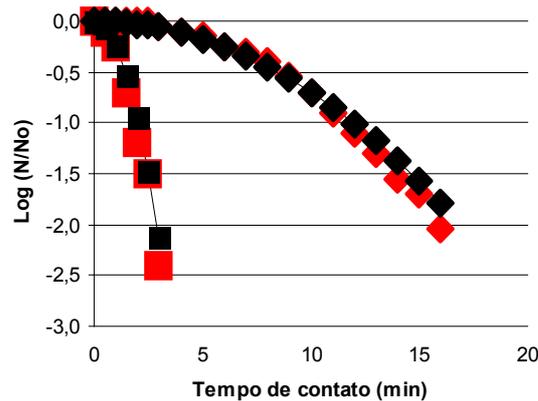


FIGURA 2 - Inativação de microrganismos em função do tempo para valores observados ($\blacklozenge = 0,45$; $\blacksquare = 2,64$) e estimados ($-\blacklozenge = 0,45$; $-\blacksquare = 2,64$) segundo o modelo de Hom.

Fonte: Adaptado e modificado de DANIEL (2001).

2.2 SELEÇÃO DO PROCESSO DE DESINFECÇÃO

Segundo REIFF e WITT (1995), a escolha do processo de desinfecção pode ser dividida em uma série de etapas:

- Primeira etapa: Consiste verificar se o desinfetante será eficaz contra possíveis microrganismos patogênicos. Para que ocorra inativação dos microrganismos é necessário ter as informações sobre esses microrganismos que estão presentes na água antes de começar o do processo de desinfecção. Por exemplo, os protozoários são microrganismos resistentes à ação do cloro, entretanto no uso de desinfetantes mais potentes como o ozônio, o fator Ct será inferior ao do cloro.

- Segunda etapa: Consiste em verificar se o desinfetante produzirá um residual eficaz. Caso o desinfetante químico ou físico não deixe residual adequado deve-se agregar preferencialmente desinfetantes clorados.
- Terceira etapa: Consiste em determinar os parâmetros físico-químicos (pH, temperatura e turbidez) da água a ser desinfetada e verificar se são compatíveis com as características físico-químicas do desinfetante. Este passo requer uma ampla compreensão dos fatores limitantes de cada desinfetante, suas características e variações no meio.
- Quarta etapa: Consiste na análise da infra-estrutura existente para auxiliar o processo de desinfecção proposto. A estimação desta etapa é mais complicada e difícil, pois os serviços de apoio técnico e logístico dos equipamentos, dos fornecedores de produtos químicos, além também do sistema de transporte dependem basicamente da organização política e administrativa de todas as pessoas envolvidas.
- Quinta etapa: Consiste em avaliar as habilidades técnicas disponíveis e verificar se estão adequadas para cumprir com os requisitos de operação e manutenção. Nesta etapa é importante dar o treinamento necessário para os operadores e administradores da estação de tratamento de água e esgoto de maneira acessível para que o trabalho seja realizado com sucesso.
- Sexta etapa: Consiste em considerar as informações sobre subprodutos nocivos à saúde pública. Avaliar se as concentrações dos subprodutos estão abaixo das condições mínimas exigidas. Caso as concentrações estejam acima, verificar os valores excedentes em relação às normas nacionais e internacionais.
- Sétima etapa: Consiste em avaliar o custo da desinfecção. Verificar se a relação custo/benefício é favorável ao usuário com a equiparação de todas as formas de desinfecção existentes e com a escolha da mais eficiente.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DESINFECÇÃO

Alguns fatores são determinantes durante a desinfecção. Podemos destacar:

2.3.1 Tempo de Contato

O tempo de contato é um dos parâmetros importantes durante a desinfecção, pois quanto maior o tempo de contato, maior é a destruição dos microrganismos, CHICK³ (apud METCALF e EDDY, 1991).

2.3.2 Concentração e Tipo de Agentes Químicos

Dependendo das condições específicas de operação e do tipo de agente químico que está sendo utilizado, a eficiência de qualquer desinfetante está relacionada com a concentração, e em alguns casos, o aumento da concentração do desinfetante resulta numa redução do tempo de contato com o efluente. Para cada tipo de agentes químicos é possível comparar a eficiência pelo fator Ct , pois quanto menor for o fator Ct , maior será a ação do desinfetante. O efeito da concentração do desinfetante pode ser observado pela equação (2.7).

$$C^n t = K' \quad (2.7)$$

onde:

C = concentração final (ML^{-3})

n = coeficiente de diluição

t = tempo de contato (T)

K' = coeficiente de eficiência do desinfetante

Portanto, os melhores desinfetantes químicos podem alcançar a mais eficiente desinfecção pelo menor produto da concentração do desinfetante com o tempo de contato (Ct). Os valores de Ct ($mg \cdot min/L$) estão em função de desinfetantes diferentes, de

³ CHICK, H. **Journal of Hygiene**, v. 8, p. 92-157, 1908 apud METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 920 p.

temperaturas e de pH. A Tabela 2 apresenta os valores Ct para vários microrganismos pela ação de diferentes desinfetantes.

TABELA 2 - Intervalos Ct de produtos na inativação de vários microrganismos.

Microrganismo	Cloro livre (pH 6-7)	Cloraminas (pH 8-9)	Dióxido de cloro (pH 6-7)	Ozônio (pH 6-7)
<i>Escherichia coli</i>	0,034-0,05	95-180	0,4-0,75	0,02
Polivírus 1	1,1-2,5	768-3740	0,2-6,7	0,1-0,2
Rotavírus	0,01-0,05	3806-6476	0,2-2,1	0,006-0,06
Cistos de <i>Giardia lamblia</i>	47-150	2200 ^a	26 ^a	0,5-0,6
Cistos de <i>Giardia muris</i>	30-630	1400	7,2-18,5	1,8-2,0
<i>Cryptosporidium parvum</i>	7200 ^b	7200 ^b	78 ^b	5-10 ^b

Fonte: Adaptação de HOFF⁴ (apud LANGLAIS, RECKHOW e BRINK, 1991).

^a inativação de 99,9% (pH = 6-9)

^b inativação de 99% (pH = 7 e temperatura = 25°C)

2.3.3 Intensidade e Natureza do Agente Físico

Os agentes físicos são o calor e a luz UV. Considerando-se que a taxa de inativação dos microrganismos é uma reação de primeira ordem em relação ao número de microrganismos degradados, a equação (2.8) é aplicada somente nas situações em que se pode considerar desprezível a matéria suspensa, ou seja, não haja turbidez onde a população de microrganismos é homogênea. (Di BERNARDO, 1993).

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -k_i \cdot \frac{I}{A} \cdot N \quad (2.8)$$

Considerando que a concentração de desinfetante é constante no tempo, integrando os limites ($N = N_0$ e $t = 0$) da equação (2.8).

⁴ HOFF, J. C. Strengths and weaknesses of using Ct values to evaluate disinfection practice. In: AWWA SEMINAR, ASSURANCE OF ADEQUATE DISINFECTION, OR Ct OR NOT Ct , 1987, Denver. **Proceedings...** Denver: American Water Works Assn., 1987. p. 49-65 apud LANGLAIS, Bruno; RECKHOW, Davis A.; BRINK, Deborah R. **Ozone in water treatment: application and engineering**. Michigan: Lewis Publishers, 1991. 298 p.

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k_{uv} \cdot \frac{I \cdot t}{A} \quad (2.9)$$

onde:

k_{uv} = constante de decaimento para radiação UV ($\text{cm}^2/\mu\text{W s}$)

I = intensidade da radiação UV (μW)

A = área (L^2)

t = tempo de contato (T)

N = número de organismos no tempo t (NMP/100mL)

N_0 = número de organismos no tempo $t = 0$ (NMP/100mL)

2.3.4 Temperatura

O efeito da temperatura na desinfecção dos microrganismos patógenos pode ser descrito pela equação (2.10) de van't Hoff-Arrhenius. O aumento da temperatura resulta na inativação das enzimas com a quebra na cadeia protéica (LI et al., 2001; RUFFELL, RENNECKER e MARIÑAS, 2000).

$$k_T = A' e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (2.10)$$

onde:

k_T = constante de reação de van't Hoff-Arrhenius

A' = fator de frequência

E_a = energia de ativação (J/mol)

R = constante universal dos gases (8,31 J/mol K)

T_a = temperatura absoluta (K)

A energia de ativação pode ser estimada por diferentes temperaturas (T_{a1} e T_{a2}) usando a equação (2.10).

$$\frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = e^{\left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T_{a1}} \right) \right]} \quad (2.11)$$

onde:

k_{T_2} = constante de reação para a temperatura 2

k_{T_1} = constante de reação para a temperatura 1

E_a = energia de ativação (J/mol)

R = constante universal dos gases (8,31 J/mol K)

T_{a2} = temperatura absoluta para a constante de reação k_{T_2} (K)

T_{a1} = temperatura absoluta para a constante de reação k_{T_1} (K)

2.3.5 Número de Microrganismos

A atividade antimicrobiana está diretamente relacionada com o número de microrganismos presentes. Quanto maior a carga microbiana, maior o tempo de exposição necessário do desinfetante para destruí-la, portanto, o processo de desinfecção é influenciado pelo número de microrganismos presentes nos esgotos. Sendo assim, quanto maior for o número de microrganismos presentes no meio, maior será o tempo de contato com o desinfetante (MARTINS, MAZZOLA e PENNA, 2001; METCALF e EDDY, 1991).

2.3.6 Tipos de Microrganismos

A natureza das condições dos microrganismos influencia na atividade do desinfetante, pois as células das bactérias em crescimento são menos resistentes, esporos de bactérias apresentam resistência durante o processo de desinfecção. Alguns microrganismos são mais resistentes que outros devido à sua estrutura celular. Por exemplo, os protozoários são menos resistentes durante a desinfecção do que as bactérias, devido à complexidade da estrutura da membrana celular.

2.3.7 Natureza da Matéria Orgânica Presente

A matéria orgânica em diversas formas interfere na ação dos agentes desinfetantes, mais comumente ocorre uma ação entre os compostos altamente ativos e o material orgânico,

resultando num complexo menos ativo e deixando uma menor quantidade do agente desinfetante disponível para atacar os microrganismos.

Esta redução é notadamente observada com os compostos altamente ativos como o cloro. Por isso o material orgânico pode proteger os microrganismos da ação do desinfetante, funcionando como uma barreira física. A redução da carga da matéria orgânica previamente à desinfecção é desejável, com o objetivo de minimizar a interferência descrita (MARTINS, MAZZOLA e PENNA, 2001).

2.4 MÉTODOS DE DESINFECÇÃO

2.4.1 Desinfecção por Agentes Físicos

2.4.1.1 Calor e radiação ultravioleta

O calor e a luz UV são denominados agentes físicos ou desinfetantes físicos. O aquecimento da água ao ar livre a uma temperatura de 100°C, ao nível do mar, deve ser feito durante 10 a 15 minutos, sendo este tempo suficiente para a destruição de todos os microrganismos patógenos (MOTA, 1997; DACACH, 1990).

A luz ultravioleta é produzida pelo resultado do fluxo de corrente por meio do vapor de mercúrio entre os eletrodos da lâmpada. As lâmpadas de baixa pressão de mercúrio produzem a maioria dos raios com comprimento de onda de 253,7 nm. Esse comprimento de onda é muito próximo do comprimento de onda de 260 a 265 nm, que é eficiente para matar microrganismos.

As lâmpadas mais usadas de baixa pressão de vapor de mercúrio têm comprimento de onda de 253,7 nm. Portanto, a faixa do UV-C é a mais apropriada para eliminação de microrganismos. A faixa de UV vácuo (UV-V), especificadamente com comprimento de onda de 185 nm, é própria para a produção de ozônio (O₃).

A principal diferença entre a lâmpada germicida e a fluorescente é que a germicida é construída com quartzo, ao passo que a fluorescente é com vidro, com camada interna de fósforo que converte a luz UV para luz visível. As colisões entre os elétrons e os átomos de

mercúrio provocam as emissões de radiação ultravioleta que não são visíveis ao olho humano. Quando esses raios colidem com o fósforo, eles “fluorescem” e se convertem em luz visível. O tubo de quartzo transmite 93% dos raios UV da lâmpada ao passo que vidro emite muito pouco (TARRÁN, 2002).

2.4.1.1.1 Cinética da desinfecção por radiação UV

A efetividade da desinfecção será proporcional à intensidade da luz e o tempo de contato, e inversamente proporcional à distância da fonte de ultravioleta. O tempo mínimo de contato será da ordem de 1 a 5 segundos, e se mostra efetivo na eliminação das bactérias (CUNHA, 1991).

Na desinfecção com radiação UV, a dosagem é definida como sendo o produto da intensidade de energia pelo tempo de contato (MIRÓN e ORTEGA, 2002). A equação (2.12) a seguir representa como é calculada a dosagem de UV.

$$D_i = \frac{I \cdot t}{A} \quad (2.12)$$

onde:

D_i = Dose de radiação ultravioleta ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$)

I = Intensidade da radiação (μW)

t = Tempo de exposição (T).

A = área de radiação (L^2)

Para uma reação de primeira ordem e considerando a concentração do desinfetante constante, segue-se a equação anterior (2.9) proveniente da lei de Chick-Watson:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k_{uv} \cdot \frac{I \cdot t}{A} \quad (2.9)$$

onde:

k_{uv} = constante de decaimento para radiação UV ($\text{cm}^2/\mu\text{W s}$)

I = intensidade da radiação UV (μW)

t = tempo de contato (T)

A = área (L^2)

Na Tabela 3 são apresentados os valores das constantes de decaimento à UV de algumas bactérias, obtidas por PIRES⁵ et al. (apud AGUIAR et al., 2002) em experimentos com lâmpadas de baixa pressão (emissão de radiação UV a 254 nm).

TABELA 3 - Constantes de inativação de alguns microrganismos

Microrganismo	k ($\text{cm}^2/\mu\text{Ws}$)
<i>Escherichia coli</i>	$2,50 \times 10^{-3}$
<i>Streptococcus faecalis</i>	$1,23 \times 10^{-3}$
<i>Vibrio cholerae</i>	$2,07 \times 10^{-3}$

Fonte: PIRES et al. (apud AGUIAR et al., 2002).

Pesquisas realizadas por LIBERTI, NOTARNICOLA e PETRUZZELLI (2002), mostram que aplicações de 100 e 160 mWs/cm^2 em média, para uma vazão de 100 m^3/h , são suficientes para uma efetiva remoção de cistos de *Giardia lamblia* e oocistos *Cryptosporidium parvum*, em volta de 60 e 65% respectivamente. NICK⁶, apud LIBERTI, NOTARNICOLA e PETRUZZELLI (2002), indica altas doses de UV ($>1000 \text{ mWs/cm}^2$) para degradação de pesticidas e outros compostos específicos de efluentes industriais.

OLIVEIRA (2003), os ensaios de desinfecção em efluentes domésticos tratados pelo sistema de lodos ativados com dose de 30mJ/cm^2 alcançou uma qualidade microbiológica que permite sua utilização em irrigação irrestrita de acordo com as recomendações da OMS.

⁵ PIRES, M. R. et al. Desinfecção de água com radiação ultravioleta: eficiência bactericida. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 57, n. 1, p. 29-34, 1998 apud AGUIAR, A. M. et al. Avaliação do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de águas com turbidez e cor moderadas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 37-47, 2002.

⁶ NICK, K. et al. Degradation of some triazine herbicides by UV radiation such as used in the UV disinfection of drinking water. **Journal Water SRT-AQUA**, v. 41, n. 2, p.82, 1992 apud LIBERTI, L.; NOTARNICOLA, M.; PETRUZZELLI, D. Advanced treatment for municipal waste water reuse in agriculture. UV disinfection: parasite removal and by-production. **Desalination**, v. 152, n. 1-3, p. 315-324, 2002.

2.4.1.1.2 Mecanismos de desinfecção pela radiação UV

O alvo principal da desinfecção por luz ultravioleta é o material genético, o ácido nucléico. A molécula de ácido desoxirribonucléico (DNA) armazena informações genéticas que permitem a reprodução de seres vivos (LEHNINGER, NELSON e COX, 2002).

As moléculas de DNA e RNA são polinucleotídeos, espécies poliméricas construídas com unidades de nucleotídeos. A própria molécula de DNA é uma dupla hélice na qual dois longos cordões de ácido nucléico estão enrolados um ao redor do outro. A capacidade de replicação do DNA resulta da estrutura de dupla hélice. Há duas ligações de hidrogênio, adenina com a timina e três ligações de hidrogênio entre guanina e a citosina; ao longo da hélice, os pares de bases são sempre AT (adenina-timina) e GC (guanina-citosina).

