

APLICAÇÃO DE MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA PARA A DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLORO RESIDUAL LIVRE EM UM SETOR DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.

Marcelo José Trimboli², Edevar Luvizotto Junior¹

Resumo: O artigo apresenta o emprego de um modelo matemático de qualidade da água como ferramenta de auxílio na determinação da concentração de cloro residual livre, como garantia da qualidade da água fornecida após manutenção das redes e adutoras de água tratada. Estudo de caso do setor de abastecimento de água da Vila Liberdade na cidade de Jundiaí em São Paulo, Brasil.

Abstract: This paper present one water quality modeling like an aid tool on determination of the remaining free chlorine concentration as guaranteeing the water quality provided after network and water main drinkable water maintenance. Case study: the water supply sector Vila Liberdade in Jundiaí city, São Paulo state, Brasil.

Palavras Chave : Modelo matemático de qualidade da água, decaimento de cloro, teste da garrafa.

Keywords: Mathematical water quality model, chlorine decay, bottle test.

¹ Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Recursos Hídricos – Cidade Universitária Zeferino Vaz – Campinas – São Paulo (Brasil) – Tel. 55 19 3788-2354 – E-mail: edevar@fec.unicamp.br

² Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Recursos Hídricos – Cidade Universitária Zeferino Vaz – Campinas – São Paulo (Brasil); DAE S/A – Água e Esgoto Jundiaí - Rod. Ver. Geraldo Dias 1500 – Jundiaí – São Paulo (Brasil) – Tel. 55 11 4589-1472 – E-mail: marcelo.trimboli@terra.com.br

INTRODUÇÃO

Um modelo matemático computacional para o monitoramento da qualidade da água tratada é importante ferramenta de auxílio junto às empresas de saneamento básico. Com o reconhecimento da grande importância do saneamento básico para os países em desenvolvimento com grandes adensamentos populacionais, não só a implantação de redes de abastecimento de água e coleta de esgotos é o bastante para garantir qualidade de vida e bons níveis de saúde pública. Como o crescimento das cidades nem sempre vem acompanhado da infra-estrutura mínima necessária, principalmente no fornecimento de água e coleta de esgoto, normalmente em bairros pobres da periferia das cidades originários de invasões e ocupações de terras. As ocupações de morros e áreas de favelas onde o espaço necessário nas vias de acesso é insuficiente para a implantação de redes de abastecimento de água e coleta de esgotos, tendo estas tubulações praticamente lado a lado na estreitas vielas destes bairros, onde por vezes durante manutenção nas tubulações pode ocorrer a contaminação da água de abastecimento, sendo necessária concentração de cloro residual livre mínima conforme determinado na Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde da República do Brasil.

Jundiaí, cidade brasileira do interior do estado de São Paulo, com uma população de aproximadamente 350 mil habitantes, conta com cerca de 99% da cidade atendida pelo fornecimento de água tratada e 98% dos esgotos coletados (96% dos quais tratados), possui uma estação de tratamento de água (ETA) na região central da cidade, ETA Engº Ruy Chaves, responsável pelo tratamento e fornecimento de água para praticamente toda a cidade, possui também a ETA Eloy Chaves, utilizada apenas para reforço no abastecimento local no bairro de mesmo nome. A DAE S/A Água e Esgoto, empresa municipal de saneamento básico, tem o setor de Vila Liberdade como piloto para a implantação de novas tecnologias no gerenciamento do sistema de abastecimento de água potável e é neste setor onde foram aplicados os conceitos de modelagem de qualidade da água. Com cerca de 500 ligações domiciliares de água, todas as tubulações trocadas por tubos em PVC com menos de cinco anos de idade, topografia com pequeno desnível, todos os hidrômetros trocados, micro e macro medições confiáveis com um índice de perdas físicas em torno de 8,0%.

A base de dados para o modelo de qualidade foi feita com o software EPANET 2.0, com base no modelo hidráulico calibrado por GUMIER (2005), para o mesmo setor de abastecimento em estudo.

