

Simulação da qualidade de água em redes de distribuição empregando o EPANET-MSX

Water quality simulation in distribution network using EPANET-MSX

Roberto Suse* | Andréa Manami Yoshikawa | Edevar Luvizotto Junior

Data de entrada: 06/03/2013 | Data de aprovação: 28/03/2014

DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.126>

Resumo

Um estudo do programa EPANET-MSX é relevante no cenário nacional, pois se trata de importante ferramenta para avaliação da qualidade do produto transportado ao longo da rede de distribuição de água potável. Simulações de casos hipotéticos foram realizadas tendo por base as condições: decaimento de cloro de múltiplas origens, oxidação, transferência de massa e adsorção do arsênio, recrescimento bacteriano com inibição de cloro e decomposição da cloramina. A análise do programa por meio da aplicação em estudo de casos hipotéticos objetivou contribuir para ampliar o conhecimento sobre os problemas da modelação computacional da qualidade de água em sistemas de abastecimento e distribuição de água.

Palavras-chave: EPANET; EPANET-MSX; modelação computacional; qualidade de água.

Abstract

A detailed study of computer programs EPANET standard version and EPANET-MSX, extended version for multiple species, becomes relevant since, only recently have simulations quality water come to be recognized on the national scene as a important tool for assessing the quality of the product carried across the network. Simulations of hypothetical cases were carried out relying on the conditions: multi-source chlorine decay; oxidation, mass transfer, and adsorption of arsenic; bacterial regrowth with chlorine inhibition; and chloramine decomposition. A detailed analysis of these programs and application in studies of hypothetical cases aimed to contribute to enlarge knowledge about the problems of computer modeling quality of water supply systems and water distribution.

Key-words: EPANET; EPANET-MSX; computer modeling, water quality.

Roberto Suse*

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. Mestrando em Engenharia Civil - Área Saneamento e Ambiente na Universidade Estadual de Campinas.

Andrea Manami Yoshikawa

Tecnóloga em Saneamento Ambiental pela Universidade Estadual de Campinas. Mestre em Saneamento e Ambiente - FEC - Unicamp.

Edevar Luvizotto Junior

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Campinas. Mestre e Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo. Pós-Doutor pela Universidade de Politécnica de Valência. Professor Colaborador nível MS3.2 da Universidade Estadual de Campinas.

*Endereço para correspondência: Rua Alberto Cerqueira Lima, 206, apto. 03, Taquaral, Campinas - SP.

E-mail: robertosuse@hotmail.com

Introdução

Os modelos computacionais de qualidade de água permitem complementar os processos de monitoramento de campo, facilitando o diagnóstico extensivo da qualidade de água nas redes de distribuição, tornando possível executar com segurança as medidas necessárias para otimização do processo e evitar a deterioração da qualidade de água em todos os pontos da rede. A qualidade de água em redes de distribuição está associada a uma série de fatores internos e externos que podem comprometê-la para o consumo. Esse comprometimento pode decorrer de eventos cotidianos decorrentes da operação, tais como: baixas velocidades e pontos de estagnação do escoamento, exposição a agentes externos em pontos de vazamentos ou por sabotagem (os ataques terroristas ocorridos nos Estados Unidos da América reforçaram a importância do monitoramento em redes de distribuição de água, vulneráveis a uma gama de ameaças, que inclui a sabotagem de instrumentos de supervisão e controle, injeção de produtos químicos ou de contaminantes biológicos (Vankayala, 2007). A instalação de sensores de alerta, sobre baixa qualidade de água, seria custoso devido à diversidade espacial da rede de distribuição. Assim, a utilização da modelação computacional facilitaria a tomada de decisões em casos emergenciais, valendo-se de informações de uma quantidade reduzida de pontos de monitoramento que são necessárias para a calibração e ajustes do modelo.

Este artigo apresenta um estudo sobre a ferramenta de domínio público EPANET-MSX (EPANET Multi-Species Extension, 2008), realizado através da análise de casos hipotéticos que permitiram avaliar as possibilidades de simulação. Considerou-se relevante a investigação para à compreensão deste aplicativo, objetivando sua utilização concreta, principalmente no cenário nacional, em que só recentemente as simulações hidráulicas passaram a ser reconhecidas como ferramenta importante para análise de sistemas de abastecimento de água. Este estudo tenta preencher uma lacuna, uma vez que nada se encontra em literatura nacional referente à simulação da qualidade de água envolvendo múltiplas espécies.

