

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

DECAIMENTO DE CLORO INDUZIDO POR CONTAMINAÇÃO MICROBIANA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Dhiogo Okumoto Macedo¹ & Johannes Gérson Janzen²

Resumo: A modelagem computacional de qualidade de água em redes de distribuição tem ganhado cada vez mais visibilidade, uma vez que se mostra como uma excelente ferramenta de gestão quando aliada ao monitoramento realizado em campo. Sua adequada aplicação auxilia compreender o comportamento do sistema como um todo, subsidiando importantes informações para o setor (empresas, concessionárias, órgãos de regulação e fiscalização). Nesse sentido, a simulação computacional da qualidade de água se mostra pertinente quando buscamos atender a padrões mais rigorosos de regulação e também a expectativa e saúde dos clientes. A literatura disponível demonstra uma carência de aplicações confiáveis que descrevam a qualidade de água em redes, tanto em condições normais, mas especialmente diante de eventos de contaminação. O presente estudo teve como objetivo utilizar as relações cinéticas determinadas em sistemas descontínuos (expressas pelo modelo de primeira ordem paralela) para estimar respostas em sistemas contínuos, como redes de distribuição, através de modelagem computacional. Injeções de contaminação foram simuladas utilizando a extensão de múltiplas espécies, EPANET-MSX, e os impactos causados pela contaminação microbiana (*E.coli*) foram confrontados com o monitoramento real de uma rede de água em escala laboratorial.

Palavras-chave: desinfetante residual, vulnerabilidade da qualidade de água, EPANET-MSX.

MICROBIAL CONTAMINANT-INDUCED CHLORINE DECAY IN WATER DISTRIBUTION NETWORK

Abstract: Computer modeling of water quality in distribution networks has gained more and more visibility, as it is an excellent management tool when combined with field monitoring. Its application adjusts the understanding of the behavior of the system as a whole, supporting important information for this field (companies, utilities, regulatory and inspection agencies). In this sense, a water quality simulation is pertinent when we seek to meet stricter regulatory standards as well as customer expectations and health. The available literature demonstrates a lack of reliable applications that describe the water quality in networks, both under normal conditions, but especially in the face of contamination events. This study aimed to use the kinetic relationships determined in discontinuous systems (expressed by the parallel first-order model) to estimate responses in continuous systems, such as distribution networks, through computational modeling. Contaminant injections were simulated using the multi-species extension, EPANET-MSX, and the impacts caused by microbial contamination (*E.coli*) were compared with real monitoring of a laboratory-scale distribution network.

Keywords: residual disinfectant, water quality vulnerability, EPANET-MSX.

1) Doutorando no Programa de Pós-graduação em Tecnologias Ambientais - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande – MS, Brasil; dhiogo.macedo@gmail.com

2) Professor Adjunto da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande – MS, Brasil; johannesjanzen@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O objetivo das redes de abastecimento de água é fornecer aos consumidores a quantidade adequada de água, sem comprometer sua qualidade. Para isso, o processo de desinfecção não busca apenas a inativação de patógenos na etapa de tratamento, mas também visa garantir a presença de desinfetante residual contra uma possível contaminação ao longo da distribuição. A concentração de cloro na rede de distribuição de água (RDA) abaixo de 0,2 mg/L favorece o risco de doenças transmitidas pela água em virtude de contaminação acidental e recrescimento microbiano. Já uma elevada concentração de cloro na RDA relaciona-se com maior formação de subprodutos de desinfecção (*desinfection byproducts* - *DBP*), sendo alguns deles considerados cancerígenos (Karadirek *et al.*, 2014).

Detectar alterações na qualidade da água distribuída após intervenções em redes vem sendo objeto de estudo em países desenvolvidos, e certamente deve ser explorado nos países em desenvolvimento, onde muitas vezes não são observadas as medidas adequadas de higiene e limpeza nos trabalhos em campo (Lambertini *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2015; Blokker *et al.* 2018). Investigações do impacto de contaminações sobre parâmetros de qualidade de água demonstraram que o monitoramento da concentração de cloro residual na rede trata-se de uma estratégia viável no tocante a detecção de eventos críticos (acidentais ou intencionais; biológico e/ou químico) (Yang, 2016).