A IMPLANTAÇÃO DA MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA EM UM SETOR DE ABASTECIMENTO - ESTUDO DE CASO

Com o modelo hidráulico calibrado o passo seguinte é a determinação dos coeficientes de decaimento do cloro no sistema de abastecimento. Os coeficientes representativos das reações ao longo do sistema de distribuição de água são: k_b = coeficiente de decaimento da concentração de cloro residual livre no seio do escoamento (1/T) e k_w = coeficiente de decaimento da concentração de cloro residual livre devido às reações que podem ocorrer na interface entre o escoamento e as paredes da tubulação (1/T).

Para a determinação da taxa de decaimento da concentração de cloro no seio do escoamento foi utilizado o chamado “teste da garrafa” com base em Rossman *et al.*(1994) e Walski (2001), porém adaptado para as condições e equipamentos disponíveis.

Procedeu-se a coleta de uma amostra de água da estação de tratamento em etapa anterior a cloração de desinfecção. Esta amostra foi dividida em três garrafas e adicionado hipoclorito de sódio até atingir uma concentração de 2,0 mg/l em todas. As garrafas, de cor âmbar, foram mantidas fechadas nos intervalos entre as análises, duas em temperatura ambiente e uma delas em estufa com temperatura controlada em 30 °C, antes de cada nova medição da concentração do cloro residual livre as garrafas foram agitadas procurando minimizar a perda por evaporação do cloro. Os intervalos entre as análises não foram constantes, procurou-se avaliar o procedimento visando facilitar a repetição do mesmo no ambiente da empresa de saneamento aproveitando da jornada de trabalho dos analistas. A Tabela 01 abaixo apresenta os valores encontrados durante o período de aproximadamente sete dias utilizados no “teste da garrafa”.

Tabela 1. Resultados da aplicação do “teste da garrafa”, adaptado.

AMOSTRA "1" - Estufa 30°C			AMOSTRA "2"			AMOSTRA "3"		
Tempo (min)	Temp (° C)	C (mg/l)	Tempo (min)	Temp (°C)	C (mg/l)	Tempo (min)	Temp (°C)	C (mg/l)
0	30	1,81	0	23	1,81	0	23	1,81
180	30	1,70	180	23	1,70	180	23	1,70
240	30	1,62	240	23	1,65	240	23	1,65
1200	30	1,24	1200	23	1,49	1200	23	1,58
1320	30	1,21	1320	23	1,43	1320	23	1,55
1500	30	1,20	1500	23	1,41	1500	23	1,53
2640	30	0,94	2640	22	1,24	2640	22	1,38
2880	30	0,90	2880	22	1,17	2880	22	1,37
4080	30	0,77	4080	23	1,08	4080	23	1,21
4200	30	0,72	4200	23	1,06	4200	23	1,20
4380	30	0,69	4380	23	1,01	4380	23	1,16
5520	30	0,47	5520	23	0,85	5520	23	1,03
6960	30	0,43	6960	23	0,75	6960	23	0,94
8400	30	0,42	8400	23	0,72	8400	23	0,83
9840	30	0,36	9840	21	0,56	9840	21	0,52

Com os resultados obtidos com o “teste da garrafa” encontram-se valores de kb através da equação de decaimento de primeira ordem:

$$C = C_0 \cdot e^{-k_b \cdot t} \quad (1)$$

onde : C é a concentração do cloro no instante t em (mg/l), C₀ a concentração inicial de cloro em (mg/l), t é o tempo em minutos e k_b a constante de decaimento do cloro (1/min).

Isolando-se a constante de decaimento kb na equação (1), obtém-se:

$$k_b = -\frac{1}{t} \cdot \ln \left(\frac{C}{C_0} \right) \quad (2)$$

Substituindo os valores de C e t para a equação (2) obtêm-se uma série de valores de k_b a serem analisados, determinando assim um valor representativo para o consumo de cloro no seio do escoamento. A Tabela 2 abaixo apresenta os valores de k_b para as três amostras estudadas.