O efeito do UV na desinfecção se deve à elevada absorção da radiação pelo DNA da bactéria em 254 nm (VON SONNTAG⁷ apud ACHER, 1997) resultando na formação do dímero timina no qual inibe a reprodução das células das bactérias. Se a dose de UV não reagir de forma letal, pelos processos enzimáticos, as células das bactérias serão capazes de reorganizar a estrutura do DNA. O mecanismo da desinfecção UV está representado na Figura 3.

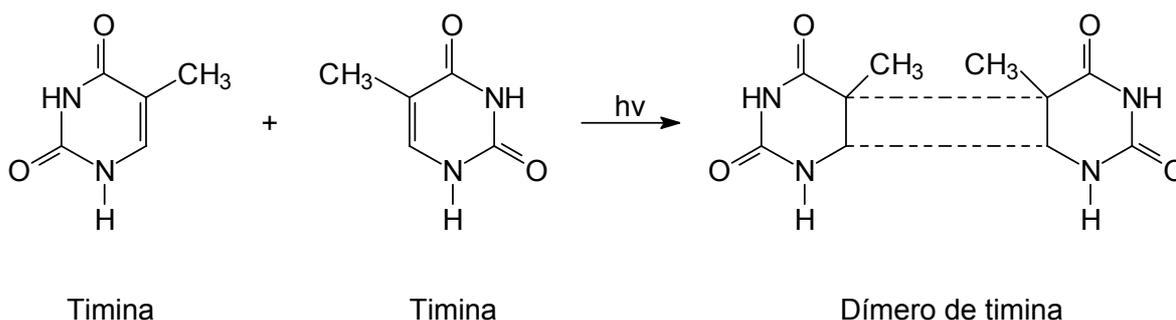


FIGURA 3 - Dimerização fotoquímica de duas bases nitrogenadas

Fonte: DANIEL (2001).

⁷ VON SONNTAG, C. Disinfection by UV-radiation. In: ____. **Processes for Water Treatment**. Koeln: Plenum Publishing Corporation, 1988 apud ACHER, A.; FISCHER, E.; TURNHEIM, R.; MANOR, Y.. Ecologically friendly wastewater disinfection techniques. **Water Research**, v. 31, n. 6, pp. 1398-1404, 1997.

2.4.1.1.3 Vantagens e desvantagens do processo

Como agente físico no processo de desinfecção a radiação ultravioleta apresenta algumas vantagens e desvantagens (CIENFUEGOS e VAITSMAN, 2000).

As vantagens são:

- baixo uso de energia;
- não requer transporte e armazenamento de produtos químicos;
- não forma subprodutos;
- processo de fácil operacionalização.

As desvantagens são:

- não possui efeito residual;
- efeito limitado sobre outros contaminantes;
- sólidos suspensos e a turbidez interferem na eficácia da desinfecção;
- destruição limitada de microrganismos e vírus (254 nm);
- técnica de polimento apenas pode ser prejudicada se a concentração de orgânicos na água de alimentação for muito alta.

2.4.2 Desinfecção por Agentes Químicos

2.4.2.1 Ozônio

O ozônio tem sido usado como desinfetante há mais de 80 anos na cidade de Nice, embora sua ação germicida tenha sido evidenciada na França desde o final do século XIX (DI BERNARDO, 1993). Para a desinfecção de esgotos tratados, no entanto, só é recomendada para efluentes terciários já nitrificados ou filtrados, uma vez que o ozônio (O₃) é um oxidante muito forte, cuja dosagem de aplicação depende das características do efluente (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

O ozônio é quimicamente instável, não podendo ser transportado ou armazenado, tornando-se necessário sua geração “*in situ*” (KUNZ et al., 1999; METCALF e EDDY, 1991).

Segundo URRUCHI et al. (2001), o ozônio é gerado por processos que têm como princípio a descarga elétrica por barreira dielétrica na entrada do reator, na qual o ar ou o oxigênio é transportado. Este é o método mais usado na maioria dos geradores de ozônio, conhecido como efeito corona (Figura 4).

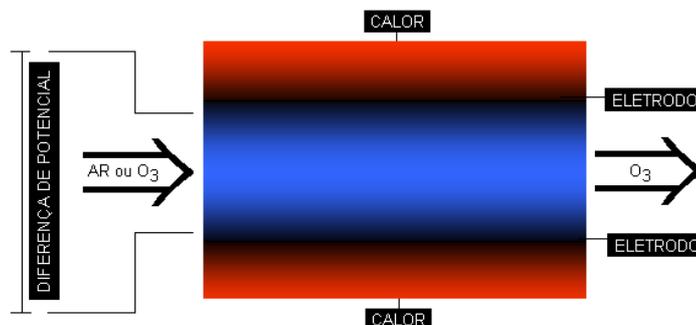


FIGURA 4 - Esquema da geração do ozônio pelo efeito corona.

Fonte: Adaptado de LIN e YEH (1993) e NOTTINGHAM (2003).

2.4.2.1.1 Mecanismo de reação do ozônio

A Figura 5 mostra que dois mecanismos de reação do ozônio podem ocorrer de maneira direta ou indireta (MASTEN e DAVIES, 1994).

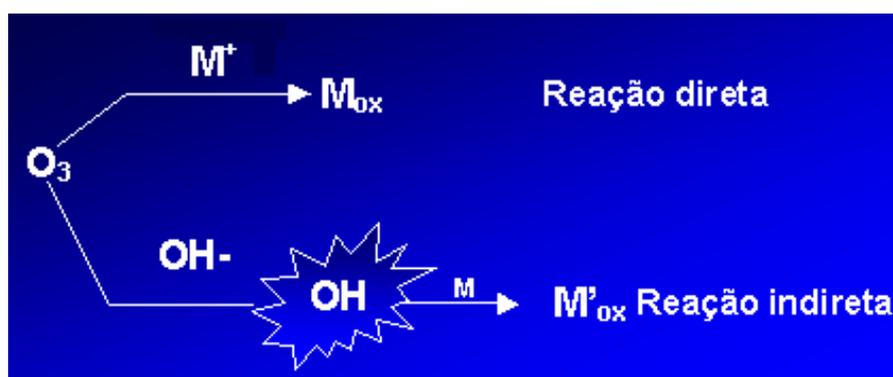
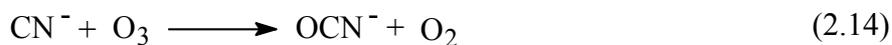
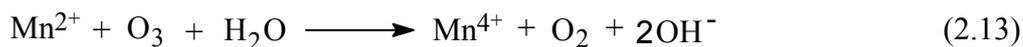


FIGURA 5 - Oxidação de substratos durante a aplicação do ozônio em água.

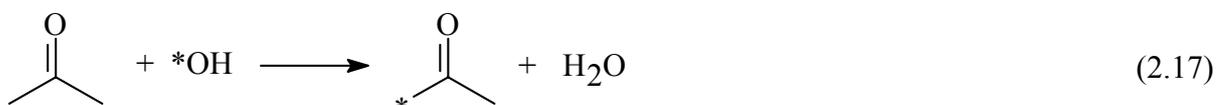
Fonte: Adaptado de LANGLAIS, RECKHOW e BRINK (1991).

Segundo e Di BERNARDO (1993) e GAY (1989), a oxidação direta ocorre quando a molécula de ozônio reage diretamente com o substrato, estes podem ser compostos orgânicos ou inorgânicos, de acordo com as reações (2.13, 2.14 e 2.15).



O ataque pela ação da molécula de ozônio pode ocorrer em átomos que carregam cargas negativas ou as duplas ou triplas ligações, sendo por exemplo: carbono-carbono, carbono-nitrogênio e nitrogênio-nitrogênio (LIN e YEAH, 1993).

A oxidação indireta, denominada como processo oxidativo avançado (POA), o ozônio decompõe-se na água por meio de mecanismos complexos que envolvem a geração de radicais livres. A reação do radical hidroxila com o substrato pode ser classificada por meio de três mecanismos de reação: adição de hidroxila, retirada de hidrogênio e transferência de elétrons (DANIEL, 2001; CALVOSA et al., 1991). As reações do radical hidroxila são representadas segundo as respectivas reações (2.16, 2.17 e 2.18).



2.4.2.1.2 Aplicações em efluentes domésticos

Estudos de URRUCHI et al. (2001) demonstram que o ozônio foi capaz de eliminar por completo a colônia bacteriana, qualquer que seja a sua toxicidade e resistência em esgotos domésticos. Uma dose de 6 mg O₃/L mostrou-se suficiente para a esterilização completa de

qualquer das soluções contendo a monocultura de microrganismos do (*Enterococcus*, *Bacillus cereus*, etc.).

BASSANI et al. (2003), que estudou a dosagem da aplicação do ozônio em sistema de lodos ativados concluiu que os resultados obtidos demonstraram que uma dosagem de 4,1 mg/L de O₃, em ensaios contínuos com o misturador estático, é suficiente para obter-se um efluente com concentração de *E. coli* com uma eficiência de 3,22 log, sobrevivendo aproximadamente 0,06%, no final do processo (Figura 6). No entanto a ozonização revelou-se pouco eficiente na remoção de ovos de *Ascaris lumbricoides*, mesmo considerando uma dosagem de 20 mg/L de O₃ aplicada em sistema de batelada.

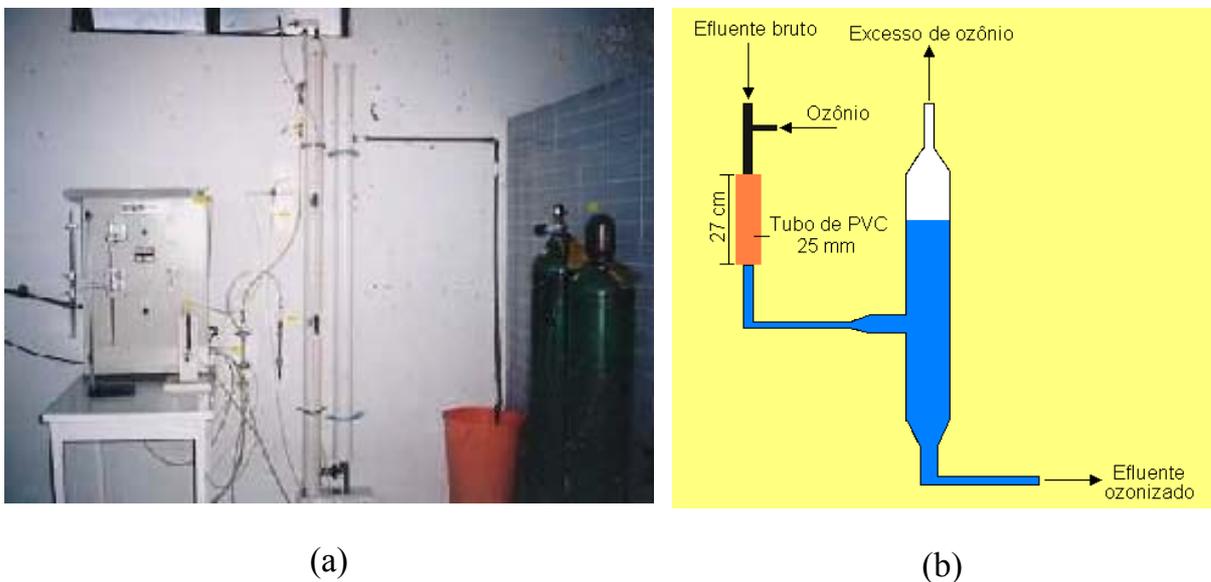


FIGURA 6 - Esquema do sistema de ozonização em contínuo (a) e (b).

Fonte: LAPOLLI (2002) e HASSEMER (2000).

2.4.2.1.3 Vantagens e desvantagens do processo

Como agente químico no processo de desinfecção o ozônio apresenta algumas vantagens e desvantagens (MAY e SAHGAL, 1989).

As vantagens são:

- o ozônio é um agente oxidante mais forte do que o cloro;
- mata bactérias mais rapidamente do que o cloro e também destrói vírus;
- a ação do ozônio é menos sensível ao pH em relação ao cloro;
- as cinéticas de oxidação de ozônio são frequentemente rápidas e não impõem limitações no tratamento de água;
- o ozônio pode eliminar odores e oxida a matéria orgânica;
- as algas após o tratamento com o cloro crescem com o tempo, porém o ozônio controla o crescimento das algas pelo mecanismo indireto (oxidação dos nutrientes).

As desvantagens são:

- o seu transporte é potencialmente perigoso;
- a sua ação de oxidação não é seletiva;
- possui um tempo de decomposição curto;
- o custo da aquisição do gerador é relativamente alto;
- o consumo de energia é alto;
- é explosivo quando concentrado (como um líquido ou gás).

2.4.2.2 Cloro

O cloro foi descoberto em 1808 por Sir Humprey Davy e teve suas propriedades bactericidas demonstradas sob condições de laboratório pelo bacteriologista Koch, em 1881. O uso do cloro foi aprovado pela American Public Health Association (APHA), em 1886, para uso como desinfetante. A partir do início do século XIX, algumas regiões dos Estados Unidos já utilizavam este agente químico no processo de desinfecção das águas para abastecimento público (CHAMBERS⁸ apud MACÊDO e BARRA, 2003). Algumas de suas principais propriedades físico-químicas estão na Tabela 4.

⁸ CHAMBERS, C. W. A procedure for evaluating the efficiency of bactericidal agents. **Journal Milk Food Technology**, v. 19, n. 17, p. 183 – 187, 1956 apud MACÊDO, Jorge Antônio Barros de; BARRA, Marcelo Macedo. **Information of the disinfection process for the use of having flowed chlorinated, in function of the pH**. Disponível em: <jmacedo@fbio.ufjf.Br> em: 15 janeiro 2003

TABELA 4 – Principais propriedades físico-químicas do cloro.

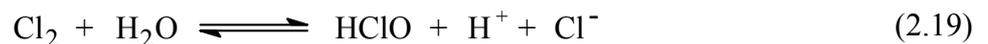
Propriedades	Características
Peso atômico	35,43
Peso molecular	70,91
Ponto de ebulição	- 34,6°C
Ponto de fusão	- 101°C
Densidade a 0°C em 1 atm	3,21 g/L
Solubilidade em água a 0°C em 1 atm	14,6 g/L

Fonte: Adaptado de WINDER (2001) e Di BERNARDO (1993).

Os derivados clorados mais comuns para o tratamento da água e esgoto que têm sido aplicados são: cloro líquido ou gasoso, hipoclorito de cálcio e hipoclorito de sódio.

2.4.2.2.1 Reações químicas de compostos clorados

O gás cloro é hidrolisado na água para formar o ácido hipocloroso (HClO) isso em poucos de décimos de segundo (USEPA,1999c; BRAGHETTA et al.,1997). A formação deste ácido conseqüentemente reduz o valor do pH da solução. A reação de hidrólise é apresentada na reação (2.19).



A constante de hidrólise (Kh) é representada em função da concentração dos produtos da reação pela expressão (2.20).

$$K_h = \frac{[\text{HClO}][\text{H}^+][\text{Cl}^-]}{[\text{Cl}_2]} \quad (2.20)$$

onde:

[HClO] = concentração de HClO em mol/L existentes na água

[H⁺] = concentração de H⁺ em mol/L existentes na água

[Cl⁻] = Concentração de Cl⁻ em mol/L existentes na água

[Cl₂] = concentração de Cl₂ em mol/L existentes na água

O ácido hipocloroso (HClO) por ser um ácido fraco sofre dissociação parcial em solução aquosa para formar o íon hipoclorito (OCl⁻) como apresenta a equação (2.21).



A quantidade de HClO e OCl⁻ que está presente na água é chamada de cloro residual livre (CRL). Segundo SOUTHWEST BIOTECHNOLOGY AND INFORMATICS CENTER - SWBIC (2001), a relação entre as duas espécies (HClO E OCl⁻) é muito importante porque a eficiência do HClO é aproximadamente 80 vezes mais efetivo do que o OCl⁻ para a desinfecção, pois as cargas negativas das células microbianas repelem-se com as cargas do íon hipoclorito. O tratamento da água utilizando como agente químico, o cloro, deve ser feito com valores baixos de pH (Figura 7).