Helbling e VanBriesen (2008) realizaram experimentos com sistema de distribuição em escala laboratorial, aplicando na rede injeções controladas de contaminante (*E.coli*) e paralelamente monitorando o residual de cloro no final do sistema. Obtiveram empiricamente as ordens de grandezas do decaimento de cloro residual induzido pela presença do contaminante. Anteriormente os mesmos autores realizaram experimentos com amostras em batelada, em que analisaram a demanda de cloro ao longo do tempo em soluções cloradas contendo diferentes concentrações de *E.coli* (Helbling e VanBriesen, 2007). A decaimento da concentração de cloro ao longo do tempo podem ser descritos por expressões cinéticas, ajustando-se, por exemplo, o modelo de primeira ordem paralela aos dados obtidos nos experimentos em batelada. Esse modelo já foi utilizado para modelar o decaimento de cloro induzido por bactéria *Listeria monocytogenes* (Virto *et al.*, 2004); por efluentes de água residuais (Haas e Karra, 1984); e por matéria orgânica presente na massa d'água (*bulk water*) em sistemas de distribuição (Powell *et al.*, 2000). A expressão do modelo é apresentada na equação 1:

$$C_t = C_{x,evento}(1 - Q) * \exp(-k_1t) + C_{x,evento}Q * \exp(-k_2t) \quad (1)$$

onde C_t = concentração de cloro após tempo t ; $C_{x,evento}$ = concentração de cloro no tempo t_{evento} e no momento da contaminação; t = tempo; $(1-Q)$ = fração de cloro que reage rapidamente com o contaminante; k_1 = taxa de reação para a fração de cloro que reage rapidamente com contaminante; Q = fração de cloro que reage lentamente com o contaminante; e k_2 = taxa de reação para a fração de cloro que reage lentamente com contaminante.

A hipótese adotada por Helbling e VanBriesen (2008; 2009) é de que contaminantes inseridos na rede irão reagir com o cloro residual a uma taxa equivalente àquela determinada nos experimentos em batelada, permitindo dessa maneira utilizar os dados cinéticos de sistemas descontínuos para modelar as reações em sistema de distribuição (contínuo). Entretanto, eles não validaram seus dados de monitoramento na rede de distribuição, mas apresentaram resumidamente a comparação estatística entre as respostas obtidas pelo sensor instalado na rede e as respostas do modelo cinético (numericamente).

Para que se desenvolvam estratégias assertivas no âmbito de resposta a emergências, de posicionamento de sensores de qualidade em redes, e de sistemas de alerta de contaminação (*Warning contamination Systems - WCS*), observa-se a necessidade de aprimorar a modelagem computacional de qualidade de água em redes de distribuição, tanto em condições normais como também em eventos de contaminação. O presente estudo teve como objetivo avaliar o uso de relações cinéticas determinadas em sistemas descontínuos (modelo de primeira ordem paralela ajustado aos dados de experimentos em batelada) para estimar respostas do desinfetante residual em redes de distribuição. Assim, injeções de contaminação foram simuladas computacionalmente e os impactos causados pela presença de contaminante biológico (*E.coli*) foram confrontados com o monitoramento real em uma rede de água de escala laboratorial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Decaimento de cloro induzido por contaminação – reatores em batelada

Foram selecionados dois conjuntos de dados relativos a experimentos em batelada que investigaram o decaimento de cloro em amostras contendo diferentes concentrações de contaminante *E.coli* e de cloro inicial. As condições de cultura e análise podem ser consultadas em detalhes nos estudos desenvolvidos por Helbling e VanBriesen (2007) e por Abdallah (2015). A Tabela 1 expõe as condições dos experimentos em batelada realizados pelos autores.

Tabela 1 - Condições iniciais dos experimentos em batelada para avaliar o decaimento de cloro das amostras contaminadas.

Autor	Concentração de <i>E.coli</i> (CFU/ml)	Concentração de Cloro Inicial (mg/L)			Volume (ml)
Helbling e Van Briesen (2007)	$\sim 10^7$	0,2	0,4	0,8	200
Abdallah (2015)	$\sim 10^7$	0,3	0,5	1,0	500

2.2. Rede de distribuição para simulação computacional

Utilizou-se a rede de distribuição de água em escala laboratorial que foi construída como parte do projeto SmartWater4Europe (SW4EU), localizada no Laboratório de Engenharia Civil e Geoambiental da Universidade de Lile (Abdallah, 2015). A rede, com comprimento total de 61 m, é composta por tubulações de PVC com diâmetro interno de 16 mm (material plástico revestido de alumínio), sendo abastecida por bombeamento a partir do reservatório existente. O sensor de cloro (*s::can micro::station*, *s::can GmbH*) foi instalado a uma distância de 41 metros do dispositivo de injeção dos contaminantes. A vazão da rede definida para os experimentos foi de 2,7 L/min e uma pressão de 2 bars.