Tabela 2. Valores de k_b

AMOSTRA "1" - Estufa 30°C			AMOSTRA "2"			AMOSTRA "3"		
Tempo	C	k_b	Tempo	C	k_b	Tempo	C	k_b
(min)	(mg/l)	(1/min)	(min)	(mg/l)	(1/min)	(min)	(mg/l)	(1/min)
0	1,81	----	0	1,81	----	0	1,81	----
180	1,70	----	180	1,70	----	180	1,70	----
240	1,62	0,000000	240	1,65	0,000000	240	1,65	0,000000
1200	1,24	0,000223	1200	1,49	0,000085	1200	1,58	0,000036
1320	1,21	0,000221	1320	1,43	0,000108	1320	1,55	0,000047
1500	1,20	0,000200	1500	1,41	0,000105	1500	1,53	0,000050
2640	0,94	0,000206	2640	1,24	0,000108	2640	1,38	0,000068
2880	0,90	0,000204	2880	1,17	0,000119	2880	1,37	0,000065
4080	0,77	0,000182	4080	1,08	0,000104	4080	1,21	0,000076
4200	0,72	0,000193	4200	1,06	0,000105	4200	1,20	0,000076
4380	0,69	0,000195	4380	1,01	0,000112	4380	1,16	0,000080
5520	0,47	0,000224	5520	0,85	0,000120	5520	1,03	0,000085
6960	0,43	0,000191	6960	0,75	0,000113	6960	0,94	0,000081
8400	0,42	0,000161	8400	0,72	0,000099	8400	0,83	0,000082
9840	0,36	0,000153	9840	0,56	0,000110	9840	0,52	0,000117

O tratamento adotado para os valores encontrados acima foi média aritmética entre os valores das três amostras, de onde obtém-se: $k_b = 0,000116$ (1/min).

Aplicando o valor obtido e considerando $k_w = 0$ para uma primeira calibração, isto devido às características da tubulação, PVC com menos de 5 anos de idade, e da aplicação de solução de poliortofosfato que cria uma película neutralizante entre a superfície das paredes da tubulação e o líquido escoado para inibir a formação de sedimentação de ferro e manganês. Estas considerações são experimentais e ainda carecem de mais resultados para confirmar a possibilidade ou não de desconsiderar o coeficiente k_w para tubulações novas em PVC com dosagem de poliortofosfato, situação esta que simplifica a determinação de k_w e conseqüentemente o valor final da taxa de consumo de cloro ao longo da rede de abastecimento.

Figura 1. Vista aérea da cidade de Jundiaí e do Setor Vila Liberdade.

Fonte Google Earth



Figura 2 . Detalhe do setor Vila Liberdade



UTILIZAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO CALIBRADO

O modelo hidráulico utilizado como base para a aplicação do modelo de qualidade foi utilizado por Gumier (2005) para pesquisa de fugas no mesmo setor de abastecimento no período de agosto/2004. A simulação para calibração do modelo hidráulico foi executada para o horário das 5:00 horas, tendo por objetivo minimizar os efeitos da operação diária do sistema de abastecimento, tais como: consumos irregulares, manobras de registros e demais ações que alterariam as condições típicas do setor em estudo. Os valores resultantes da calibragem encontram-se na Tabela 3, tendo um erro de -0,17% que está dentro da faixa de erro admissível segundo Walski(1998) que é de $\pm 3,0\%$.

Tabela 3. Cargas nos nós 14 e 19 da rede monitorada para calibragem do modelo hidráulico

NÓS	Carga Monitorada (23/08 – 5h) H* (m.c.a.)	Carga Calculada (m.c.a.)	Diferença	Erro Admissível segundo WALSKI (1998)
14	737,76	738,99	-0,17%	± 3 %
19	739,00	738,99	0,00%	

RESULTADOS OBTIDOS DO MODELO DE QUALIDADE

Foram analisadas amostras coletadas em quatro pontos de monitoramento de qualidade da água, no setor Vila Liberdade, comparados com os valores simulados no software EPANET 2.0, tendo como valor de qualidade inicial as concentrações de cloro residual livre presentes no reservatório de origem, na saída da estação de tratamento de água, denominado R5 e apresentados na Tabela 4. O gráfico da Figura 3 apresenta os valores de concentração de cloro nos pontos monitorados nas datas estudadas.

Figura 3. Valores das análises nas datas estudadas nos pontos monitorados.