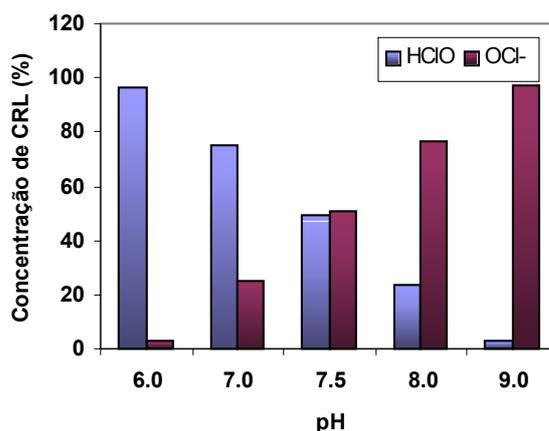
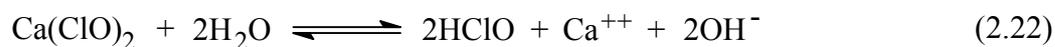


FIGURA 7 – Concentração de cloro residual livre disponível em função do pH.

Fonte: Adaptado e modificado de SILVA et al. (2003).

O hipoclorito de cálcio [Ca(ClO)₂] pode ser adquirido na forma sólida com concentrações de 20, 35, 65 e 70% de cloro disponível (REIFF e WITT, 1995). A reação de hidrólise do hipoclorito de cálcio na água é representada pela equação (2.22).

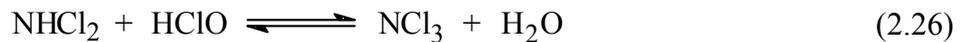
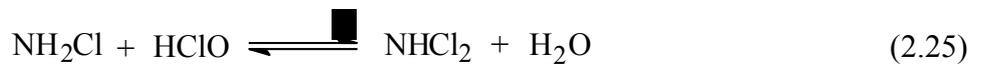
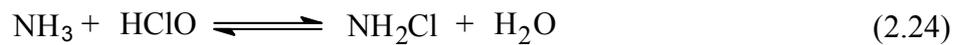


O hipoclorito de sódio comercial (NaClO) é uma solução que se pode obter em concentrações de 1 a 10%, na forma líquida; já concentrações maiores do que 10% são

instáveis. As soluções comerciais de hipoclorito de sódio podem ser apropriadas, especificadamente, para lavar roupa e para limpeza doméstica em geral. Supostamente podem conter substâncias tóxicas. Em alguns casos usa-se para a desinfecção da água para consumo humano (REIFF e WITT,1995). A reação de hidrólise do hipoclorito de sódio (NaClO) na água é apresentada pela equação (2.23).



No caso de águas onde estejam presentes compostos amoniacais ou amônia, quando adiciona-se um derivado de clorado ativo formam-se compostos denominados cloraminas ou cloro residual combinado (CRC). As cloraminas provenientes das reações entre o ácido hipocloroso (HClO) e a amônia, são classificadas em monocloraminas (NH_2Cl), dicloraminas (NHCl_2) e tricloraminas (NCl_3) de acordo com as equações:



O cloro residual total (CRT) representa a soma das concentrações (CRL) e (CRC), como mostra a Figura (8).

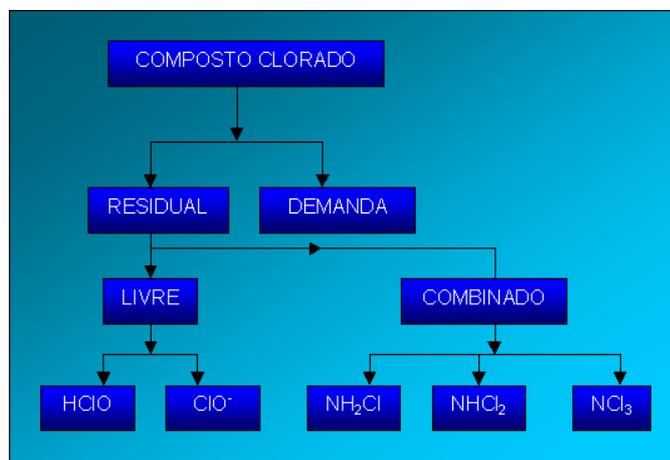


FIGURA 8 – Adição de derivados clorados em água.

Fonte: Adaptado e modificado de MACÊDO (2001).

2.4.2.2.2 Fatores que influem na eficácia da desinfecção com cloro

Para ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD – OPS e ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD – OMS (1999) a eficácia da desinfecção com o cloro dependerá de uma série de parâmetros técnicos descrito na Tabela 5 .

TABELA 5 - Parâmetros técnicos que influem na eficácia da desinfecção com o cloro.

Parâmetros	Características
Turbidez	< 0,5 NTU
pH	< 8,0
Tempo de residência	> 30 min.
Cloro residual livre	> 0,5 mg/L

Fonte: Adaptado de OPS e OMS (1999).

É necessário que o tratamento anterior a desinfecção produza uma água cuja turbidez média não exceda de 1 NTU e em nenhum caso uma amostra pode apresentar turbidez superior a 5 NTU.

O efeito do desinfetante cloro não é imediato. Requer um tempo de contato mínimo de 30 minutos entre a água e o desinfetante antes de seu consumo. A temperatura da água desempenha um papel importante na ação do desinfetante cloro. Em geral, temperaturas mantidas (>20°C), a inativação de cistos de *Giardia* ocorre em concentrações de CRL a 1,5 mg/L durante 10 minutos, enquanto que cistos de *Cryptosporidium* são extremamente resistentes ao cloro. Estudos realizados indicam que a exposição de cistos a 80 mg/L de CRL a 25°C durante 90 minutos produz uma inativação de 99% dos mesmos (KEBABJIAN⁹ apud CAMPOS e QUIROZ, 2003).

2.4.2.2.3 Vantagens e desvantagens do processo

Como agente químico no processo de desinfecção o cloro apresenta algumas vantagens e desvantagens (AQUASTEL, 2003).

⁹ KEBABJIAN, R. S. Disinfection of public pools and management of fecal accidents. **Journal of Environmental Health**, v. 58, p. 8 – 12, 1995 apud CAMPOS, N. C.; QUIROZ, C. C. Riesgos microbiológicos asociados al uso de piscinas públicas. **Agua Latinoamérica**, v. 3, n. 2, p. 16 – 20, 2003.

As vantagens são:

- é um eficiente oxidante e desinfetante;
- é eficiente na eliminação de gosto e odores;
- possui efeito residual;
- Facilita remoção de ferro e magnésio da água por meio de sua rápida oxidação e formação de óxidos precipitados;
- decompõe sulfeto de hidrogênio, cianetos e compostos nitrogenados;
- é econômico.

As desvantagens são:

- exige condições rigorosas para transporte e armazenamento;
- oferece risco para saúde no caso de vazamento;
- é inofensivo contra cistos de (*Giardia e Cryptosporidium*);
- apresenta a formação de subprodutos de desinfecção, tais como os trihalometanos.

2.4.2.3 Dióxido de cloro

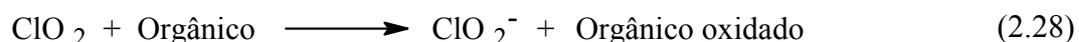
O dióxido de cloro foi aplicado pela primeira vez no tratamento da água nos Estados Unidos em 1940. Primeiramente, ele foi usado no controle do sabor e do odor, na oxidação do ferro, magnésio, fenóis, clorofenóis, cianetos e também da matéria orgânica (PARGA, SHUKLA e PEDROZA, 2003; WATANABE et al., 1997; DIETRICH et al., 1992; KNOCKE et al., 1991). O dióxido de cloro é o mais efetivo desinfetante e o agente oxidante mais forte entre todos contendo cloro (AQUASTEL, 2003). Uma das grandes vantagens do uso de dióxido de cloro (ClO_2) está no fato de que ele não reage com amônia, evitando assim a formação de cloraminas potencialmente tóxicas. Também é um agente que elimina os precursores dos trihalometanos (THM), que são compostos cancerígenos, tóxicos ao meio ambiente.

O dióxido de cloro é uma molécula relativamente pequena, volátil e altamente energética. Em altas concentrações reage violentamente com agentes redutores. Entretanto, ele é estável em soluções diluídas, desde que abrigado da luz solar. (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA, 1990). Para BRUSA et al. (1996) e VAIDA, GOUDJIL

e FLANDERS (1994), a presença da radiação UV ou da luz visível causam a foto decomposição do dióxido de cloro, segundo a reação (2.27) abaixo:



Para GANIEV et al. (1999), STUMM e MORGAN (1995) e KUN et al. (1998), o dióxido de cloro é um oxidante altamente seletivo, reduzindo-se a clorito (ClO_2^-), segundo a reação (2.28):



2.4.2.3.1 Produção do dióxido de cloro

O dióxido de cloro é uma molécula gasosa com uma ligação de cloro e oxigênio que não pode ser liquefeito por motivos físico-químicos. Por este motivo é produzido no local de utilização. Segundo Di BERNARDO (1993), em estações de tratamento de água ou de esgoto o dióxido de cloro (ClO_2) é produzido num reator a partir da solução de clorito de sódio (NaClO_2). A produção pode ser representada a partir do ácido clorídrico e do gás cloro conforme a Figura 9.

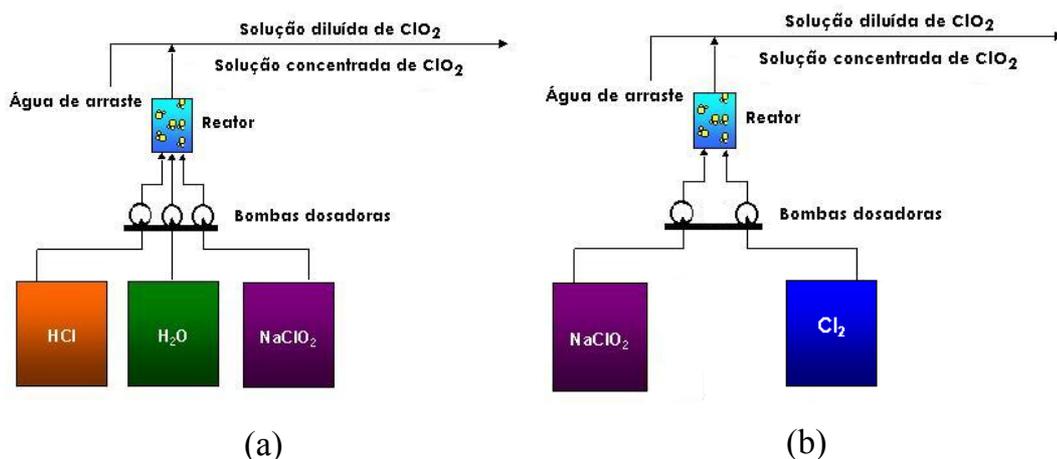
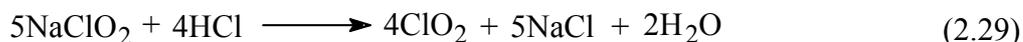


FIGURA 9 – Produção de dióxido de cloro a partir do ácido clorídrico (a) e do gás cloro (b).

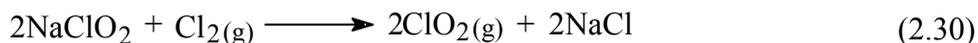
Fonte: Adaptado e modificado de BI-O-CHLOR (1998).

As reações envolvidas no interior do reator podem ser realizadas da seguinte forma:

- Produção de dióxido de cloro via ácido clorídrico:



- Produção de dióxido de cloro via gás cloro:



2.4.2.3.2 Fatores que afetam a eficiência da desinfecção com o dióxido de cloro

a) Influência de vários níveis do pH

Para se observar a influência de vários valores do pH dos desinfetantes em efluentes domésticos foi adicionada uma solução de ácido em um volume pré-determinado. O resultado está representado na Figura 10. Como pode ser visto, a influência do pH durante a desinfecção com o dióxido de cloro, é baixa. Uma faixa do pH entre 3,0 e 9,0 não interfere durante a ação do ClO_2 em bactérias. Porém, em condições próximas do neutro o cloro dissolvido é mais efetivo durante a inativação de bactérias (JUNLI, et al., 1997).

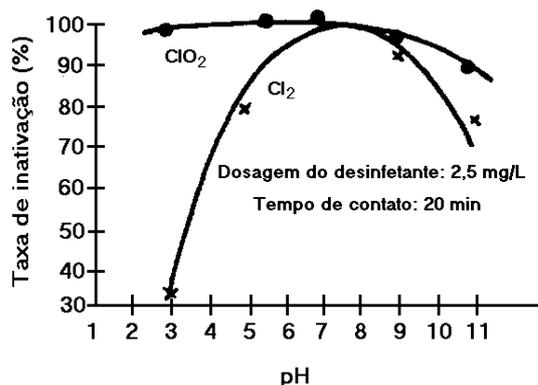


FIGURA 10 – Efeito da inativação da bactéria *Escherichia coli* de efluentes domésticos em diferentes valores de pH para o dióxido de cloro e gás cloro.

Fonte: Adaptado de JUNLI et al. (1997).

b) Influência do tempo de contato

Analisando a influência do tempo de contato durante a desinfecção das bactérias, *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, em tempos de contato que variam de 1, 2, 5, 10 e 20 minutos, respectivamente à 17°C, como pode ser visto nas Figuras 11 e 12, dentro das condições da reação, a taxa de inativação dessas bactérias foi mais rápida com o dióxido de cloro do que com o cloro líquido. Para eliminação de 98% das bactérias, *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, o tempo de contato variou entre 1 e 2 minutos. Porém, para a mesma efetividade o cloro dissolvido apresentou tempo de contato maior entre 2,5 e 3,5 minutos (JUNLI, et al., 1997).

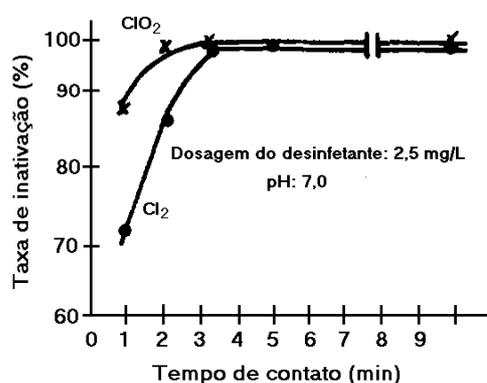


FIGURA 11 – Efeito do tempo de contato na efetividade durante a inativação da bactéria *Escherichia coli* em águas de abastecimento para o dióxido de cloro e gás cloro.

Fonte: Adaptado de JUNLI et al. (1997).

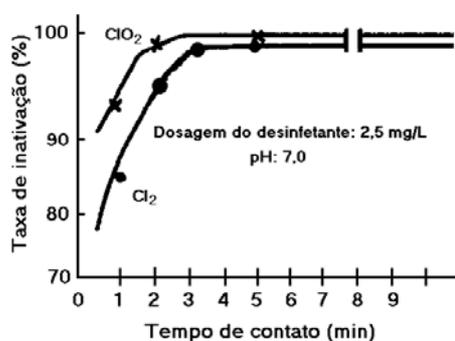


FIGURA 12 – Efeito do tempo de contato na efetividade durante a inativação da bactéria *Staphylococcus aureus* em águas de abastecimento para o dióxido de cloro e gás cloro.

Fonte: Adaptado de JUNLI et al. (1997).

c) Influência da concentração de sólidos em suspensão

Para NARKIS et al. (1995), efluentes com altas concentrações de sólidos em suspensão afetam o desempenho do dióxido de cloro durante a desinfecção. Por exemplo, foram aplicados 44,20 mg/L de ClO_2 durante a desinfecção de um efluente com alta concentração de sólidos em suspensão (sólidos em torno de 422 mg/L). A concentração residual de ClO_2 encontrado após 2 horas de contato foi de 3,12 mg/L e para 24 horas de contato foi de 0,11 mg/L. Com esse procedimento observou-se que o residual de ClO_2 cresceu proporcionalmente com a dosagem e diminuiu com o tempo de contato.

2.4.2.3.3 Toxicidade do dióxido de cloro

Ensaio realizado por DALHAMN (1957), demonstraram que a toxicidade aguda para 260 mg/L de dióxido de cloro durante 2 horas de exposição resulta na morte de 1 entre 4 ratos. Todos os animais expostos exibiram sinais de problemas respiratórios. Nenhum efeito foi observado em 5 ratos expostos a 0,1 mg/L para 5 horas/dia por semana, durante 10 semanas.

Segundo PAULET e DEBROUSSES (1974), os ratos expostos a 5, 10, ou 15 mg/L de dióxido de cloro durante 15 minutos, 2 ou 4 vezes por semana durante um mês de ensaio mostraram aumento das lesões nos alvéolos pulmonares em concentrações a partir de 10 mg/L. Não foi encontrada nenhuma mudança significativa nestes parâmetros a 5 mg/L.