Com a mencionada vazão, o maior tempo de contato disponível foi de aproximadamente 3 minutos. A partir dos experimentos em batelada, observa-se que as suspensões de *E.coli* reagem rapidamente com o cloro livre e normalmente atingem a demanda máxima de cloro após cerca de 20 minutos. Em virtude dessa limitação física e buscando elevar o tempo de contato da reação ao longo da rede, a cada experimento de injeção optou-se por injetar um volume de 2 litros de solução contendo contaminante com concentração conhecida. Realizaram-se as injeções com intervalos de 15 minutos. O esquema fornecido na Figura 1 ilustra a rede em questão.

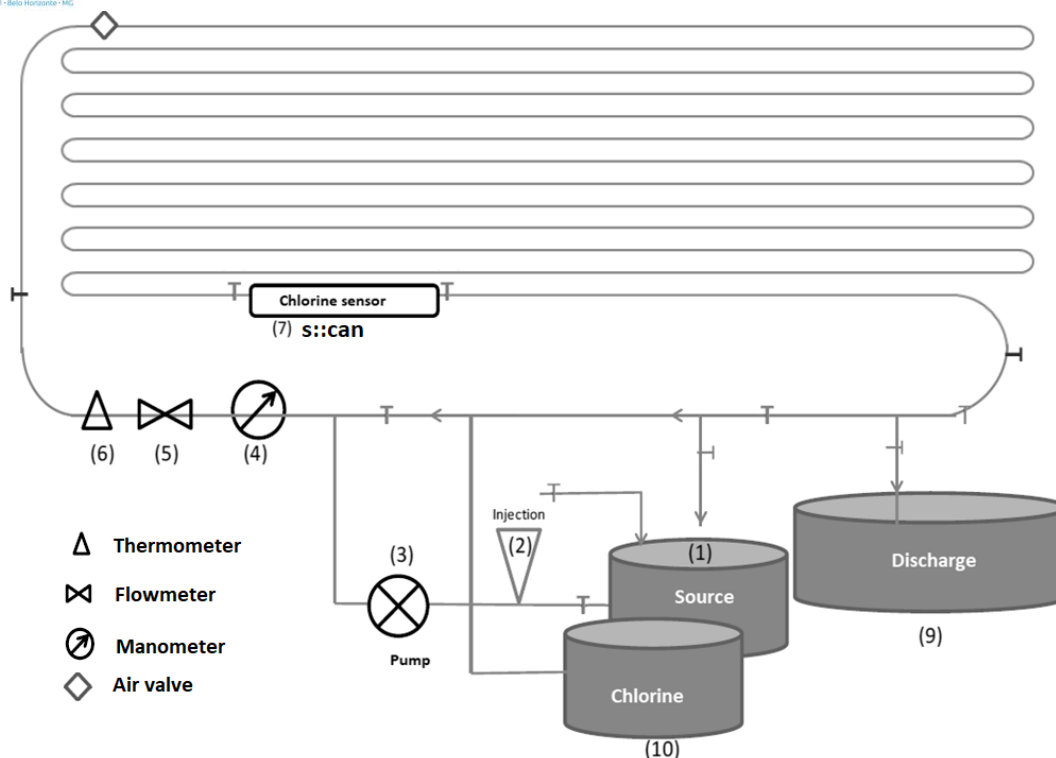


Figura 1 - Diagrama da rede de distribuição em escala laboratorial (Abdallah, 2015).

2.3. Modelagem computacional da contaminação

O modelo hidráulico computacional foi construído com o software EPANET 2.2 (U.S. EPA) e as simulações de contaminação foram realizadas utilizando a extensão de múltiplas espécies, EPANET-MSX (Shang *et al.*, 2011). Os cenários foram simulados em período estendido (*Extended Period Simulation*) com intervalo de cálculo (*time step*) de 1 minuto.