Fundamentação

O programa EPANET-MSX é uma extensão do EPANET versão padrão (2000) e permite mode-

lar qualquer sistema de múltiplas espécies químicas interativas. Este programa utiliza o mesmo algoritmo de transporte Lagrangeano usado pelo EPANET versão padrão. Segundo (Shang & Uber, 2008) o EPANET-MSX considera que existam duas importantes fases físicas dentro de um sistema de distribuição de água: a fase em massa (núcleo do transporte) e a fase de superfície (parede da tubulação), contudo alguns componentes podem coexistir nas duas fases.

A modelação ocorre seguindo princípios da conservação de massa acoplada à cinética de reações e alguns fenômenos regem toda a água contida no sistema: transporte advectivo em tubos; mistura completa e instantânea nos cruzamentos das tubulações; mistura completa nos reservatórios com o conteúdo já existente. As reações são divididas em duas classes: reação rápida/equilibrada (um ponto de equilíbrio pode ser assumido) e reação lenta/dinâmica (não são satisfatoriamente rápidas e/ou irreversíveis sendo inadequado utilizar uma formulação de equilíbrio para representá-las) (Shang & Uber, 2008).

Para utilizar o programa EPANET-MSX é necessário preparar dois arquivos de entrada: (1) arquivo padrão EPANET que descreve as características hidráulicas da rede em que está sendo analisada e possui a extensão (.inp); (2) arquivo especial EPANET-MSX que descreve as espécies a serem simuladas e as reações químicas ou modelos de equilíbrio que governam sua dinâmica, portanto, dependerá das informações que o usuário deseja obter e as espécies que deseja modelar e possui a extensão (.msx). O arquivo com o relatório de saída terá extensão (.rpt). O programa é executado em linha de comando e é necessário emitir o seguinte comando: *epanetmsx Arquivo1.inp Arquivo2.msx Arquivo3.rpt*.

Foram realizados três exemplos de simulações que envolvem reações de múltiplas espécies: (1) Decaimento de cloro de múltiplas origens; (2) Oxidação, transferência de massa e adsorção do arsênio e (3) Recrescimento bacteriano com inibição de cloro.

Decaimento de cloro de múltiplas origens.

O maior problema na modelagem do decaimento de cloro em sistemas de distribuição de água é quando coexistem mais de uma fonte de aplicação de cloro livre. Ou seja, com a mistura de diferentes fontes de cloro, torna-se difícil atribuir um coeficiente único de decaimento de

cloro que reproduza com precisão a taxa de decaimento da água misturada. Uma maneira para conciliar as constantes de decaimento de cloro é assumir que a qualquer momento esta seja a média ponderada dos valores de origem, em que os pesos são frações de cada fonte de água presente na tubulação. Essas frações podem ser deduzidas através da introdução de um composto traçador conservativo fictício em uma das fontes, denominado T1, cuja concentração foi fixada em uma constante de 1.0 mg/L. Assim, em qualquer ponto da rede a fração da água dessa fonte seria a concentração de T1, e a fração da água da segunda Fonte seria 1 - T1 (Shang & Uber, 2008), para o caso de duas fontes.

Portanto, a constante de decaimento de primeira ordem k para toda a tubulação do sistema é dada por:

$$k = k_1 \cdot T1 + k_2 \cdot (1.0 - T1) \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo:

k_1 = constante de decaimento da Fonte 1

k_2 = constante de decaimento da Fonte 2

T1 = concentração do traçador conservativo fictício (mg/L)

Oxidação, transferência de massa e adsorção do arsênio.

As fontes de arsênio para o ambiente provêm do uso continuado de seus compostos como pesticidas, da lixiviação durante a mineração e fundição de ouro, chumbo, cobre e níquel (ocorre habitualmente nesses minérios), da produção de ferro e aço e da combustão de carvão, do qual é um contaminante (Baird, 2002). Em águas naturais, o arsênio está presente principalmente na forma de compostos inorgânicos, onde possui as valências 3+ e 5+ que, nos seres humanos, pode causar câncer (Borba *et al*, 2004).