O dióxido de cloro exposto acidentalmente num trabalhador mostrou que 19 mg/L foram capazes de causar a morte, enquanto que 5 mg/L de dióxido de cloro causam efeito irritante (ELKINS, 1959).

2.4.2.3.4 Aplicação do dióxido de cloro

Também várias investigações foram feitas para determinar a eficácia da ação germicida do dióxido de cloro desde a sua introdução em 1944 como desinfetante para água potável. A maioria das investigações foi executada por meio da comparação entre o cloro e o ozônio. Os resultados demonstraram que o ClO_2 é um desinfetante mais efetivo que o cloro, mas é menos efetivo que o ozônio (NUVOLARI et al., 2003).

Atualmente, o uso deste desinfetante pode ser destinado para eliminar qualquer vestígio de antraz, bactéria usualmente utilizada como arma biológica (PRÉDIO, 2003; ATAQUES, 2002). Entretanto, a sua aplicação em larga escala não foi efetiva durante a fumação do antraz (EUA, 2001). Outra aplicação é na área odontológica onde, em minutos, o dióxido de cloro, na forma de pasta bucal, é capaz de eliminar as bactérias causadoras da gengivite e ainda eliminar o mau hálito (CLOROSUR, 2002).

a) Inativação de *Giardia* e *Cryptosporidium*

Ensaio realizados por HOFMANN, ANDREWS e YE (2003) determinaram a dose específica de dióxido de cloro e também o residual após a inativação de protozoários. A Figura 13 apresenta a comparação entre a inativação de *Giardia* e *Cryptosporidium*.

Em geral, aplicou-se 2,0 mg ClO_2/L durante os testes em laboratório e alcançaram 3 log de inativação de *Giardia*. Para inativação de *Cryptosporidium* requer-se 10 vezes o Ct para alcançar os mesmos níveis de inativação como a *Giardia*.

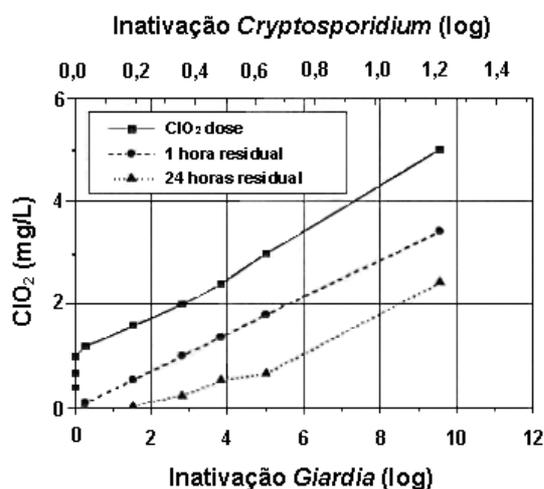


FIGURA 13 – Doses requeridas de dióxido de cloro para alcançar níveis de inativação de *Giardia* e *Cryptosporidium* a 1 e 24 horas de contato (pH 9, 1°C, COT = 5,5 mg/L).

Fonte: Adaptado e modificado de HOFMANN, ANDREWS e YE (2003).

O residual de dióxido de cloro em 24 horas de contato foi normalmente menor do que 1 mg/L para níveis de inativação para *Giardia*. Em baixas temperaturas (1°C) e pH 6

resultaram residuais aproximadamente em torno de 1,0 mg/L, enquanto a 25°C raramente o residual encontrou-se acima de 0,2 mg/L

b) Inativação de bactérias

Várias doses de dióxido de cloro e cloro foram introduzidas dentro de um volume de água definido contendo bactérias em condições de agitação, ausência da luz, temperatura à 19 °C e tempo de detenção hidráulica em torno de 20 minutos. Os resultados são apresentados na Figura 14.

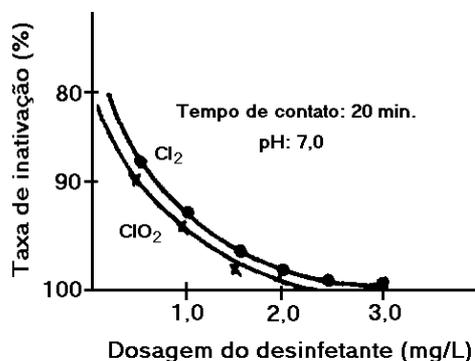


FIGURA 14 – Taxa de Inativação da bactéria *Escherichia coli* em diferentes doses de dióxido de cloro e cloro líquido em água de abastecimento.

Fonte: Adaptado de JUNLI et al. (1997).

Como pode ser visto, o dióxido de cloro e o cloro líquido são ótimos desinfetantes durante a inativação da *Escherichia coli*. O efeito da inativação aumenta proporcionalmente com a dose de dióxio de cloro e cloro líquido. Durante testes realizados em águas de abastecimento por JUNLI et al. (1997), concluíram que o dióxido de cloro foi melhor desinfetante em relação ao cloro líquido. Por exemplo, a morte de 99% das *Escherichia coli* que foram atingidas requerendo 1,4 mg/L de ClO₂, enquanto para o cloro líquido foram requeridas doses à 1,8 mg/L. A esterilização da *Escherichia coli* à 99,9% de eficiência pode ser alcançada em ambos desinfetantes em concentrações em torno de 3,0 mg/L.

JUNLI et al. (1997), explicaram a efetividade do dióxido de cloro no tratamento de efluentes domésticos, como apresenta a Figura 15. Como pode ser visto, 99,9% das mortes das bactérias podem ser alcançadas com 2,5 mg/L de ClO₂. Enquanto que o mesmo percentual

das mortes das bactérias pode ser alcançado com o uso do cloro líquido numa concentração de 3,0 mg/L.

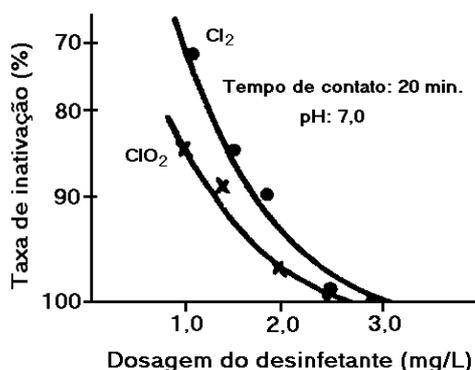


FIGURA 15 – Taxa de Inativação da bactéria *Escherichia coli* em diferentes doses de dióxido de cloro e cloro líquido em efluentes domésticos.

Fonte: Adaptado de JUNLI et al. (1997).

Estudos realizados por RIBEIRO (2001) confirmam a eficiência do desinfetante dióxido de cloro para efluentes domésticos tratados em Lagoas de Estabilização pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). Durante os estudos aplicou-se dosagens entre 4,15 a 7,82 mg ClO₂/L em 10 minutos de contato com o efluente, sendo estas necessárias para cumprir os padrões de lançamento de coliformes fecais ao corpo receptor de classe 2.

2.4.2.3.5 Vantagens e desvantagens do processo

Como agente químico no processo de desinfecção o dióxido de cloro apresenta algumas vantagens e desvantagens (AQUASTEL, 2003; USEPA, 1999d).

As vantagens são:

- opera em doses pequenas;
- não forma cloraminas;
- é oxidante e desinfetante efetivo de todos os tipos de microrganismos, incluindo cistos (*Giardia lamblia*, *Cryptosporidium sp*) e vírus;
- as propriedades biocida não são influenciadas pelo pH;
- o dióxido de cloro deixa residual após a desinfecção;
- não favorece a formação de trihalometanos.

As desvantagens são:

- a produção de dióxido de cloro ocorre somente no local de utilização;
- requer transporte e armazenamento de produtos químicos para sua produção;
- altos custos de análise são associados no monitoramento de íons cloritos e cloratos;
- decomposição do dióxido de cloro pela exposição a luz solar;
- produção de odores repulsivos em alguns sistemas;
- formação de subprodutos após a desinfecção (clorito e cloratos).

2.4.3 Subprodutos da Desinfecção

Para Di BERNARDO (1995), quando a desinfecção é realizada com o cloro livre ocorre a formação de composto organoclorados denominados trihalometanos (THM). A importância dos compostos organoclorados em nível mundial prende-se ao fato de serem considerados carcinogênicos (MACÊDO, 1997). Pesquisas realizadas por ROOK (1976), constatou a produção de quatro compostos a partir de substâncias húmicas, as quais são: triclorometano (CHCl_3), bromodiclorometano (CHBrCl_2), dibromoclorometano (CHBr_2Cl) e tribromometano (CHBr_3), cujas fórmulas moleculares estão representadas na Figura 16. O triclorometano prevalece sempre na concentração total de trihalometanos.

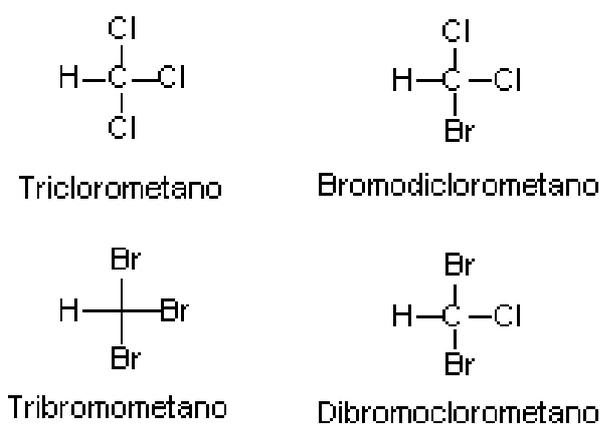
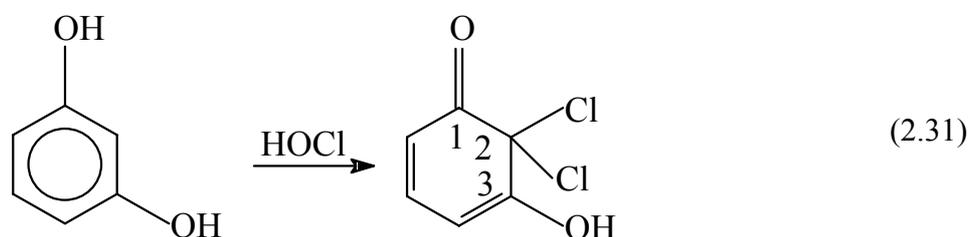


FIGURA 16 – Estrutura molecular dos principais trihalometanos (THM).

Fonte: Adaptado de MACÊDO (2001).

Os precursores dos THM são compostos orgânicos produzidos pela degradação das plantas e também pela biomassa das algas, denominadas substâncias húmicas. As estruturas das moléculas do material húmico, consistem em uma enorme massa amorfa condensada com certos grupos funcionais sob sua superfície (TRUSSELL e UMPHRES, 1978).

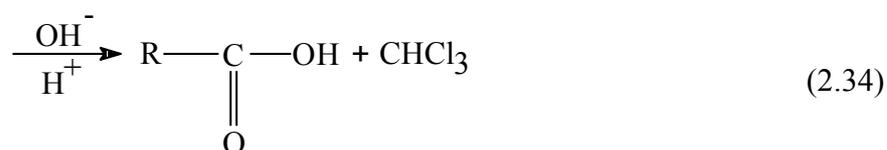
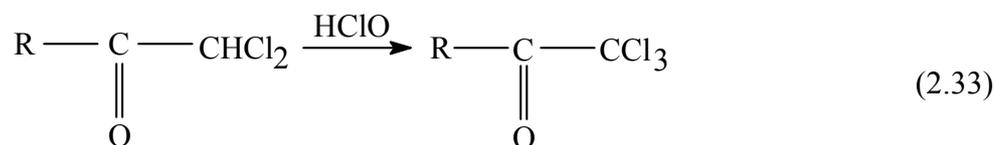
Segundo BAIRD (1995), os ácidos húmicos que possuem anéis 1,3 - dihidroxibenzeno sob sua superfície reagem com o ácido hipocloroso (HClO) para formar o triclorometano (CHCl₃), ou seja, o clorofórmio. O átomo de carbono (2), localizado entre aqueles grupos que carregam -OH, é atacado pelo HClO, representado na reações abaixo.



Em seguida, o anel rompe-se entre os átomos de carbono (2) e (3) para produzir uma cadeia.



Na presença de HClO, o carbono terminal torna-se triclorado, e o grupo -CCl₃ é deslocado pelo -OH na água para formar o triclorometano (CHCl₃).



Ao contrário do cloro livre, o dióxido de cloro não forma THM em água contendo brometo livre a 2,0 mg/L de ácidos húmicos. Porém, a presença de brometos na água provoca somente a formação de tribromometanos (CHBr_3), devido ao aumento da dosagem do dióxido de cloro e também pela concentração de íons brometo, segundo estudos realizados por LI et al. (1996). As Figuras 17 e 18 representam, respectivamente, o efeito da dosagem de ClO_2 e também das concentrações de íons brometo na formação de THM.

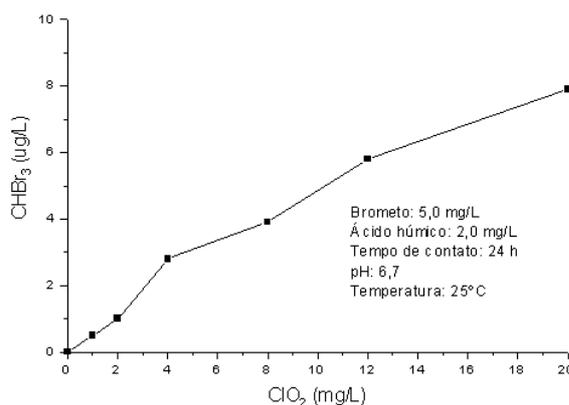


FIGURA 17 – Efeito da dose do dióxido de cloro na formação de THM.

Fonte: Adaptado de LI et al. (1996).

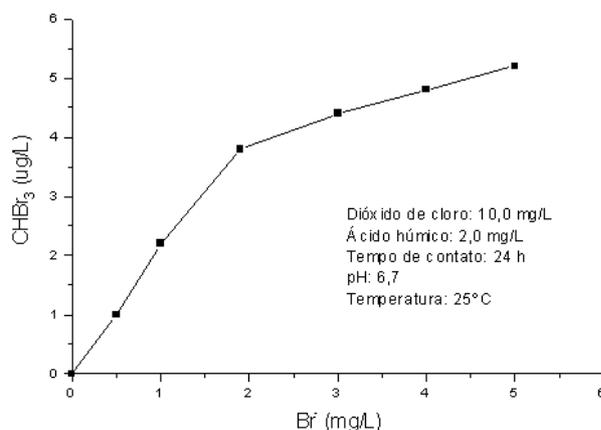


FIGURA 18 – Efeito da concentração de brometo na formação de THM.

Fonte: Adaptado de LI et al. (1996).

A desinfecção com o dióxido de cloro em determinadas condições pode promover a formação de íons cloritos e cloratos, que são subprodutos que representam um problema do ponto de vista da saúde pública, por sua ação inibidora da tireóide e a possibilidade de causar

efeitos hematológicos e mutagênicos (Di BERNARDO, 1993). Segundo NARKIS¹⁰ apud (CHANG et al., 2001), as seguintes reações podem ocorrer na formação dos íons mencionados:

- o Em condições alcalinas



- o Na oxidação-redução do dióxido de cloro



- o Na reação com o HClO



Na água, o íon clorito (ClO_2^-) será predominante após o final da reação, aproximadamente 50 % do dióxido de cloro é convertido em íons clorito, enquanto que o restante (30%), serão os íons clorato (ClO_3^-) e os íons cloretos (Cl^-) (WERDEHOFF e SINGER, 1987).

Outros subprodutos de desinfecção gerados pelo dióxido de cloro na água são os formaldeídos e os acetaldeídos. Testes realizados por DABROWSKA, SWIETLIK e NAWROCKI (2003) na água subterrânea e superficial, detectaram a presença de formaldeídos e acetaldeídos após a desinfecção em diferentes doses de ClO_2 e diferentes condições de pH.

A reação do ClO_2 com a fração húmica da matéria orgânica se procedeu principalmente numa parte aromática da molécula. O resultado obtido indicou que o nível da concentração de compostos carbonílicos aumenta devido a exposição com o ClO_2 durante a

¹⁰ NARKIS, N.; KATZ, A.; ORSHANSKY, F.; KOTT, Y.; FRIEDLAND, Y. Disinfection of effluents by combination of chlorine dioxide and chlorine. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 5-6, p. 105-114, 1995 apud CHANG. C. Y.; HSIEH, Y. S.; LIN, Y. M.; WANG, K. H. The organic precursors affecting the formation of disinfection by-products with chlorine dioxide. **Chemosphere**, v.44, n. 5, p.1153-1158, 2001

reação. O pH não teve nenhuma influência na reação do ClO_2 com a matéria orgânica. A distribuição média do aldeído é representada na Figura 19. Verificou-se que o formaldeído foi o composto mais abundante e em seguida aparece o acetaldeído nos ensaios.