Para o cálculo em relação ao decaimento de cloro que ocorre naturalmente no volume de escoamento d'água transportado na rede de distribuição, *bulk decay* (k_b), foi selecionado o modelo de primeira ordem, como descrito na equação (2).

$$\frac{dC}{dt} = -K_b * C \quad (2)$$

onde C (M/L^3) = concentração de cloro; t (T) = tempo; K_b (1/T) = taxa de decaimento do cloro no volume de escoamento d'água. Para este estudo, adotou-se o valor de 0,27 1/dia para K_b (Monteiro *et al.*, 2014), com reatividade relativamente baixa. As interações do desinfetante com a parede da tubulação foram desprezadas, devido à escala da rede ser ligeiramente reduzida e dotada de material novo.

Para descrever os processos que ocorrem durante o evento de contaminação microbiana, foi utilizado o modelo de primeira ordem paralela (equação 1). Embora já demonstrado que esse modelo proporcione ajuste confiável aos dados experimentais (experimentos em batelada), isso não significa que ele represente os reais mecanismos de todas as reações que ocorrem. Alternativamente, ele procura simplificar as reações entre o cloro e a suspensão de células (ex.: *E.coli*) em uma fração (1-Q) que reage rapidamente (k_1) e uma fração (Q) que reage lentamente (k_2). Os parâmetros Q, k_1 e k_2 são dependentes da concentração de cloro inicial (C_0), da concentração da contaminação (X_0) e também da espécie do contaminante.

Helbling e VanBriesen (2009) sugeriram equações empíricas (3, 4 e 5) buscando estimar Q , k_1 e k_2 relativos a contaminações de *E.coli* com concentração na ordem de 10^7 CFU/mL. Conforme mencionado pelos autores, uma das vantagens de usar essas equações empíricas é a possibilidade de serem aplicadas diretamente em uma modelagem de qualidade da água para estimar os parâmetros do modelo de primeira ordem paralela nas diferentes concentrações de cloro, em qualquer nó do sistema de distribuição.

$$Q = 0.1255C_0^{-0.7667} \quad (3)$$

$$k_1 = 0.2556 + 0.0551C_0^{-1} - 0.0064C_0^{-2} + 0.0036C_0^{-3} \quad (4)$$

$$k_2 = -0.002 + 0.0135C_0 - 0.0126C_0^2 + 0.0053C_0^3 \quad (5)$$

Ao determinar o valor de Q , a solução analítica do modelo de primeira ordem paralela (Equação 1) pode ser representada como duas equações diferenciais de primeira ordem. As equações 6 e 7 apresentam as formas do modelo.

$$C_{0,fast} = C_{x,evento} * (1 - Q) \quad \rightarrow \quad \frac{dC_{fast}}{dt} = -k_1 * C_{fast} \quad (6)$$

$$C_{0,slow} = C_{x,evento} * Q \quad \rightarrow \quad \frac{dC_{slow}}{dt} = -k_2 * C_{slow} \quad (7)$$

Com os outros dois parâmetros (k_1 e k_2) do modelo de primeira ordem paralela e valores para $C_{0,fast}$ (C1) e $C_{0,slow}$ (C2) determinados, a extensão de múltiplas espécies (EPANET-MSX) pode ser utilizada para simular as reações de decaimento de cloro que ocorrem na rede de distribuição, tanto em relação ao volume de escoamento d'água (*bulk decay*) como as interações com o contaminante.

Para simular computacionalmente a intrusão da contaminação, foi estabelecido um traçador conservador, f_T , no Nó referente à intrusão com um valor inicial igual a 1,0. Essa abordagem é usada para rastrear a fração de água contaminada em rede de distribuição, seguindo a mistura nos nós e o consumo de água. Isso resulta em 4 reações que são consideradas no cálculo da modelagem do decaimento do cloro, tornando possível determinar a concentração em qualquer ponto da rede usando a expressão apresentada na equação 8.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= -k_b * C \\ \frac{dC_{fast}(C1)}{dt} &= -k_1 * C_{fast} \\ \frac{dC_{slow}(C2)}{dt} &= -k_2 * C_{slow} \\ \frac{df_T}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} C_t = C - (f_T * C_{x,evento} - C_1 - C_2) \quad (8)$$