Primeiramente, o modelo consiste numa reação química na solução em massa, entre o arsenito (As^{3+}) com a monocloramina (NH_2Cl), causando a oxidação do arsenito para arseniato (As^{5+}). Uma parte do arseniato (As^{5+}) se difunde através de uma camada limite para atingir uma concentração denotada por As_w^{5+} adjacente à superfície da parede do tubo. Essa concentração interage com o arseniato As_s^{5+} adsorvido na parede do tubo.

Portanto, devemos considerar que o sistema contém cinco espécies: (1) Arsenito dissolvido na solução em massa; (2) Arseniato dissolvido na solução em massa; (3) Monocloramina na solução em massa; (4) Arseniato dissolvido adjacente à superfície da parede do tubo, e (5) Arseniato sorvido na superfície do tubo.

O sistema inclui quatro equações de diferenciais (2 - 5) e uma equação algébrica (6) (Gu *et al*, 1994 citado por Shang & Uber, 2008):

$$\frac{dAs^{3+}}{dt} = -k_a As^{3+} (NH_2Cl) \quad \text{Equação (2)}$$

$$\frac{d(NH_2Cl)}{dt} = -k_b (NH_2Cl) \quad \text{Equação (3)}$$

$$\frac{dAs^{5+}}{dt} = k_a As^{3+} (NH_2Cl) - K_f A_v (As^{5+} - As_w^{5+}) \quad \text{Equação (4)}$$

$$\frac{dAs_w^{5+}}{dt} = K_f A_v (As^{5+} - As_w^{5+}) - A_v [K_1 (S_{max} - As_w^{5+}) As_w^{5+} - k_2 As_w^{5+}] \quad \text{Equação (5)}$$

$$As_s^{5+} = \frac{k_s S_{max} As_w^{5+}}{1 + k_s As_w^{5+}} \quad \text{Equação (6)}$$

Em que:

k_a é o coeficiente da taxa de oxidação do arsenito;

k_b é o coeficiente da taxa de decaimento da monocloramina;

K_f o coeficiente da taxa de transferência em massa;

A_v a área de superfície do tubo por litro de volume do tubo;

k_1 o coeficiente da taxa de adsorção;

S_{max} o coeficiente de concentração máxima de adsorção de arseniato;

k_2 o coeficiente da taxa de desadsorção e k_s a relação k_1/k_2 .

Recrescimento bacteriano com inibição de cloro

O modelo utilizado pelo EPANET-MSX é baseado em estudos feitos por (Zhang *et al*, 2004) e confirmado por outros modelos de qualidade de água encontrados na literatura. Apresenta um novo modelo matemático que permite prever o recrescimento bacteriano no tempo e no espaço

em um sistema de distribuição de água. O modelo permite obter uma compreensão dos eventuais controles e medidas necessárias para proteger a qualidade da água em relação a este parâmetro.

As variáveis dependentes são: bactérias livres na massa de água (X_b), bactérias associadas ao biofilme da parede do tubo (X_a), carbono orgânico dissolvido biodegradável ou substrato orgânico na massa de água (S), e cloro na massa de água (Cl_2).

As equações principais que governam a modelagem química deste exemplo e que devem ser descritas no arquivo de entrada, são apresentadas abaixo (Zhang *et al*, 2004):

$$\frac{dX_b^{n+1}}{dt} = \mu_b X_b^* + \frac{k_{det} X_a^* v}{R_h} - k_d X_b^* - k_{dep} X_b^* \tag{Equação (7)}$$

$$\frac{dX_a^{n+1}}{dt} = \mu_a X_a^* - k_{det} X_a^* v - k_d X_a^* - k_{dep} X_b^* R_h \tag{Equação (8)}$$

$$\frac{dS^{n+1}}{dt} = \left(\frac{1}{Y_{\beta}} \right) \left(\frac{\mu_a X_a^*}{R_h} - \mu_b X_b^* \right) \tag{Equação (9)}$$