A influência da dosagem do dióxido de cloro na formação de aldeídos também foi investigada. A Figura 20 mostra a correlação entre o total de aldeídos e a dose de dióxido de cloro. No caso da água superficial (B) ocorre maior elevação na concentração total de aldeídos, enquanto que na água subterrânea (A) as concentrações totais de aldeídos se mantiveram relativamente estáveis.

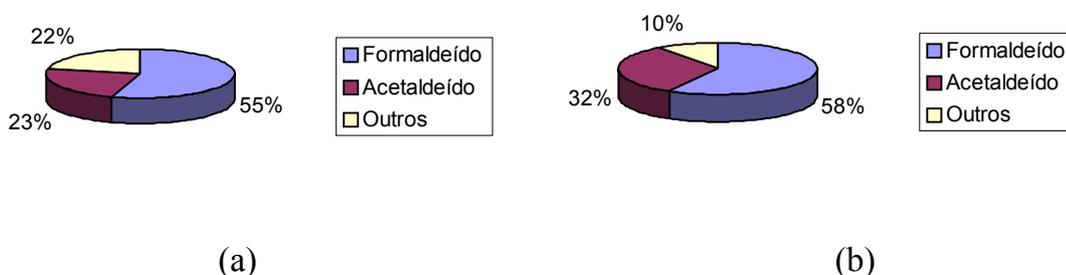


FIGURA 19 – Distribuição do aldeído em águas subterrâneas (a) e águas superficiais (b).

Fonte: Modificado e adaptado de DABROWSKA, SWIETLIK e NAWROCKI (2003).

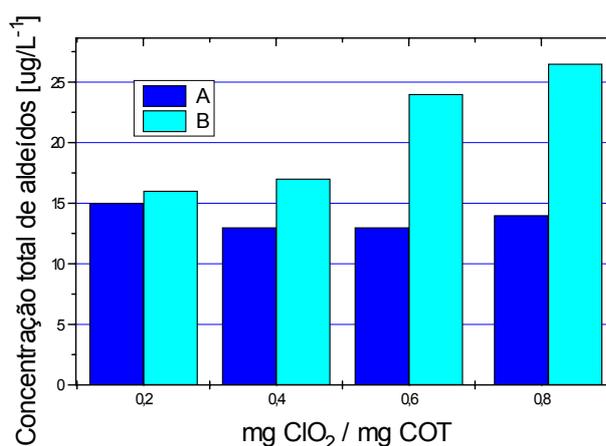


FIGURA 20 – Correlação entre a concentração de aldeídos e a dosagem de ClO_2 .

Fonte: Modificado e adaptado de DABROWSKA, SWIETLIK e NAWROCKI (2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Desenvolveu-se o trabalho junto a Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Insular, tendo como concessionária a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) do município de Florianópolis, SC. Estudou-se o efluente doméstico proveniente do sistema de lodos ativados por aeração prolongada.

O efluente do tanque de água de serviço (TAS) foi transportado pela ação da gravidade até o reator numa vazão constante de 22,0 m³/h. Aplicou-se durante o estudo as diferentes doses de dióxido de cloro no efluente tratado sob ausência da luz, sendo as seguintes doses em amostragem simples: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 mgClO₂/L. O efluente permaneceu durante 30 minutos no interior do reator. Em seguida, o efluente desinfetado foi encaminhado ao corpo receptor. A Figura 21 apresenta a instalação do sistema de desinfecção.



FIGURA 21 – Instalação do sistema de desinfecção.

Realizou-se o monitoramento físico-químico e microbiológico do efluente no tanque da água de serviço (TAS) e do desinfetado no Laboratório de Reuso de Águas (LARA) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Foram coletadas e analisadas em triplicatas, para o monitoramento físico-químico, as amostras do efluente bruto e do efluente desinfetado referente ao tempo de contato 30 minutos. Para cada amostra do monitoramento físico-químico obteve-se a média aritmética e o desvio padrão.

Enquanto que para o monitoramento microbiológico foram coletadas e analisadas em triplicatas amostras do efluente bruto e do efluente desinfetado referente aos tempos de contato 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. Para cada amostra do monitoramento microbiológico obteve-se a média aritmética.

3.1 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos envolvidos nas análises experimentais referem-se ao sistema de desinfecção bem como aos equipamentos auxiliares necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1.1 Sistema de Desinfecção com o Dióxido de Cloro

3.1.1.1 Produção do dióxido de cloro durante os ensaios

A produção de dióxido de cloro *in situ* se dá através do gerador da marca BI-O-CHLOR, modelo A 12, com a capacidade produtiva de 12 a 120 g/h de ClO_2 , fabricado pela indústria Sodi Científica S. p. a., conforme apresenta a Figura 22.

A reação química no interior do reator se deu com os reagentes químicos: clorito de sódio (25%), ácido clorídrico (32%) e a água de diluição. Os reagentes são armazenados, em recipientes fechados de polietileno com capacidade de 40 litros e foram introduzidos nos reservatórios de armazenagem por meio de mangueiras de polietileno.

A adução dos reagentes e da água de diluição no interior do reator ocorreu por meio de três bombas dosadoras, alimentadas pelos reservatórios de armazenagem, que ficam no interior do gerador. Entre as bombas, a bomba de cor alaranjada introduz ácido clorídrico (HCl), a de bomba cor verde introduz água de diluição (H₂O) e a bomba de cor violeta introduz clorito de sódio (NaClO₂), conforme mostra a Figura 23.



FIGURA 22 – Gerador de dióxido de cloro utilizado durante os ensaios.

A passagem dos reagentes se dá pela seguinte forma: o sensor de fluxo capta a passagem dos reagentes químicos e da água de diluição, estando este ligado ao sistema de alarme interrompe o processo no caso de falta de alimentação por qualquer motivo.

O controle da dosagem foi realizado pelo processo manual, no qual o operador muda a taxa de alimentação através do painel eletrônico.



FIGURA 23 – Bombas dosadoras de HCl (alaranjada), H₂O (verde) e NaClO₂ (violeta).

3.1.1.2 Dimensionamento do reator

A melhor condição de operação de um reator de desinfecção é quando este apresenta um comportamento de fluxo de pistão, pois cada elemento de fluido deixa o tanque na ordem em que entrou (VON SPERLING, 1996b). Portanto, construiu-se um reator de fluxo de pistão com volume total de $11,60\text{m}^3$, volume útil de $11,0\text{ m}^3$ e 6 pontos de coleta de amostras, sendo que 3 pontos de coleta encontram-se ao lado direito e 3 pontos de coleta ao lado esquerdo, como mostra a Figura 24. Dentro do reator contruíu-se 5 chicanas que são necessárias para a homogeneização dos fluídos, como mostra a Figura 25.



FIGURA 24 – Reator tubular usado para a desinfecção com o dióxido de cloro.



FIGURA 25 – Chicanas utilizadas para a homogeneização dos fluídos.

3.1.2 Equipamentos Auxiliares

Na Tabela 6 descrevem-se os reagentes necessários aos ensaios de desinfecção.

TABELA 6 - Descrição dos reagentes utilizados.

Item	Reagente	Marca
01	Ácido clorídrico (33%)	Quimicamar
02	Clorito de sódio (25%)	Quimicamar
03	Glicine (10%)	Hach
04	DPD Free Chlorine power	Hach
05	Kit colilert	IDEXX – DST®
06	DQO digestion solution	Hach
07	Azul de metileno (3%)	Covadis

A Tabela 7 apresenta os equipamentos auxiliares utilizados durante o desenvolvimento dos ensaios.

TABELA 7 - Descrição dos equipamentos utilizados.

Item	Equipamento e acessórios	Marca	Modelo
01	Gerador de dióxido de cloro	BI-O-CHLOR	12A
02	Espectrofotômetro	Hach	DR-2010
03	Peagâmetro	Hach	senSION™1
04	DQO reactor	Hach	s/n 010700022039
05	Relógio cronógrafo	Technos	694
06	Termômetro	Incoterm	61175/01
07	Estufa de cultura bacteriológica	Fanem Ltda	002 CB
08	Autoclave	Phoenix	A V75
09	Seladora Quanti-Tray	IDEXX DST®	Model 2X

3.2 PARÂMÊTROS DE MONITORAMENTO PARA DESINFECÇÃO

3.2.1 Parâmetros Físico-Químicos

São estabelecidos alguns parâmetros físico-químicos para o monitoramento sendo eles:

- Residual de dióxido de cloro (mg/L);
- Cor aparente (uC);
- Potencial hidrogeniônico;
- Demanda química de oxigênio (mg/L)

3.2.1.1 Residual de dióxido de cloro

O residual de dióxido de cloro está relacionado com a inativação de microrganismos após um certo tempo de contato, ou seja, o residual descreve a diferença entre a dose aplicada e a demanda da concentração de dióxido de cloro.

O residual de dióxido de cloro foi determinado segundo o método DPD, adaptado por STANDARD (1999), do manual de procedimentos do espectrofotômetro DR 2010, marca Hach. Determinou-se o residual num comprimento de onda de 530 nm e a unidade de medida utilizada em mg/L.

3.2.1.2 Cor aparente

A cor aparente é devida a uma parcela da matéria em suspensão na água. Determinou-se a cor aparente num comprimento de onda de 455 nm e a unidade de medida foi baseada na unidade Hazen (uH) - escala Platina-Cobalto.

A cor aparente foi determinada segundo o método, adaptado por STANDARD (1999), HONGVE e ÅKESSON (1996), do manual de procedimentos do espectrofotômetro DR 2010, marca Hach.

3.2.1.3 Potencial hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico (pH) mede quantitativamente a acidez ou a alcalinidade de uma solução. É um parâmetro importante devido a influência significativa nas reações físico-químicas e também nas atividades metabólicas dos microrganismos.

Determinou-se o pH antes e após o processo de desinfecção utilizando peagâmetro, modelo senSION™ 1, da marca Hach.

3.2.1.4 Demanda química de oxigênio

A demanda química de oxigênio (DQO) representa a quantidade indireta do teor de matéria orgânica na água. É um parâmetro importante, pois o consumo de oxigênio dissolvido na água pelos microrganismos está relacionado com a estabilização da matéria orgânica.

Determinou-se a DQO num comprimento de onda de 420 nm e a unidade de medida usada em mg/L, segundo o método adaptado por JIRKA e CARTER (1975) do manual de procedimentos do espectrofotômetro DR 2010, marca Hach.

3.2.2 Parâmetros Microbiológicos

O parâmetro biológico estabelecido para monitoramento do efluente foi:

- Concentração de coliformes fecais.

3.2.2.1 Concentração de coliformes fecais

A concentração de coliformes fecais foi confirmada e quantificada pelo método Colillert®. O meio Colillert® apresenta um composto MUG (meti-umbeliferil-glicuronídeo) que por hidrólise enzimática (beta-D-glicuronidase, também produzido pelos coliformes), este apresenta uma fluorescência devido ao metil-umbeliferil liberado. Esta fluorescência é observada quando submetida a uma luz UV, neste caso, a presença de coliformes fecais é positiva. Os resultados obtidos por este método são expressos em NMP/100 mL e o limite de detecção é de 2419 NMP/100 mL

3.2.3 Parâmetros Auxiliares

Alguns parâmetros auxiliares são estabelecidos para o monitoramento sendo eles:

- Tempo de detenção hidráulica (TDH);
- Dosagem do desinfetante.

3.2.3.1 Tempo de detenção hidráulica (TDH)

O tempo de detenção hidráulica é obtido pela relação existente entre o volume e a vazão do sistema, conforme a equação (3.1).

$$t_t = \frac{V}{Q} \quad (3.1)$$

onde:

t_t = Tempo teórico de detenção hidráulica (min)

Q = Vazão do efluente (m^3/h)

V = Volume (m^3)

Embora os reatores reais não sigam completamente esses padrões de escoamento, uma grande parte deles se aproxima do comportamento ideal. O desvio pode ser causado pela formação de canais ou pelo reciclo ou, ainda, pela criação de regiões estagnantes no interior do reator (LEVENSPIEL, 1976).

Os traçadores químicos caracterizam-se por substâncias ou dispositivos que permitem a simulação do conjunto de partículas de fluido em movimento. Realizou-se um ensaio com a finalidade de se observar o comportamento hidrodinâmico do reator e obter o tempo de detenção hidráulico real (t'). O tempo de detenção hidráulico real obtido foi dividido por seis, referente ao número de chicanas do reator.

Para realização do ensaio, foi acoplado um espectrofotômetro na saída do reator, que mediu, em intervalos de três minutos e meio a cor aparente do efluente.

Inicialmente introduziu-se o efluente no interior do reator até a obtenção do valor constante da cor aparente do efluente (CA_e). Depois, a solução de azul de metileno foi adicionada ao fluxo contínuo e a variação da cor aparente do efluente acompanhada até atingir um valor constante. Em seguida, a solução de azul de metileno foi retirada pelo fluxo e a água novamente introduzida, até que a cor aparente do efluente alcançasse um valor constante. Os resultados do ensaio com o traçador são apresentados na Tabela 8.

TABELA 8 – Resultados de ensaio com o traçador químico.

Tempo (min)	Cor aparente (uC)	Tempo (min)	Cor aparente (uC)
0,0	33	28,0	40
3,5	33	31,5	37
7,0	33	35,0	37
10,5	35	38,5	36
14,0	37	42,0	35
17,5	44	45,5	34
21,0	48	49,0	34
24,5	43	52,5	33

Sendo a variável (CC_i) a cor do corante inicial, foi calculada a equação (3.2) pela integral do modelo de Simpson. Segundo EDWARDS (1997), a aproximação de Simpson está associada a uma partição de $[a,b]$ num número par de subintervalos de igual comprimento, sendo a soma de (CC_i), definida como a equação (3.3):

$$CC_i = \int_a^b (CC) \partial t \quad (3.2)$$

$$CC_i = \frac{\Delta t}{3} (C_{ei} + 4C_1 + 2C_2 + 4C_3 + 2C_4 + \dots + 2C_{n-2} + 4C_{n-1} + C_n) \quad (3.3)$$

$$CC_i = 1642 \text{ uC} \cdot \text{min}$$

onde:

CC_i = Cor do corante inicial (uC . min)

Δt = Intervalo de tempo (min)

C_{ei} = Cor do efluente inicial (uC)

C_1 = Cor do efluente no instante t_1 (uC)

C_n = Cor do efluente no instante t_n (uC)

O tempo detenção hidráulica real é calculado pela equação (3.4):

$$t' = \int_0^{\infty} (t.E) \delta t \quad (3.4)$$

Caracterizou-se a distribuição dos tempos de detenção hidráulica reais (t') empregando valores numéricos da Tabela 8 na equação (3.5):

$$t.E = t \cdot \frac{(CA_e)}{\int_0^{\infty} CC(t) \delta t} = t \cdot \frac{(CA_e)}{(CC_i)} \quad (3.5)$$

E = Distribuição de idade para cada instante

CA_e = Cor aparente do efluente (uC)

CC_i = Cor do corante inicial (uC . min)

t = tempo de coleta (min)

Na Tabela 9 são apresentados os valores calculados pela distribuição de idade correspondente a cada instante do ponto de coleta.

TABELA 9 – Valores da distribuição de idade $t.E$ para cada instante.

Tempo (min)	$t.E$	Tempo (min)	$t.E$
0,0	0,0000	28,0	0,6813
3,5	0,0703	31,5	0,7281
7,0	0,1405	35,0	0,7877
10,5	0,2235	38,5	0,8431
14,0	0,3151	42,0	0,8942
17,5	0,4684	45,5	0,9410
21,0	0,6131	49,0	0,9836
24,5	0,6408	52,5	1,0538

Sendo os valores da Tabela 9 usados na obtenção do tempo de detenção hidráulica real (t') pela média ponderada de Simpson:

$$t' = \frac{\Delta t}{3} [E_{ei} + 4(tE_1) + 2(tE_2) + 4(tE_3) + 2(tE_4) + \dots + 2(tE_{n-2}) + 4(E_{n-1}) + (tE_n)] \quad (3.6)$$

$$t' = 29,8 \text{ min.}$$

3.2.3.2 Dosagem do desinfetante

A dose aplicada pelo dióxido de cloro no efluente da ETE foi dada pela equação (3.7).

$$C_p = D_{ClO_2} \cdot Q \quad (3.7)$$

onde:

C_p = Carga de dióxido de cloro produzida (g/h)

$D_{(ClO_2)}$ = Dosagem do dióxido de cloro (mg/L)

Q = vazão do efluente (m^3/h)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

As análises de caracterização do efluente do tanque de água de serviço (TAS) e também do efluente desinfetado, proveniente do sistema de lodos ativados, foram realizadas na Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) entre os meses de agosto a novembro de 2003. A Tabela 10 apresenta o resultado dos testes físico-químicos do efluente bruto e do efluente desinfetado referente ao tempo de contato 30 minutos.