As partes principais que compõem o arquivo de entrada do EPANET-MSX, *.msx*, contendo o conjunto de equações utilizadas para calcular dinamicamente o decaimento do cloro induzido pela presença de contaminação são ilustradas na Figura 2.


```
[SPECIES]
BULK Chlorine    MG    1.E-3 1.E-3    ;Free Chlorine per liter
BULK Ft         Fract 1.E-3 1.E-3    ;Conservative tracer
BULK C1         MG    1.E-3 1.E-3    ;Free chlorine fraction reacting in the initial phase of chlorine decay, per liter
BULK C2         MG    1.E-3 1.E-3    ;Free chlorine fraction reacting in the second phase of chlorine decay, per liter

[COEFFICIENTS]
CONSTANT Kb      0.000003125    ;CL bulk reaction rate coefficient, /sec - 0,27 /dia
CONSTANT K1      0.010737864    ;kinetic coefficient for the initial phase of chlorine decay, 1/min
CONSTANT K2      0.001632919    ;kinetic coefficient for the second phase of chlorine decay, 1/min

[TERMS]

[PIPES]
RATE Chlorine    -Kb*Chlorine-(Ft*Chlorine-C1-C2)
RATE C1          -K1*C1
RATE C2          -K2*C2
RATE Ft          0.0

[TANKS]
RATE Chlorine    -Kb*Chlorine-(Ft*Chlorine-C1-C2)
RATE C1          -K1*C1
RATE C2          -K2*C2
RATE Ft          0.0

[SOURCES]
;SourceType nodeID SpecieID Strength PatternID
CONCEN      1      Chlorine 0.234 1
CONCEN      39     C1        0.21692173 cont
CONCEN      39     C2        0.01707827 cont
CONCEN      39     Ft         1.0        cont
```

Definição das múltiplas espécies

Definição dos coeficientes de decaimento na massa d'água (bulk decay) e do decaimento induzido pelo contaminante (fase inicial e secundária, k1 e k2)

Expressões para cálculo de decaimento de cloro nas tubulações

Característica das fontes das espécies definidas previamente

Figura 2 - Exemplo de arquivo de entrada do EPANET-MSX (.msx) utilizando o modelo de primeira ordem paralela para expressar o decaimento de cloro induzido pela contaminação na rede.

3. RESULTADOS

3.1. Decaimento induzido por contaminante (*E.coli*) em diferentes concentrações de cloro

Os parâmetros do modelo de primeira ordem paralela, Q , k_1 e k_2 , foram calculados os através das equações empíricas propostas por Helbling e VanBriesen (2009) (equações 3, 4 e 5). A figura 3 apresenta o consumo de cloro induzido pelo contaminante que foi observado nos experimentos em bateladas realizados por Abdallah (2015) e Helbling e VanBriesen (2007), comparando-o ao decaimento de cloro predito pelo modelo para as diferentes concentrações iniciais de cloro.

Os parâmetros sugeridos pelas equações empíricas (3, 4 e 5) não proporcionaram bom ajuste aos experimentos em batelada realizados por Abdallah (2015) (Figura 3a).

3.2. Simulação computacional de contaminação na rede de distribuição

Com intuito de testar a hipótese de que as relações cinéticas entre cloro e contaminante determinadas em reatores em batelada podem ser usadas para prever decaimento residual induzido pelo contaminante em sistemas de distribuição, foram feitas simulações computacionais utilizando-se o modelo de primeira ordem paralela (equação 1). Na Figura 4 são expostos os resultados da concentração de cloro simulados com EPANET-MSX utilizando o modelo de primeira ordem paralela com os parâmetros sugeridos na literatura (equações 3, 4 e 5). Os resultados das simulações são comparados com o monitoramento real da concentração de cloro em resposta à injeção de contaminação na rede de água em escala laboratorial (Figura 1).

Observa-se que a concentração de cloro predita pelo modelo de primeira ordem, utilizando os parâmetros sugeridos na literatura, foi menor que o monitoramento real feito pelo sensor instalado na rede. Enquanto em condição normal a concentração de cloro na rede foi mantida em 0,234 mg/L, o decaimento induzido pela injeção de contaminante *E.coli* = 10^7 CFU/mL reduziu a concentração para 0,207 mg/L. Uma diferença de 0,027 mg/L, acima da incerteza do equipamento ($s::can$, resolução = 0,001 mg/L), sendo portanto de fato identificável. No entanto a resposta computacional apresentou em um decréscimo mais acentuado, alcançando o mínimo de 0,100 mg/L.