$$\frac{dCl_2^{n+1}}{dt} = -k_b Cl_2^* - \frac{k_w}{R_h} \tag{Equação (10)}$$

- Sendo:
- X_a é o número de bactérias aderidas no biofilme (cell/cm²);
 - X_b é o número de bactérias livre na massa de água (cell/mL);
 - k_{det} a constante cinética de primeira ordem para separação de bactérias (hr⁻¹.(m/s)⁻¹);
 - v a velocidade da água na tubulação (m/s);
 - R_h - raio hidráulico (cm); k_d a taxa de mortalidade bacteriana (hr⁻¹);
 - k_{dep} - constante cinética de primeira ordem para bactérias livres depositadas na parede do tubo (hr⁻¹);
 - μ_a é a taxa de crescimento específico de bactérias anexadas à parede do tubo (hr⁻¹);
 - μ_b - taxa de crescimento específico de bactérias livres na massa de água (hr⁻¹);
 - Y_{β} é o coeficiente de produção das bactérias (mg/mg);
 - β é o número equivalente de bactérias para 1 mg de carbono orgânico na biomassa celular (cell/mg C);
 - k_b é a constante cinética de primeira ordem para decaimento de cloro na massa de água (hr⁻¹);
 - k_w a constante de taxa de ordem zero para a reação da parede (mg/cm²/h).

Metodologia

Simulações de casos hipotéticos foram realizadas utilizando-se o programa EPANET-MSX. As redes utilizadas nos estudos são ilustradas pelas Figura 1 e Figura 2.

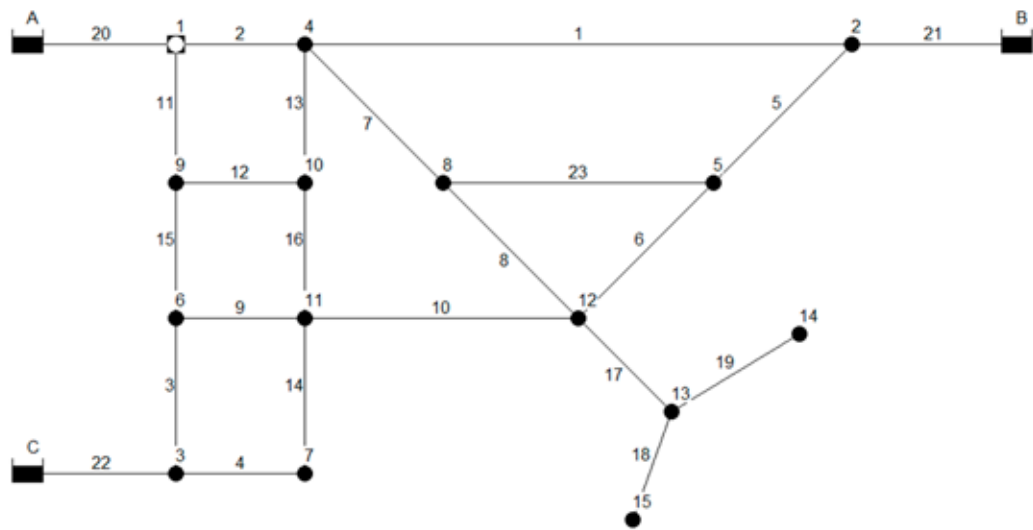


Figura 1 – Rede 1 (Al-Zahrani & Moied, 2003) constituída por 15 nós, 23 elementos e 3 fontes de abastecimento.