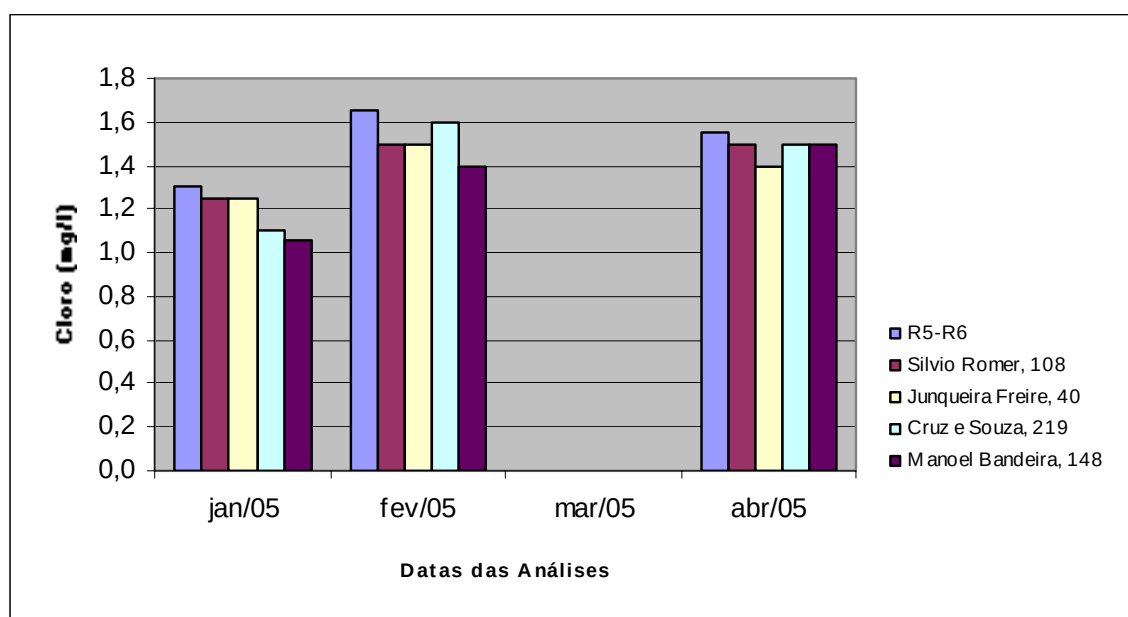


Tabela 4. Valores das análises de cloro nos pontos de monitoramento

ANÁLISES - RESERVATÓRIO R5							
Data	Hora	Chuvas	CRL	Cor	Turbidez	Ferro	Mn
06/01/05	8:31	sim	1,25	0	0,25	0,01	0,006
06/01/05	13:24	sim	1,40	1	0,14	0,02	0,001
24/02/05	8:05	não	1,60	5	0,13	0,01	0,013
24/02/05	14:50	não	1,70	0	0,15	0,01	0,005
19/04/05	8:15	não	1,50	0	0,15	0,01	0,001
19/04/05	13:50	não	1,50	0	0,23	0,01	0,007
ANÁLISES - Rua Junqueira Freire, 40							
Data	Hora	Chuvas	CRL	Cor	Turbidez	Ferro	Mn
06/01/05	9:41	sim	1,20	0	0,07	0,00	0,005
24/02/05	10:26	não	1,50	0	0,14	0,00	0,003
19/04/05	10:55	não	1,40	0	0,27	0,00	0,001
ANÁLISES - Rua Manoel Bandeira, 148							
Data	Hora	Chuvas	CRL	Cor	Turbidez	Ferro	Mn
06/01/05	9:46	sim	1,06	0	0,26	0,00	0,004
24/02/05	10:30	não	1,40	0	0,18	0,00	0,006
19/04/05	11:00	não	1,50	0	0,18	0,00	0,000
ANÁLISES - Rua Cruz e Souza, 219							
Data	Hora	Chuvas	CRL	Cor	Turbidez	Ferro	Mn
06/01/05	9:50	sim	1,10	0	0,13	0,00	0,006
24/02/05	8:05	não	1,60	5	0,13	0,00	0,008
19/04/05	8:15	não	1,50	0	0,15	0,00	0,001
ANÁLISES - Rua Silvio Romero, 108							
Data	Hora	Chuvas	CRL	Cor	Turbidez	Ferro	Mn
06/01/05	9:57	sim	1,20	0	0,16	0,00	0,006
24/02/05	10:18	não	1,50	0	0,19	0,00	0,005
19/04/05	11:15	não	1,50	0	0,11	0,00	0,001