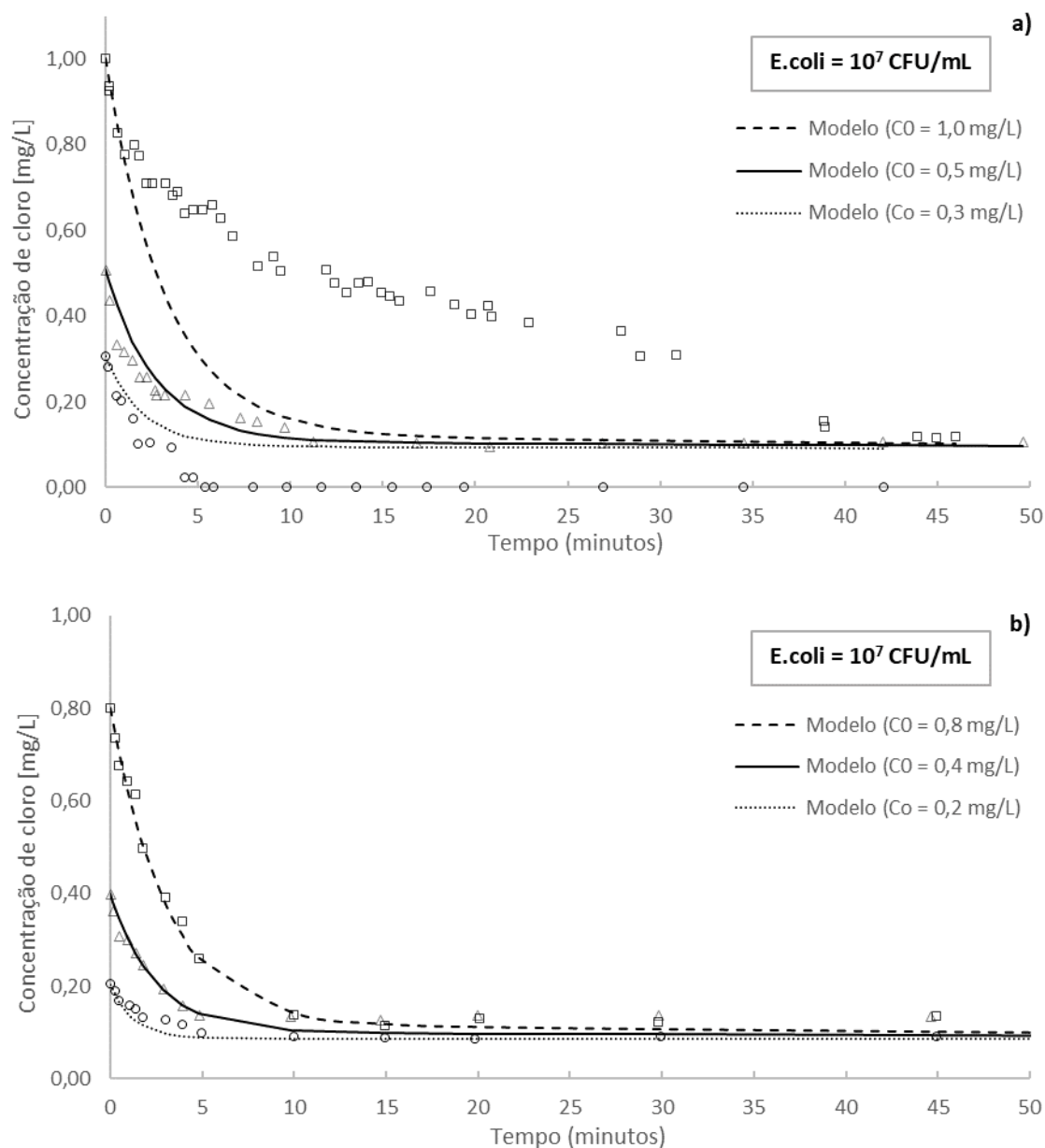


Figura 3 - Comparação entre o decaimento de cloro observado nos experimentos em batelada e as respostas do modelo de primeira ordem paralela com os parâmetros calculados (Q , k_1 e k_2) pelas equações 3, 4 e 5. a) Experimentos realizados por Abdallah (2015) (\square - Cloro inicial igual à 1,0 mg/L; Δ - Cloro inicial igual à 0,5 mg/L; \circ - Cloro inicial igual à 0,3 mg/L). b) Experimentos realizados por Helbling e VanBriesen (2007). (\square - Cloro inicial igual à 0,8 mg/L; Δ - Cloro inicial igual à 0,4 mg/L; \circ - Cloro inicial igual à 0,2 mg/L).