Não considerou-se o teste de turbidez, embora as partículas em suspensão sirvam de barreira para os microrganismos presentes na água e com isso elevam o consumo do desinfetante, a concentração de sólidos em suspensão apresenta-se muito baixa devido ao bom funcionamento do decantador secundário da ETE.

TABELA 10 – Características físico-químicas do efluente doméstico.

Dose de ClO ₂ (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor aparente (uH)	pH	Residual de ClO ₂ (mg/L)
0,0	39,00 ± 1,43	41,30 ± 2,79	6,71 ± 0,19	-
1,0	33,50 ± 8,67	34,67 ± 0,58	6,65 ± 0,04	0,00 ± 0,00
1,5	32,50 ± 2,00	32,00 ± 1,00	6,36 ± 0,02	0,65 ± 0,02
2,0	29,00 ± 1,00	24,00 ± 1,00	6,04 ± 0,04	0,75 ± 0,05
2,5	25,67 ± 2,52	20,33 ± 0,58	5,78 ± 0,08	1,12 ± 0,08
3,0	19,17 ± 2,57	16,17 ± 0,29	5,64 ± 0,04	1,24 ± 0,02

O dióxido de cloro reduziu a demanda química de oxigênio (DQO) e a cor aparente do efluente em função das diferentes doses de ClO₂ durante os ensaios.

O potencial hidrogeniônico (pH) do efluente após a desinfecção para doses entre 1,0 e 2,0 mgClO₂/L atendeu o padrão de lançamento de esgotos tratados em águas superficiais e de reuso, conforme determina a norma NBR 13969 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. O valor do pH permaneceu entre 6 e 9 como recomenda a ABNT (1997).

A concentração residual do dióxido de cloro cresceu proporcionalmente com a dosagem e diminuiu com o tempo de contato. Sobre o residual de dióxido de cloro não há dados sobre seu controle na legislação brasileira. Entretanto, o valor máximo permitido para o lançamento do residual de dióxido de cloro após uma desinfecção é de 0,8 mgClO₂/L, segundo a USEPA (2004).

4.2 PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS

4.2.1 Remoção de Coliformes Fecais

Foram realizados ensaios microbiológicos do efluente antes e após a aplicação do dióxido de cloro. Pode-se perceber o NMP médio inicial de coliformes fecais é 10⁴ em 100 mL. Os dados relacionados na Tabela 11 referem-se a diminuição da concentração de coliformes fecais e função da dosagem de dióxido de cloro e tempo de contato no efluente doméstico.

TABELA 11 – Concentração de CF (NMP/100mL) no efluente antes e após a aplicação do ClO₂.

Tempo de contato (min)	Dosagem aplicada de ClO ₂ (mg/L)				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	2,60 . 10 ⁴	2,60 . 10 ⁴	2,60 . 10 ⁴	2,60 . 10 ⁴	2,60 . 10 ⁴
5	1,27 . 10 ³	1,11 . 10 ²	8,96 . 10 ¹	1,51 . 10 ¹	1,04 . 10 ¹
10	1,17 . 10 ³	8,51 . 10 ¹	2,80 . 10 ¹	7,37 . 10 ⁰	0
15	1,05 . 10 ³	7,95 . 10 ¹	1,53 . 10 ¹	0	0
20	1,02 . 10 ³	6,56 . 10 ¹	0	0	0
25	1,00 . 10 ³	3,77 . 10 ¹	0	0	0
30	1,00 . 10 ³	3,39 . 10 ¹	0	0	0

A Figura 26 mostra os valores reais (R) e estimados (E) do decréscimo da concentração de coliformes fecais para diversas doses de dióxido de cloro em mg/L, respectivamente. Os valores estimados reproduziram a faixa média dos valores observados devido ao elevado valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,91$), segundo a equação (4.1). A equação (4.1) foi obtida por regressão múltipla a partir do software Microsoft Excel, onde considerou-se a dose do desinfetante, o tempo de contato e a taxa de decréscimo da concentração de microrganismos.

$$N = N_0 \cdot e^{-2,25D^{1,075} \cdot t^{0,154}} \quad (4.1)$$

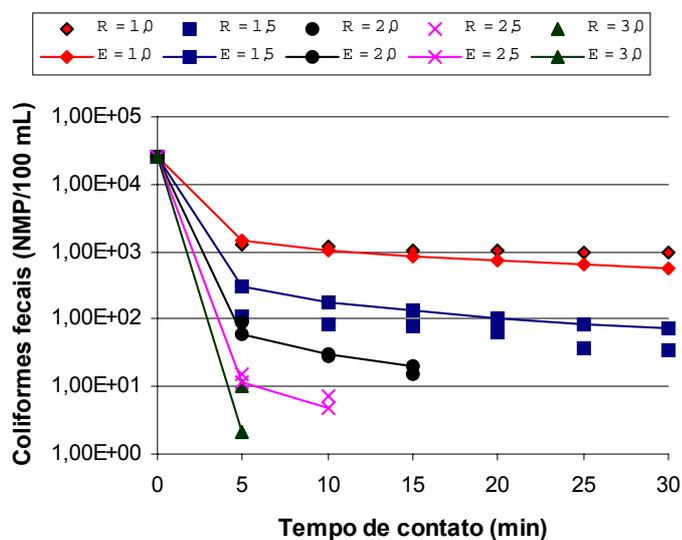


FIGURA 26 - Inativação de coliformes fecais em função do tempo para diversas doses de dióxido de cloro.

Verificou-se que a concentração de coliformes fecais foi reduzido num tempo de 30 minutos de contato na presença do dióxido de cloro (ClO_2). Houve uma acentuada queda da concentração de coliformes fecais em 5 minutos de contato aplicando várias doses do desinfetante. Para dosagens de 1,0 e 1,5 mgClO_2/L ocorreu um pequeno decréscimo na concentração de coliformes fecais em 30 minutos de contato, respectivamente. Entretanto, em dosagens de 2,0 2,5 e 3,0 mgClO_2/L promoveu a esterilização do efluente por eliminação da concentração de coliformes fecais nos tempos de contato de 20, 15 e 10 minutos, respectivamente.

Os resultados obtidos confirmam a diminuição da concentração de coliformes fecais em efluentes domésticos tratados pelos processos biológicos (lodos ativados) aplicando-se mínimas dosagens entre 1,5 e 2,0 mgClO_2/L .

A dosagem de 2,0 mgClO_2/L atende as 4 classes de lançamento de esgotos tratados em águas superficiais (Classes a¹, b², c³ e d⁴) conforme determina a norma NBR 13969 da ABNT.

¹ Na represa destinada ao abastecimento público, ou nos rios formadores da represa até 10 km a montante dela, independente da distância do ponto de captação e do volume de reservação da represa.

² Nos corpos receptores com captação a jusante para abastecimento público.

³ Nas águas litorâneas, praias e nos rios que deságuam nas praias freqüentadas pelas pessoas para recreação.

⁴ Nos demais corpos receptores.

O cumprimento às diretrizes bacteriológicas para lançamento de esgotos tratados em águas superficiais as classes a, b e d os valores limites da concentração de coliformes fecais são inferiores a 1000 NMP/100mL, enquanto que à classe c os valores são inferiores a 500 NMP/100mL.

Segundo RIBEIRO (2001), a desinfecção de esgotos domésticos tratados por lagoas de estabilização aplicando-se dosagem média de 6,46 mgClO₂/L, num tempo de 10 minutos de contato, foi necessário para diminuir a densidade de coliformes fecais no meio aquoso e cumprir os padrões de lançamento de esgotos nos corpos receptores. Como a concentração de sólidos em suspensão é relativamente alta, estes sólidos elevam o consumo do desinfetante durante a desinfecção e conseqüentemente torna-se alto o custo de operação do tratamento.

As eficiências medidas da concentração de coliformes fecais são representadas na Tabela 12. A taxa de remoção dos microrganismos, num tempo de 30 minutos de contato com o dióxido de cloro, teve um aumento para todas as dosagens de 95,12 a 100%. Houve uma insignificante remoção das bactérias aplicando-se 1,0 mgClO₂/L, a eficiência foi de 95,12 a 96,15%. A eficiência da remoção para 1,5 mgClO₂/L variou de 99,57 a 99,87%. Porém, a eficiência de remoção quando a dose aplicada foi de 2,0, 2,5 e 3,0 mgClO₂/L no final da desinfecção foi de 100%.

TABELA 12 – A eficiência do dióxido de cloro durante a desinfecção.

Tempo de contato (min)	Eficiência de remoção (%)				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
5	95,12	99,57	99,66	99,94	99,96
10	95,50	99,67	99,89	99,97	100,00
15	95,96	99,69	99,94	100,00	100,00
20	96,08	99,75	100,00	100,00	100,00
25	96,15	99,86	100,00	100,00	100,00
30	96,15	99,87	100,00	100,00	100,00

4.3 ANÁLISE DE CUSTO DE DESINFECÇÃO

A avaliação considerada para análise dos custos de instalação, operação e manutenção do sistema foi a tecnologia de produção de dióxido de cloro a partir da reação química entre o ácido clorídrico e o clorito de sódio. Enquanto que os custos da aquisição do reator e da água de diluição utilizada não foram incluídos devido aos baixos valores quando comparados a outros componentes do sistema.

4.3.1 Custo de Implantação

Durante os ensaios na ETE Insular, o sistema de produção do dióxido de cloro se deu a partir da reação química entre o ácido clorídrico a 33% e o clorito de sódio a 25%. O sistema de produção é constituído basicamente do tanque de armazenamento dos reagentes (ácido clorídrico, clorito de sódio e água), três bombas dosadoras, sensor de fluxo e câmara de contato. A Tabela 13 fornece o preço de aquisição do gerador. Leva-se em consideração o câmbio de R\$ 3,60/US\$ 1 com exceção do reator tubular usado para desinfecção.

TABELA 13 – Custo do sistema de geração do dióxido de cloro.

Capacidade (kg ClO ₂ /h)	Capacidade (Kg ClO ₂ /mês)	Preço do gerador (R\$)	Custo unitário mensal (R\$/Kg ClO ₂)
0,06	43,2	82.251,64	1.903,97
0,12	86,4	84.307,93	975,79
0,24	172,8	94.589,38	547,39
0,50	360,0	98.701,95	274,17
1,00	720,0	108.303,73	150,42
3,00	2160,0	205.629,12	95,20
5,00	3600,0	226.192,03	62,83

Fonte: Empresa C.O Muller.

Construiu-se a Figura 27 com base nos valores da Tabela 14, e mostra o custo unitário de instalação do sistema de produção do dióxido de cloro (R\$/Kg ClO₂), em função da capacidade de geração (Kg ClO₂/mês). Verifica-se que o custo unitário mensal de produção varia em função da capacidade de geração do dióxido de cloro, ou seja, quanto maior for a capacidade de geração menor será o custo unitário mensal.

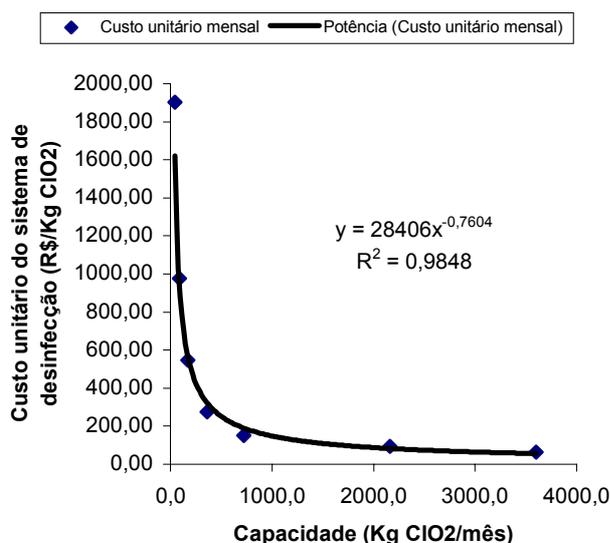


FIGURA 27 – Custo unitário de desinfecção em função da capacidade de geração

4.3.1.1 Capacidade de geração e custo por economia para implantação do sistema

Para o cálculo da capacidade de produção do dióxido de cloro o fator relevante foi a dosagem necessária para a desinfecção do efluente. Para a desinfecção do efluente tratado pela ETE Insular de Florianópolis a dose necessária foi de 2,0 mgClO₂/L durante o estudo, dose recomendada por AISSE et al. (2003). Segundo BASSANI (2003), considerando-se a geração per capita de 0,16 m³ de efluente/habitante dia, é possível calcular a capacidade de geração de ClO₂ para várias populações, pela equação (4.2).

$$CG = 0,16 \cdot 30 \cdot POP \cdot D_{ClO_2} \quad (4.2)$$

Sendo:

CG = capacidade de geração em Kg ClO₂/mês

POP = população

DClO₂ = dose aplicada de ClO₂ assumindo um valor de 2 mg/L ou 0,002 Kg/m³

Contribuição per capita mês = 0,16 x 30 (m³/mês)

Utilizou-se a equação (4.3) para o cálculo do custo unitário de produção de ClO₂, esta equação representa a regressão da função, demonstrada na Figura 29 para produção de ClO₂ a partir da reação química do ácido clorídrico e clorito de sódio.

$$CUN = 28406 \cdot CG^{-0,7604} \quad (4.3)$$

Sendo:

CUN = custo unitário de aquisição em R\$/Kg ClO₂

CG = Capacidade de geração em Kg ClO₂/mês

Para BASSANI (2003), para calcular o custo de instalação do sistema, utiliza-se a equação (4.4):

$$CIE = \frac{CG \cdot CUN \cdot 3,75}{POP} \quad (4.4)$$

Sendo:

CIE = custo de instalação por economia em R\$

CUN = custo unitário de aquisição em R\$/Kg ClO₂

CG = Capacidade de geração em Kg ClO₂/mês

Constante = 3,75 (número de habitantes por economia).

As aplicações do conjunto de equações descritas para várias populações estão resumidas na Tabela 14.

TABELA 14 - Custo de instalação para o sistema de geração de ClO₂ por economia.

População	Q efluente (m ³ /mês)	Capacidade (Kg ClO ₂ /mês)	Custo/Kg ClO ₂ (R\$)	Custo de instalação por economia (R\$)
7.000	33.600	67,2	1.158,45	41,70
10.000	48.000	96,0	883,27	31,80
20.000	96.000	192,0	521,42	18,77
25.000	120.000	240,0	440,05	15,84
30.000	144.000	288,0	383,08	13,79
40.000	192.000	384,0	307,81	11,08
50.000	240.000	480,0	259,77	9,35
100.000	480.000	960,0	153,35	5,52
131.250	630.000	1260,0	124,72	4,48
150.000	720.000	1440,0	112,67	4,06
250.000	1200.000	2400,0	76,40	2,75

4.3.2 Custos Operacionais do Sistema

Os principais insumos para a operação do sistema são os reagentes, o ácido clorídrico e o clorito de sódio. O custo de manutenção do sistema é avaliado em 15% sobre o valor dos reagentes. O custo da eletricidade foi desconsiderado pelo fato de se tratar de uma constante de valor ínfimo não causando alteração no valor final da produção de ClO_2 .