Os valores acima foram introduzidos no software EPANET 2.0 e como resultados encontramos os valores apresentados na Tabela 5, como valores de calibragem para um primeiro instante. Estes valores valem ser checados e discutidos pois são resultados de primeira instância, cabendo ainda uma revisão das características físicas da rede de abastecimento e da adutora que fornece água para o setor em estudo. A influência, do tempo de percurso do escoamento até a entrada do setor de abastecimento, ainda não foi verificada estando ainda em fase de calibragem do modelo de qualidade do trabalho aqui apresentado.

A Figura 4 apresenta o percurso do escoamento em sua origem na estação de tratamento até a entrada do setor Vila Liberdade, aproximadamente 3000 metros de extensão.

Figura 5. Caminhamento da adutora da estação de tratamento até entrada do setor

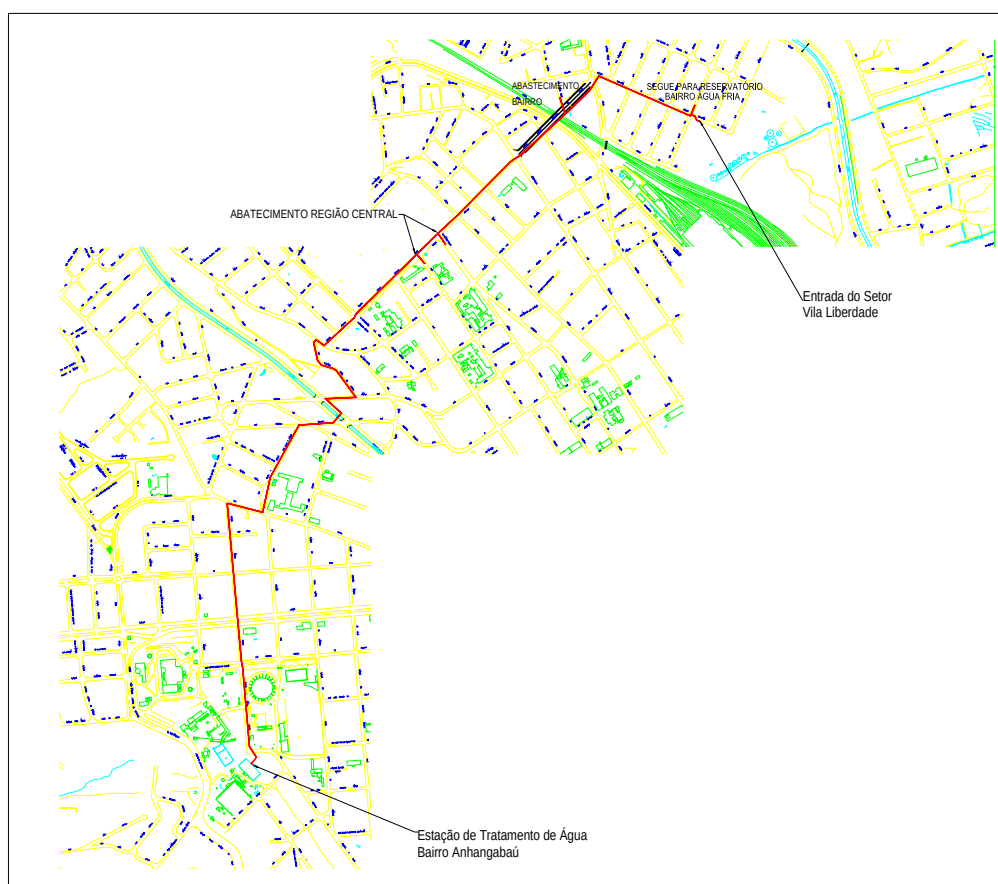


Tabela 5. Valores da primeira calibragem do modelo de qualidade

Simulação para o dia 06/01/2005 – Cloro na ETA = 1.20 mg/l
Tratamento Estatístico dos Dados de Calibração para CLORO

NÓ	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N17	1	1.20	1.19	0.014	0.014
N35	1	1.06	1.19	0.130	0.130
N49	1	1.20	1.20	0.000	0.000
N61	1	1.10	1.20	0.100	0.100
Rede	4	1.14	1.19	0.061	0.082