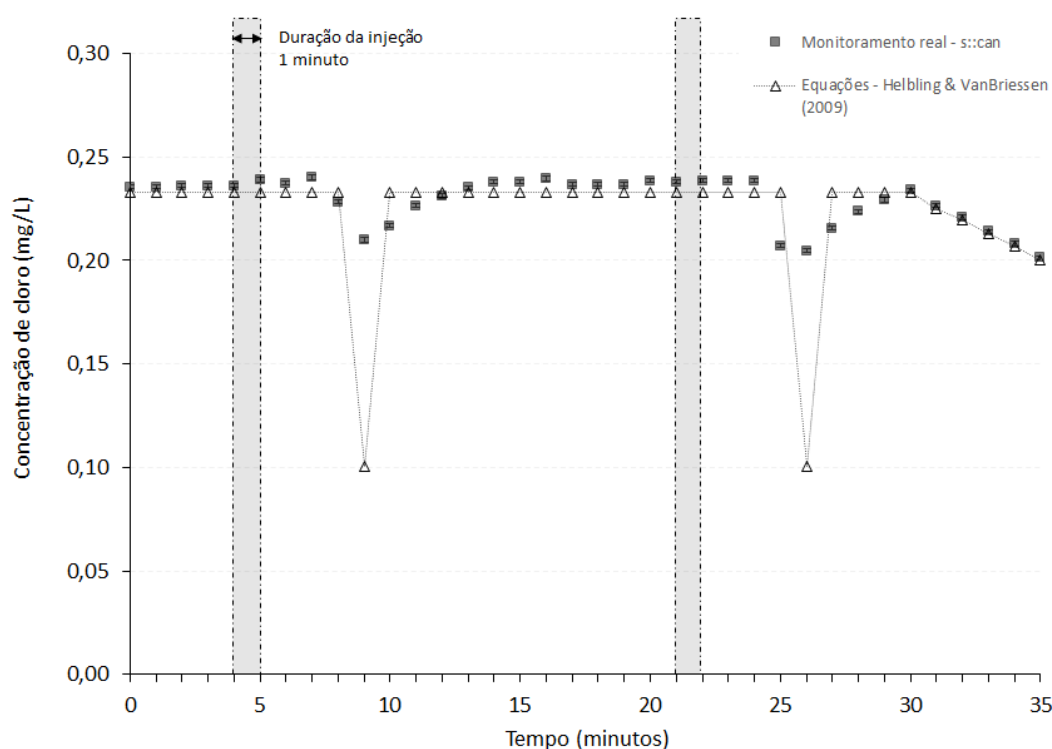


Figura 4 – Concentração de cloro simulada x Concentração de medida em resposta a injeção de contaminação por *E.coli* = 10^7 CFU/mL na rede de distribuição em escala laboratorial.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve o objetivo de testar a aplicabilidade do modelo de primeira ordem paralela para simular computacionalmente o decaimento de cloro induzido pela presença de contaminação por *E.coli* em redes de distribuição de água, sendo o modelo alimentado por parâmetros sugeridos na literatura. As equações empíricas existentes, desenvolvidas com base em experimentos em batelada (sistemas descontínuos), não haviam sido validadas quanto à adequação em estimar o comportamento do cloro em diferentes redes reais. As investigações que foram apresentadas contribuem com a modelagem do comportamento do cloro diante de eventos de contaminações, baseando-se nos resultados das simulações computacionais (EPANET-MSX) em comparação ao monitoramento real de um sistema de distribuição em escala laboratorial.

Conforme os resultados, observa-se que o modelo de primeira ordem paralela pode apresentar bom ajuste aos dados de experimentos em batelada (Figura 3b). Entretanto, a aplicação do modelo no estudo de caso selecionado demonstrou uma superestimava quanto ao decaimento de cloro induzido pela contaminação quando utilizadas equações empíricas sugeridas em literatura. A superestimava demonstrada aqui tem relação direta nos estudos relativos a sistemas de monitoramento de contaminação, reforços de desinfecção/cloração (*booster chlorination*) e posicionamento de sensores de qualidade em redes de água. Isso porque usualmente utilizam-se de modelagem computacional para o desenvolvimento destes temas.