4.3.2.1 Custos dos reagentes

Determinou-se o custo dos reagentes pela variação cambial da moeda Norte Americana (US\$), sendo que na ocasião o litro de ácido clorídrico foi cotado a US\$ 0,19 e o litro do clorito de sódio a US\$ 1,18. Segundo recomenda BI-O-CHLOR (1998), as vazões de ácido clorídrico (HCl) e do clorito de sódio (NaClO_2) para cada capacidade de geração podem ser estimadas pelas equações (4.5) e (4.6).

$$Q_{(\text{NaClO}_2)} = \frac{\text{MM}_{(\text{NaClO}_2)} \cdot \text{Cp}}{\text{MM}_{(\text{ClO}_2)} \cdot \text{DEN}_{(\text{NaClO}_2)}} \cdot 10 \quad (4.5)$$

Sendo:

$Q_{(\text{NaClO}_2)}$ = Vazão de clorito de sódio em L/h

$\text{MM}_{(\text{NaClO}_2)}$ = 5 mol vezes a massa molecular do clorito de sódio igual a 90,5 u

$\text{MM}_{(\text{ClO}_2)}$ = 4 mol vezes a massa molecular do dióxido de cloro igual a 67,5 u

$\text{DEN}_{(\text{NaClO}_2)}$ = densidade do clorito de sódio igual a 2500 g/L

Cp = carga de dióxido de cloro produzida em g/h

$$Q_{(\text{HCl})} = \frac{\text{MM}_{(\text{HCl})} \cdot \text{Cp}}{\text{MM}_{(\text{ClO}_2)} \cdot \text{DEN}_{(\text{HCl})}} \cdot 10 \quad (4.6)$$

Sendo:

$Q_{(\text{HCl})}$ = Vazão de ácido clorídrico em L/h

$\text{MM}_{(\text{HCl})}$ = 4 mol vezes a massa molecular do ácido clorídrico igual a 36,5 u

$\text{MM}_{(\text{ClO}_2)}$ = 4 mol vezes a massa molecular do dióxido de cloro igual a 67,5 u

$\text{DEN}_{(\text{HCl})}$ = densidade do ácido clorídrico igual a 1180 g/L

Cp = carga de dióxido de cloro produzida em g/h

A Tabela 15 resume a aplicação das equações (4.5) e (4.6) para diferentes populações considerando uma dosagem de 2,0 mgClO₂/L de dióxido de cloro para aplicação em efluentes domésticos tratados por lodos ativados.

TABELA 15 – Vazão de NaClO₂ e HCl para várias capacidades de geração.

População	Q efluente (m ³ /mês)	Capacidade (g ClO ₂ /hora)	Q NaClO ₂ (L/h)	Q HCl (L/h)
7.000	33.600	93,3	0,6250	0,4277
10.000	48.000	133,3	0,8928	0,6110
20.000	96.000	266,7	1,7857	1,2220
25.000	120.000	333,3	2,2321	1,5275
30.000	144.000	400,0	2,6785	1,8330
40.000	192.000	533,3	3,5714	2,4440
50.000	240.000	666,7	4,4642	3,0550
100.000	480.000	1333,3	8,9284	6,1101
131.250	630.000	1750,0	11,7185	8,0195
150.000	720.000	2000,0	13,3926	9,1651
250.000	1.200.000	3333,3	22,3210	15,2752

Os custos dos reagentes, clorito de sódio e do ácido clorídrico podem ser calculados pelo produto do número de horas de operação (720 horas) com a vazão dos reagentes mostrada na Tabela 15 pelo preço dos reagentes em litros. Assumindo-se o valor do litro para o clorito de sódio (NaClO₂) a R\$ 4,24 e do ácido clorídrico (HCl) a R\$ 0,68, conforme mostra a Tabela 16.

Para calcular o número de economias atendidas, utilizou-se a equação (4.7):

$$N = \frac{POP}{3,75} \quad (4.7)$$

Sendo:

N = número de economias atendidas

POP = população

Constante = 3,75 (número de habitantes por economia)

TABELA 16 – Custo mensal dos reagentes clorito de sódio e ácido clorídrico.

N	Custo mês NaClO ₂ (R\$)	Custo mês HCl (R\$)	Custo mês reagentes por economia (R\$)
1866,67	1.907,96	209,40	1,13
2666,67	2.725,66	299,15	1,13
5333,33	5.451,32	598,30	1,13
6666,67	6.814,15	747,87	1,13
8000,00	8.176,98	897,45	1,13
10666,67	10.902,64	1.196,60	1,13
13333,33	13.628,30	1.495,74	1,13
26666,67	27.256,60	2.991,49	1,13
35000,00	35.774,29	3.926,33	1,13
40000,00	40.884,91	4.487,23	1,13
66666,67	68.141,51	7.478,72	1,13

4.3.2.2 Custos operacionais totais

As totalizações dos custos operacionais são obtidas considerando-se o valor gasto na manutenção do equipamento é de 15% sobre a soma dos custos com os reagentes. A Tabela 17 mostra os valores de custos operacionais totais para cada população durante um mês.

TABELA 17 – Custo operacional total mensal.

População	Custo NaClO ₂ (R\$/mês)	Custo HCl (R\$/mês)	Custo manutenção (R\$/mês)	Custo total (R\$/mês)	Custo total por economias (R\$)
7.000	1907,96	209,40	317,60	2.434,97	1,30
10.000	2.725,66	299,15	453,72	3.478,53	1,30
20.000	5.451,32	598,30	907,44	6.957,06	1,30
25.000	6.814,15	747,87	1.134,30	8.696,33	1,30
30.000	8.176,98	897,45	1.361,16	10.435,59	1,30
40.000	10.902,64	1.196,60	1.814,89	13.914,12	1,30
50.000	13.628,30	1.495,74	2.268,61	17.392,65	1,30
100.000	27.256,60	2.991,49	4.537,21	34.785,31	1,30
131.250	35.774,29	3.926,33	5.955,09	45.655,71	1,30
150.000	40.884,91	4.487,23	6.805,82	52.177,96	1,30
250.000	68.141,51	7.478,72	11.343,03	86.963,27	1,30

4.3.3 Custos da Desinfecção

A Tabela 18 apresenta os custos de implantação e de operação para diferentes opções de desinfecção e populações estudadas.

Os custos referentes a implantação do sistema de desinfecção consideram as diferentes populações. O desinfetante cloro gasoso apresenta o menor custo em relação aos demais desinfetantes. O dióxido de cloro e o hipoclorito de sódio mostraram custos de implantação bem próximos, em média R\$ 11,52/hab. O dióxido de cloro é duas vezes mais barato em relação ao sistema de implantação com o ozônio. Enquanto que a implantação do sistema de desinfecção com a radiação UV e o ozônio são os que apresentam custos relativamente altos.

Ao contrário do custo de implantação, os custos de operação do sistema de desinfecção por radiação UV são aproximados ao do sistema de desinfecção utilizando o cloro gasoso. O custo de operação do dióxido de cloro aproximou-se do hipoclorito de sódio, enquanto que o custo de operação do ozônio mostrou ser de todas a opção mais cara.

TABELA 18 – Custos de implantação e de operação para processos de desinfecção.

Desinfecção	ETE	População (hab)	Vazão (L/s)	Custo de implantação (R\$)	Custo unitário de implantação (R\$/hab)	Custo de operação (R\$/m ³)
Radiação UV	Pesquisa PROSAB, PR ¹	5.844	10,0	128.433,00	21,98	0,034
Ozônio	Pesquisa PROSAB, SC ²	10.000	18,5	181.120,00	18,11	0,091
Hipoclorito de sódio	Assis Chateaubriand, PR ³	14.425	40,0	210.000,00	14,56	0,089
Dióxido de cloro*	Insular, SC (Pesquisa) ²	10.000	18,5	84.800,00	8,48	0,072
Cloro gasoso	ETE Sul Maringá-PR ¹	124.000	310,0	600.000,00	4,83	0,024
Cloro gasoso	Apucarana, PR ¹	71.000	137,0	270.000,00	3,80	0,012

Fonte: Adaptado e Modificado de JORDÃO e SOBRINHO (2003).

4.3.4 Estudo de Caso

O valor estimado para a desinfecção do efluente inclui a aquisição por financiamento do gerador de dióxido de cloro. Para o valor desse custo adota-se como exemplo a ETE Insular de Florianópolis. Admitindo-se uma vazão de projeto 875,0 m³/h, dosagem de dióxido

¹ Após UASB + filtro biológico percolado.

² Após lodos ativados por aeração prolongada.

³ Após UASB + lagoa.

* Dados estimados referentes a dissertação.

de cloro 2,0 mg/L, num prazo de financiamento de 10 anos com taxa de juros anuais de 12% num total de 35.000 economias atendidas.

4.3.4.1 Custo financeiro para aquisição do gerador de dióxido de cloro

Determinou-se o custo financeiro para aquisição do gerador a ser instalado na ETE Insular a partir da carga consumida de dióxido de cloro 1750 gClO₂/h, com vazão do efluente de 875,0 m³/h e uma dosagem de 2,0 mgClO₂/L para desinfecção do efluente doméstico. Para o cálculo de amortização do gerador sobre as economias adota-se o sistema de prestações constantes, admitindo-se um juro mensal de 0,949% am (12% aa) e um prazo de 10 anos (120 prestações). Considerou-se o preço do gerador com capacidade de 2160 gClO₂/h o valor de R\$ 205.629,12. O valor da prestação do financiamento pode ser calculado pela equação (4.7), segundo BASSANI (2003).

$$PRE = \frac{VP \frac{i}{100} \left(1 + \frac{i}{100}\right)^n}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^n - 1} \quad (4.7)$$

Sendo:

PRE = valor da prestação mensal (R\$)

VP = valor do gerador (R\$)

I = taxa mensal de juros

n = número de prestações mensais

Aplicando-se a equação (4.7), considerando 35000,00 economias atendidas, chega-se num valor de prestação de R\$ 2.877,89 ou R\$ 0,08 por economias.

4.3.4.2 Custos operacionais

Os custos operacionais do sistema representam a soma dos valores com reagentes e a manutenção. Adotando as equações (4.5) e (4.6) para o cálculo do custo mensal para cada reagente, clorito de sódio e ácido clorídrico, chega-se a R\$ 35.774,29 e R\$ 3.926,33,

respectivamente. Finalmente, o custo com a manutenção foi estimado como sendo 15% da soma dos custos com os reagentes, sendo R\$ 5.955,09. Portanto, o custo operacional do sistema ficou em R\$ 1,30 por economia mês.

4.3.4.3 Custos totais

Somando-se os custos de financiamento e operacionais alcança-se um valor total mensal de R\$ 1,38 por economias mês ou R\$ 0,37 por habitante.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho demonstra a desinfecção de efluentes sanitários tratados pelo processo de lodos ativados por aeração prolongada utilizando o dióxido de cloro como desinfetante. Os experimentos foram realizados em fluxo contínuo e em tempo de detenção hidráulico total de 30 minutos.

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Todos os parâmetros físico-químicos do efluente desinfetado atenderam o padrão de lançamento de esgotos em águas superficiais como recomenda a norma NBR 13969 da ABNT somente para doses aplicadas entre 1,0 e 2,0 mgClO₂/L. O residual remanescente de dióxido de cloro para as doses aplicadas entre 2,5 e 3,0 mgClO₂/L está acima dos valores recomendados pela USEPA. Além disso, o pH do efluente desinfetado entre as doses 2,5 e 3,0 mgClO₂/L encontraram-se abaixo do que recomenda a ABNT.

A desinfecção de esgotos domésticos tratados por lodos ativados com altos teores de coliformes fecais na ordem de $2,60 \cdot 10^4$ NMP/100mL pelo dióxido de cloro mostrou ser eficiente. A dose ótima obtida foi de 2,0 mgClO₂/L, concentração esta recomenda na literatura por AISSE et al. (2003), pois houve eficiência de 99,94% (3,23 log) na remoção dos coliformes fecais num tempo de contato de 15 minutos, enquanto que para o mesmo tempo de contato a dose de 1,5 mgClO₂/L a eficiência foi de 99,69% (2,51 log). Além disso, no tempo de contato de 20 minutos a dose de 2,0 mgClO₂/L atingiu 100% (8,00 log) de eficiência na remoção de coliformes fecais, ou seja, a esterilização dos coliformes no efluente. Porém, para uma dosagem 1,5 mgClO₂/L em 20 minutos de contato a eficiência apenas alcançou o percentual de 99,75% (2,59 log). Portanto, ambas dosagens atendem todos os padrões de lançamento de esgotos em águas superficiais e seu reuso, conforme exige a norma NBR 13969 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A análise de custo da desinfecção referentes a implantação do sistema, considera as diferentes populações e dosagem de 2,0 mgClO₂/L. O dióxido de cloro e o hipoclorito de sódio apresentam custos de implantação próximos, em média R\$ 11,52/hab. O custo de implantação do sistema de dióxido de cloro é menos oneroso em relação ao sistema de desinfecção por ozônio e também ao sistema de desinfecção por radiação UV. Porém o

desinfetante cloro gasoso apresenta o custo de implantação menor em relação ao dióxido de cloro.

O estudo de caso realizado incluiu a aquisição do gerador de dióxido de cloro por financiamento num período de 10 anos, com juros de 12% ao ano e num total de 35.000 economias atendidas, ou seja, uma comunidade estimada de 131.250 habitantes. O custo de financiamento do gerador de dióxido de cloro e a operação da unidade de desinfecção apresentam um valor total mensal de R\$ 1,38 por economia ou R\$ 0,37 por habitante.

Sugere-se que sejam realizados os seguintes estudos:

- Utilização de outros microrganismos indicadores, uma vez que alguns países adotam além das bactérias do grupo coliformes, indicadores da presença de vírus e protozoários.
- Determinação e quantificação dos subprodutos resultantes da desinfecção de efluentes sanitários tratados com o dióxido de cloro, como os íons clorito (ClO_2^-) e clorato (ClO_3^-).
- Aplicação de testes toxicológicos no efluente, antes e após a desinfecção, para verificar se a toxicidade está associada ao desinfetante químico ou ao tratamento anterior a desinfecção do efluente.

REFERÊNCIAS

ACHER, A.; FISCHER, E.; TURNHEIM, R.; MANOR, Y. Ecologically friendly wastewater disinfection techniques. **Water Research**, v. 31, n. 6, p. 1398 - 1404, 1997

AGUIAR, A. M.; NETO, M. L. F.; BRTIO, L. L. A.; REIS, A. A.; MACHADO, P. M. R.; SOARES, A. F. S.; VIEIRA, M. B. C. M.; LIBÂNIO, M. Avaliação do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de águas com turbidez e cor moderadas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 37-57, 2002

AISSE, Miguel Mansur; FILHO, Bruno Coraucci; NETO, Cícero Onofre de Andrade; JÜRGENSEN, Décio; LAPOLLI, Flávio Rubens; MELO, Henio Normando de Souza; PIVELI, Roque Passos; LUCCA, Sérgio João de. Cloração e descloração. In: GONÇALVES, Ricardo Franci. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2003, cap. 4, p. 113-168.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). **Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies**. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1990. 1194 p.

AQUASTEL. **Propriedades dos desinfetantes da água**. Disponível em: <<http://www.aquastel.com.br/interna/comparacao.htm>>. Acesso em: 11 janeiro 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969**: tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997. 60 p.

ATAQUES com antraz podem ter origem nos EUA. **Público**, Lisboa, 04 dez. 2001. Disponível em: <http://dossiers.publico.pt/atentado_estados_unidos/html/058_06.html>. Acesso em 17 jan. 2002.

BABBIT, Harold Eaton; DOLAND, James J.; CLEASBY, John L. **Abastecimento de água**. São Paulo: Edgar Blücher, 1973. 592 p.

BAIRD, Colin. **Environmental chemistry**. New York: W. H. Freeman and Company, 1995. 484p.

BARBEAU, B.; BOULOS, L.; DESJARDINS, R.; COALLIER, J.; PRÉVOST, M. Examining the use of aerobic spore-forming bacteria to assess the efficiency of chlorination. **Water Research**, v. 33, n. 13, p. 2941-2948, 1999.

BASSANI, L. **Desinfecção de efluente sanitário por ozônio: parâmetros operacionais e avaliação econômica**. 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BASSANI, L.; CAMARGO, J. G.; HASSEMER, M. E. N.; LAPOLLI, F. R. Desinfecção de efluentes sanitários por ozônio: parâmetros operacionais e avaliação econômica. In: ENCONTRO SOBRE APLICAÇÕES AMBIENTAIS DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS, 2., Campinas, 2003. **Anais...** Campinas: UNICAMP/IQ/LQA, 2003. 115p. p. 39.

BIO. Pesquisa nacional de saneamento básico: o saneamento no Brasil do ano 2000, Rio de Janeiro: ABES. Abr/jun. 2002. Suplemento.

BI-O-CHLOR. **Manual de instalação e operação**. Firenze: Sodi Scientifica, 1999. 38 p.

BRAGHETTA, A; JACANGELO, J; TRUSSELL, R. R; MEHEUS, J. The practice of chlorination: application, efficacy, problems and alternatives. **IWSA**, ago., p. 1-9, 1997.