Simulação para o dia 24/02/05 – Cloro na ETA = 1.60 mg/l
Tratamento Estatístico dos Dados de Calibração para CLORO

NÓ	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N17	1	1.50	1.58	0.082	0.082
N35	1	1.40	1.59	0.187	0.187
N49	1	1.50	1.60	0.100	0.100
N61	1	1.60	1.60	0.000	0.000
Rede	4	1.50	1.59	0.092	0.114

Simulação para o dia 19/04/05 – Cloro na ETA = 1.50 mg/l
Tratamento Estatístico dos Dados de Calibração para CLORO

NÓ	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N17	1	1.40	1.48	0.083	0.083
N35	1	1.50	1.49	0.008	0.008
N49	1	1.50	1.50	0.000	0.000
N61	1	1.50	1.50	0.000	0.000
Rede	4	1.48	1.49	0.023	0.042

CONCLUSÕES

Os valores encontrados na Tabela 5, são o resultado parcial deste estudo, cabe ainda simulação exaustiva durante um período de tempo maior para levar em conta a sazonalidade das características físico-químicas da água durante o período de chuvas e secas.

A aplicação dos modelos de qualidade de água em redes de abastecimento é uma ferramenta de percepção e análise do comportamento do sistema de abastecimento, conferindo ao projetista a capacidade de aprimoramento da concepção das redes uma vez que se torna muito evidente após a simulação situações em que a velocidade do escoamento tende a zero durante os períodos de pequena demanda ou durante a noite quando os setores tipicamente residenciais têm consumos praticamente nulos. O trabalho aqui apresentado visa enfatizar a importância da concepção de sistemas de abastecimento de água quando o principal além de fornecer água aos munícipes é fornecer água com garantia de qualidade e potabilidade. O modelo está sendo aprimorado para levar em conta sua operação e a cada intervenção de redes e adutoras antecipar as ações seguintes minimizando a exposição da água tratada a agentes patogênicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS e MATERIAL DE CONSULTA

AZEVEDO NETO, J. M. de – **Tratamento de água de abastecimento**. EDUSP.1966.

CHAUDRY, M. H.; ISLAM, M. R. - **Modelizacion de la calidad del agua en redes de agua a presión**. Washington State University, EEUU.

CLARK, R. M. *et al.* **Modeling Chlorine and the Formation of Disinfection By-Products (DBPs) in Drinking Water**. Ohio, 1999.

GUMIER, C.C. – **Aplicação de modelo matemático de simulação-otimização na gestão de perda de água em sistema de abastecimento**, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2005

HAESTAD METHODS, **Advanced Water Distribution Modeling and Management**, 2004.

HART, F.L. *et al.* **Chlorine Residual Distribution in a Municipal Water Network.** In. NEWWA Computer Symposium, 1992.

MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL . **Portaria M.S. nº 518 de 25 de março de 2004.** Publicado no Diário Oficial da União nº 59 de 26/03/2004, Seção 1, pág. 266-270.

NEVES, M.; CASTRO, P. **Chlorine Decay in Water Distribution System – Case Study Lousada Network.** University of Porto, Portugal, Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry, 2004.

ÖZDEMİR, O.N. *et al* – **A Chlorine Decay Simulator in Water Supply Networks.** Departamento of Civil Engineer, Gazi University, Ankara Turkey, 1999.

ÖZDEMİR, O. N.; GER, M. **Realistic Numerical Simulation of Chlorine Decay in Pipes.** Department of Civil Engineer, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1997.

ROSSMAN, L. A. - **Modeling water quality in distribution systems.** U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA.

ROSSMAN, L. A. *et al* – **EPANET 2.0 Manual do Utilizador.** Water Supply and Water Resources Division, USA, 2002.

SILVA, K.R.G. da; KISHI, R. T. – **Modelagem matemática do cloro em redes de distribuição de água.** Revista Técnica da SANEPAR, Curitiba, v.19, n.19, p.26-40, jan/jun 2003.

VIEIRA, P.; COELHO, S. T.; LOUREIRO, D. – **Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modeling chlorine decay in water supply.** Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA – 53.7 – 2004.