O modelo de primeira ordem paralela que vem sendo utilizado para descrever o impacto causado por contaminação é composto por parâmetros estimados, os quais ainda necessitam de revisão em seus intervalos de valores. O fenômeno de decaimento de cloro induzido pela presença de contaminante em rede de água requer investigações complementares, que visem também a adequada implementação das cinéticas de reações obtidas de experimentos em batelada, para estimar respostas em sistemas contínuos, como o transporte em tubulações de água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte nas diferentes etapas das pesquisas realizadas (Programa PROBRAL CAPES/DAAD n°. 17/2015).

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, A. (2015). “*Reseaux d’eau potable: surveillance de la qualite de l’eau par des capteurs en ligne*”. PhD thesis, University of Lille, France.
- ABDALLAH, A; I. SHAHROUR; M. SADEK; M. ABDALLAH (2015). “*Real-time detection of microbial intrusion in potable water using advanced devices*”. WIT Transactions on The Built Environment, Vol 168. doi:10.2495/SD150451.
- BLOKKER., M; SMEETS, P.; MEDEMA, G. (2018). “*Quantitative microbial risk assessment of repairs of the drinking water distribution system*”. Microbial Risk Analysis. 8, pp. 22–31.
- HAAS, C., KARRA, S. (1984). “*Kinetics of wastewater chlorine demand and exertion*”. Journal Water Pollution Control Federation 56, pp. 170–173.
- HELBLING, D. E. & VANBRIESEN, J. M. (2007). “*Free chlorine demand and cell survival of microbial suspensions*”. Water Research., 41 (19), pp. 4424–4434.
- HELBLING, D.E. & VANBRIESEN, J.M. (2008). “*Continuous monitoring of residual chlorine concentrations in response to controlled microbial intrusions in a laboratory-scale distribution system*”. Water Research. 42, pp. 3162-3172.
- HELBLING, D.E. & VANBRIESEN, J.M. (2009). “*Modeling Residual Chlorine Response to a Microbial Contamination Event in Drinking Water Distribution Systems*”. Journal of Environmental Engineering, Vol. 135, pp. 918-927.
- KARADIREK, I.E.; KARA, S.; MUHAMMETOGLU, A.; MUHAMMETOGLU, H.; SOYUPAK, S. (2014). “*Management of chlorine dosing rates in urban water distribution networks using online continuous monitoring and modeling*”. Urban Water Journal, DOI: 10.1080/1573062X.2014.992916.
- LAMBERTINI, E.; SPENCER, S.K.; KIEKE JR, B.A.; LOGE, F.J.; BORCHARDT, M.A. (2011). “*Virus contamination from operation and maintenance events in small drinking water distribution systems*”. Journal of Water and Health 9 (4), pp. 799-812.
- MONTEIRO, L.; FIGUEIREDO, D.; DIAS, S.; FREITAS, R.; COVAS, D.; MENAIA, J.; COELHO, S.T. (2014). “*Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX*”. 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2013.
- POWELL, J.C.; WEST, J.R.; HALLAM, N.B.; FORSTER, C.F.; SIMMS, J. (2000). “*Performance of various kinetic models for chlorine decay*”. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE 126 (1), pp. 13–20.
- SHANG, F.; J. G. UBER.; L. ROSSMAN. (2011). “*EPANET Multi-Species Extension Software and User’s Manual*”. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/C-10/002, 2011.
- VIRTO, R., ALVAREZ, I., CONDON, S., AND RASO, J. (2004). “*Relationship between inactivation kinetics of a *Listeria monocytogenes* suspension by chlorine and its chlorine demand*”. Journal of Applied Microbiology, 97, 1281–1288.

- YANG, J; LECHEVALLIER, M. W.; TEUNIS, P. F. M; XU, M. (2011). “*Managing risks from virus intrusion into water distribution systems due to pressure transients*”. Journal of Water and Health. 09-2, pp. 291-304.
- YANG, X & BOCCELLI, D. (2016). “*Dynamic Water-Quality Simulation for Contaminant Intrusion Events in Distribution Systems*”. Journal of Water Resources Planning and Management, 04016038, pp. 1-12.