BRUSA, M. A.; PERISSIOTTI, L. J.; CHURIO, M. S.; COLUSSI, A. J. Mechanism of chlorine dioxide photodissociation in condensed media. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 101, n. 2-3, p. 105-111, 1996.

CALVOSA, L.; MONTEVERDI, A.; RINDONE, B.; RIVA, G. Ozone oxidation of compounds resistant to biological degradation. **Waste Research**, v. 25, n.8, p. 985-993, 1991.

CAMPOS, N. C.; QUIROZ, C. C. Riesgos microbiológicos asociados al uso de piscinas públicas. **Agua Latinoamérica**, v. 3, n. 2, p. 16-20, 2003.

CHANG, C. Y.; HSIEH, Y. S.; LIN, Y. M.; WANG, K. H. The organic precursors affecting the formation of disinfection by-products with chlorine dioxide. **Chemosphere**, v.44, n. 5, p.1153-1158, 2001

CIENFUEGOS, Freddy; VAITSMAN, Delmo. **Análise Instrumental**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000. 606 p.

CLOSUR. **Deu no jornal do Brasil**. Disponível em: <<http://www.clorosur.com/publicacoes/abiclors2.html>>. Acesso em 29 novembro 2002.

CUNHA, O. A. de. Unmineralized water for cosmetic industry. **Cosmetics & Toiletries**. v. 3, p. 22-28, 1991.

DABROWSKA, A.; SWIETLIK, J.; NAWROCKI, J. Formation of aldehydes upon ClO₂ disinfection. **Water Research**, v. 37, n. 5, p. 1161-1169, 2003.

DACACH, Nelson Gandur. **Saneamento básico**. 3. ed. Rio de Janeiro: EDC-ED. Didática e Científica, 1990. 293 p.

DALHAMN, T. Chlorine dioxide: toxicity in experimental animals and industrial risks. **AMA Archives of Industrial Health**. v. 15, n.2, p. 101-107, 1957.

DANIEL, Luiz Antônio. **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 155 p.

Di BERNARDO, Luiz. **Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento**. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 140 p.

_____. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993. 503 p.

DIETRICH, A. M.; ORR, M. P.; GALLARGHER, D. L.; HOEHM, R. C. Taste and odors associated with chlorine dioxide. **Journal American Water Works Association**, v. 92, n. 6, p. 82-88, 1992.

EDWARDS, Charles Henry; PENNEY, David E. **Cálculo com geometria analítica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1997. 1184 p.

ELKINS, Hervey B. **The chemistry of industrial toxicology**. 2. ed. New York: Wiley and Sons. 94 p.

EUA: Senado atrasa limpeza de antraz. **Globo News**, Rio de Janeiro, 06 nov. 2001. Disponível em: <<http://globonews.globo.com/GloboNews/article/0,6993,A152119-915,00.html>>. Acesso em: 12 ago. 2002.

GANIEV, I. M.; TIMERGHAZIN, Q. K.; KHALIZOV, A. F.; ANDRIYASHINA, N. M.; SHERESSHOVETS, V. V. Complexes of chlorine dioxide with nitroxyl radicals. **Tetrahedron Letters**, v. 40, n. 25, p. 4737-4740, 1999.

GAY, Kathlyn. **Ozone**. New York: Franklin Watts, 1989. 128p.

HAAS, C. N.; JOFFE, J. Disinfection under dynamic conditions: modification of Hom's model for decay. **Environmental Science and Technology**, v. 28, n. 7, p. 1367-1369, 1994.

HART, F. L.; HOM, V. **Reactor dynamics – wastewater disinfection**. Disponível em: <http://cee.wpi.edu/ce_faculty/faculty_pages/hart_pdf_files/MOP.pdf>. Acesso em: 25 março 2003.

HASSEMER, M. E. N. **Tratamento de efluente têxtil: processo físico-químico com ozônio e floculação em meio granular**. Florianópolis, 2000. 151f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

HOFMANN, Ron; ANDREWS, Robert. C; YE, Quanfang. **Chlorine dioxide for drinking water disinfection: dose, demand, and by-products**. Disponível em: <andrews@civ.utoronto.ca> em: 23 maio 2003

HONGVE, D.; ÅKESSON, G. Spectrophotometric determination of water color in hazen units. **Water Research**, v. 30, n. 11, p. 2771 – 2775, 1996.

HOYOS, R. Progreso de la filtración casera en América Latina. **Agua Latinoamérica**, v. 2, n. 1, p. 44-45, 2002.

JIRKA, A. M.; CARTER, M. J. **Analytical Chemistry**, v. 47, n. 8, p. 1937-1975, 1975.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; SOBRINHO, Pedro Alem. Análise crítica. In: GONÇALVES, Ricardo Franci. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2003, cap. 5, p. 409-422.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 720 p.

JUNLI, H.; LI, W.; NANQUI, R.; FANG, M. Disinfection effect of chlorine dioxide on bacteria in water. **Water Research**, v. 31, n. 3, p. 607-613, 1997.

KEEVIL, C. W.; MACKERNESS, C. W.; COLBOURNE, J. S. Biocide treatment of biofilms. **International Biodeterioration**, v. 26, p. 169-179, 1990.

KNOCKE, W. R.; VAN BENSCHOTEN, J. E.; KEARNEY, M. J.; SOBORSKI, A. W.; RECKHOW, D. A. Kinetics of manganese and iron oxidation by potassium permanganate and chlorine dioxide. **Journal American Water Works Association**, v. 83, n. 6, p. 80-87, 1991.

KUN, Z.; HUF, C.; GUANGHE, L.; ZHAOCHANG, L. *In situ* remediation of petroleum compounds in groundwater aquifer with chlorine dioxide. **Water Research**, v. 32, n. 5, p. 1471-1480, 1998.

KUNZ, A.; FREIRE, R. S.; ROHWEDDER, J. J. R.; DURAN, N.; MANSILLA, H.; RODRIGUEZ, J. Assembly and optimization of a system for ozone utilization in laboratory scale. **Química Nova**, v. 22, n. 3, p. 425-428, 1999.

LANGLAIS, Bruno; RECKHOW, Davis A.; BRINK, Deborah R. **Ozone in water treatment: application and engineering**. Michigan: Lewis Publishers, 1991. 298 p.

LAPOLLI, F. R. **Prosab III**, tema 2. João Pessoa, MCT/FINEP/CNPQ/CEF, 2002. (Relatório parcial de pesquisa).

LEHNINGER, Albert L; NELSON, David L.; COX, Michael M. **Princípios de bioquímica**. 3. ed. São Paulo: Sarvier, 2002. 975p.

LEME, Francilio Paes. **Teoria e técnicas de tratamento de água**. São Paulo: CETESB, 1979. 424 p.

LEVENSPIEL, Octave. **Chemical reaction engineering**. 2. ed. New York: John Wiley & So, v. 2, 1976. 578 p.

LI, H.; FINCH, G. R.; SMITH, D. W.; BELOSEVIC, M. Sequential inactivation of *Cryptosporidium parvum* using ozone and chorine. **Water Research**, v. 35, n. 18, p. 4339 - 4348, 2001.

LI, Z. W.; YU, Z.; CAI, X.; GAO, M.; CHAO, F. Trihalomethanes formation in water treated with chlorine dioxide. **Water Research**, v. 30, n. 10, p. 2371-2376, 1996.

LIBERTI, L; NOTARNICOLA, M; PETRUZZELLI, D. Advanced treatment for municipal wasterwater reuse in agriculture. UV disinfection: parasite removal end by- product formation. **Desalination**, v. 152, n. 1-3, p. 315 - 324, 2002.

LIN, S. H.; YEH, K. L. Looking to treat wastewater? Try ozone. **Chemical Engineer**, v. 100, n. 5, p. 112-116, 1993.

MACÊDO, J. A. B. **Determinação de trihalometanos em águas de abastecimento público e de indústria de alimentos**. 1997. 90f.. Viçosa, Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa.

_____. **Subprodutos do processo de desinfecção de água pelos derivados clorados – disinfection byproducts – DBP**. Juiz de Fora: Macedo, 2001. 67 p.

MACÊDO, Jorge Antônio Barros de; BARRA, Marcelo Macedo. **Information of the disinfection process for the use of having flowed chlorinated, in function of the pH**. Disponível em: <jmacedo@fbio.ufjf.Br> em: 15 janeiro 2003.

MARTINS, A. M S.; MAZZOLA, P. G.; PENNA T. C. V. Eficácia de desinfetantes. **Controle de Contaminação**, n. 29, p. 36-40, 2001.

MASTEN, S.J.; DAVIES, S. H. R. The effectiveness of ozonation in wastewater treatment. **Environmental Science and Technology**. V. 28, n.4, p. 180-186, 1994.

MATOS, B. A. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo**. 2001. 172f.. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MAY, N. L.; SAHGAL, P. N. Generation Of Ozone In Two-Dielectric Ozonizer. **The Chemical Engineering**, v. 40, p. 175, 1989.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 920 p.

MIRÓN, F. D. D.; ORTEGA, L. S. Desinfección de agua con luz ultravioleta. **Agua Latinoamérica**, v. 2, n.2, p. 46-51, 2002.

MOTA, Suetônio. **Introdução à engenharia ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1997. 280p.

NARKIS, N.; KATZ, A.; ORSHANSKY, F.; KOTT, Y.; FRIEDLAND, Y. Disinfection of effluents by combination of chlorine dioxide and chlorine. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 5-6, p. 105-114, 1995.

NOTTINGHAM, O. C. S. Projeto e construção de um gerador de ozônio de baixo consumo para aplicações de pequeno porte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., Joinville, 2003. **Anais...** Joinville: ABES, 2003. 479 p. 267 p.

NUVOLARI, Ariovaldo; TELLES Dirceu D'Alkmin; RIBEIRO, José Tarcísio; MIYASHITA, Nelson Junzo; RODRIGUES, Roberta Baptista; ARAUJO, Roberto de. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 519 p.

OLIVEIRA, E. C. M. **Desinfecção de efluentes sanitários tratados através da radiação ultravioleta**. 2003. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). **Virus humanos en el agua, aguas servidas y suelo**. Ginebra: OMS, 1979, p. 1-52. (Serie de Informes Técnicos, n. 639).

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS) & ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). **La desinfección del agua**. Washington: OPS, 1999. 20 p.

OXIDATION disinfection. [S.I]: Lulea Tekniska Universitet, 199?. 40 slides, color.

PARGA, J. R.; SHUKLA, S. S.; PEDROZA, F. R. C. Destruction of cyanide waste solutions using chlorine dioxide, ozone and titania sol. **Waste Management**, v. 23, n. 2, p. 183-191, 2003.

PAULET, G.; DEBROUSSES, S. Action of a discontinuous exposure to chlorine dioxide on the rat. **Archives des Maladies Professionnelles de Médecine du Travail et de Sécurité Sociale**, v. 35, n. 9, p. 797-803, 1974.

PERNITSKY, D. J.; FINCH, G. R.; HUCK, P. M. Disinfection kinetics of heterotrophic plate count bacteria in biologically treated potable water. **Water Research**, v. 29, n. 5, p. 1235 - 1241, 1995.

PESSÔA, S. B.; MARTINS, A. V. Noções sobre as principais técnicas usadas em parasitologia. In: _____. **Parasitologia Médica**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1982. p. 814-850.

POLYTECHNIC. **Wastewater disinfection**. Disponível em: <<http://cities.poly.edu/environment/gradedu/ce739/ce739lab/disinfection.html>>. Acesso em: 12 dezembro 2002.

PRÉDIO do Senado será descontaminado de novo. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 16 dez. 2001. Disponível em: <<http://www5.estado.com.br/editorias/2001/12/16/int021.html>>. Acesso em: 10 nov. 2003.

PRETORIUS, P. C.; PRETORIUS, W. A. Disinfection of purified sewage effluent with monochloramine. **Water S.A**, v. 25, n. 4, p. 463-471, 1999.

REIFF, Fred M.; WITT, Vicent M. Selección de los sistemas de desinfección. In: _____. **Manual de desinfección : guía para la selección de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y El Caribe**. Washington: OMS, 1995. p.185-203.

RIBEIRO, L. **Aplicação de dióxido de cloro como alternativa para desinfecção de esgotos sanitários tratados através de lagoas de estabilização**. 2001. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa, Florianópolis.

ROOK, J. J. Haloforms in drinking water. **Water Treatment and Examination**, v. 68, n. 3, p. 168, 1976.

RUFFELL, K. M.; RENNECKER, J. L.; MARIÑAS, B. J. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with chlorine dioxide. **Water Research**, v. 34, n. 3, p. 868-876, 2000.

SAO PAULO (Estado). Secretaria dos Serviços e Obras públicas. **Desinfecção de águas**. São Paulo, CETESB, 1974. 210 p.

SILVA, P. F. R.; NETO, A. A.; BARBOSA, L. A. D.; SOBRAL, L. G. S. **Tratamento eletroquímico de rejeitos da indústria carbonífera, visando seu aproveitamento sustentável, com a produção de enxofre**. Rio de Janeiro: CETEM, 2002. 13 p. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicação/serie_anais_X_jic_2002/Plinio.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2003.

STUMM, Werner; MORGAN, James. **Aquatic chemistry**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995, 1024 p.

SOUTHWEST BIOTECHNOLOGY AND INFORMATICS CENTER (SWBIC). **Disinfection**. Disponível em: <<http://www.swbic.org/education/env-engr/disinfectio/disinfection.html>>. Acesso em: 29 abril 2001.

STANDARD Methods for the Examination of Water & Wastewater. 20. ed. Washington: American Public Health Association, 1999. 1325 p.

TARRÁN, E. P. Desinfección por luz ultravioleta. **Agua Latinoamérica**, v. 2, n.2, p. 28-35, 2002.

TEUNIS, P. F. M.; MEDEMA, G. J.; KRUIDENIER, L.; HAVELAARA, H. Assessment of the risk of infection by *Cryptosporidium* or *Giardia* in drinking water from a surface water source. **Water Research**, v. 31, n. 6, p. 1333-1346, 1997.

TRUSSELL, R. R.; UMPHRES, M. D. The formation of trihalomethane. **Journal of the American Water Works Association**, v. 11, n. 11, p. 604-610, 1978.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Federal Register Environmental documents. **Disinfectants and Disinfection Byproducts**. Disponível em: <http://www.epa.gov/EPA-WATER/1996/May/Day-14/pr_20972DIR/Other/julya.txt.html>. Acesso em 02 fevereiro 2004.

_____. **Microbial and disinfection byproduct rules simultaneous compliance guidance manual**: EPA 815-R-99-015. Washington, 1999a. p. 2.1-5.23.

_____. **Wastewater technology fact sheet ultraviolet disinfection:** EPA 832-F-99-064. Washington, 1999b, p. 1-7.

_____. **Wastewater technology fact sheet chlorine disinfection:** EPA 832-F-99-062. Washington, 1999 c, p. 1-8.

_____. **Alternative disinfectants and oxidants:** EPA 815-R-99-014. Washington, 1999d. p. 4.1-4.34.

_____. **Preliminary risk assessment for pathogens in landfilled municipal sewage sludge:** EPA 600-R-94-110. Washington, 1993 p. 1-30.

URRUCHI, W. I.; SASSE, J.; TAVARES, M. H. C. S.; OTANI, C.; COUTINHO, A. R. O Gerador de Ozônio e Suas Aplicações no Tratamento de Efluentes. In: ENCONTRO SOBRE APLICAÇÕES AMBIENTAIS DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS, 1., Águas de São Pedro, 2001. **Anais...** Águas de São Pedro: UNICAMP/IQ/LQA, 2001. 50 p. p.44.

VAIDA, V.; GOUDJIL, K.; FLANDERS, B. N. Comparisons between the reactivity of chlorine dioxide in the gas phase and water solution. **Journal Molecular Liquids**, v. 61, n. 1-3, p. 133-152, 1994.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996a. 243 p.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios básicos de tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996b. 211 p.

WATANABE, T.; ISHII, T.; YOSHIMURA, Y.; NAKAZAWA, H. Determination of chlorine dioxide using 4-aminoantipyrine and fenol by flow injection analysis. **Analytica Chimica ACTA**, v. 341, n. 2-3, p. 257-262, 1997.

WERDEHOFF, K.S.; SINGER, P. C. Chlorine dioxide effects on THMFP, TOXFP and the formation of inorganic by-products. **Journal American Water Works Association**. v.79, n.9, p.107, 1987.

WINDER, C. The toxicology of chlorine. **Environmental Research**, v. 85, n. 2, p. 105-114, 2001.