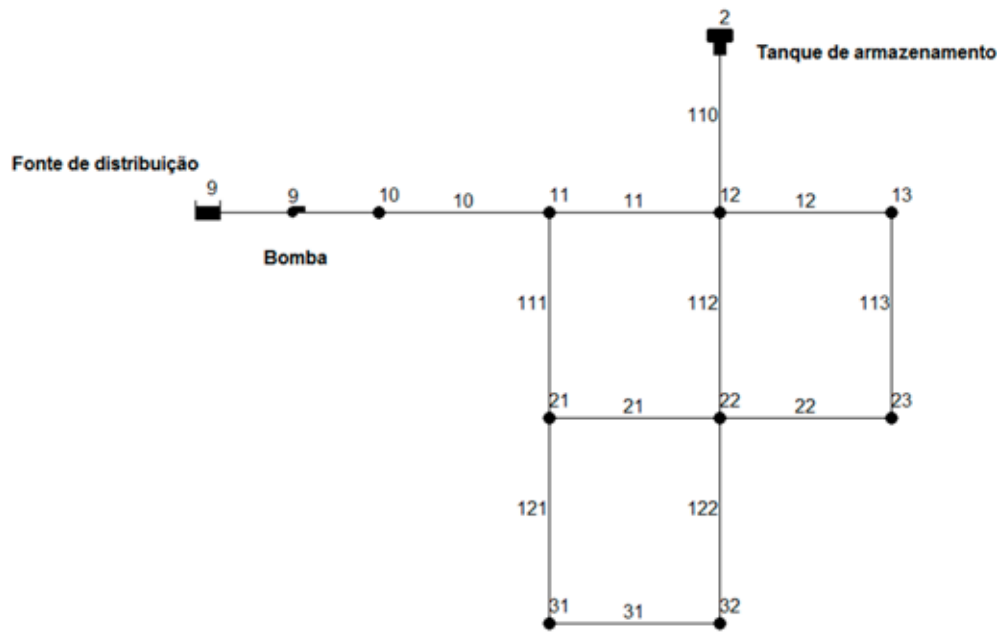


Figura 2 – Rede Hipotética 2 constituída por 9 nós, 12 elementos, 1 fonte de abastecimento, 1 bomba e 1 tanque de armazenamento.

Decaimento de cloro de múltiplas origens

O estudo de caso 1 tem por base a topologia da rede apresentada na Figura 1.

Situação: Sistema de distribuição com três fontes de abastecimento

Segundo (Beleza, 2005) as constantes cinéticas de decaimento do cloro não apresentam “valor de referência”, e podem variar facilmente dependendo de vários parâmetros como a origem da água, o local, a natureza geológica, a captação (água subterrânea ou superficial), possíveis contaminações, processos de tratamento, temperatura em que ocorrem as reações, entre outros, (Trimboli, 2006), através do “bottle test” ou “teste da garrafa”, encontrou uma constante de decaimento para o cloro em torno de $0,144 \text{ dia}^{-1}$ na água potável de uma rede de distribuição localizada na cidade de Jundiaí - SP.

Valores das constantes de decaimento de (Beleza, 2005) e (Trimboli, 2006) foram utilizados para realizar a 1ª simulação: $k_a = 0,144 \text{ dia}^{-1}$ (Fonte A); $k_b = 17,7 \text{ dia}^{-1}$ (Fonte B) e $k_c = 12,4 \text{ dia}^{-1}$ (Fonte C). Foi realizada a simulação de um cenário de 48 horas empregando uma dosagem de cloro livre na quantidade de 2 mg/L nas 3 fontes de abastecimento.

Oxidação, transferência de massa e adsorção do arsênio

O estudo de caso 2 tem por base a topologia da

rede apresentada na Figura 2.

Situação: Alta concentração de arsênio total na rede

O trabalho realizado por (Borba et al, 2004) analisou a qualidade de água de algumas minas auríferas subterrâneas e nascentes das regiões de Ouro Preto e Mariana, no Quadrilátero Ferrífero – MG. Durante essas análises, foram encontradas concentrações de arsênio total variando de 2 a 2980 $\mu\text{g/L}$ e de As^{3+} de 1 até 86 $\mu\text{g/L}$. O Valor Máximo Permitido (VMP) pela Portaria 518/04 para Arsênio é de 10 $\mu\text{g/L}$. Essa região, devido à sua geologia, deve ter suas águas de abastecimento público constantemente monitorada, principalmente nas áreas de risco, quanto à presença de arsênio, pois os tratamentos por adição de cloro e flúor não removem o arsênio da água (Borba et al, 2004).

Essa simulação supôs uma falha no monitoramento de arsênio e a possibilidade de uma grande concentração dessa substância ser introduzida na rede de distribuição. As concentrações iniciais de arsenito, arseniato e arsênio total foram retirados de uma das análises de águas subterrâneas de (Borba et al, 2004) e a dosagem de monocloração na fonte de abastecimento foi simulada considerando sua concentração em 3 mg/L (VMP segundo Portaria 518/04). As simulações seguiram as características apresentadas na Tabela 1.

Espécie	Concentração inicial na Fonte
*Arsenito (As ³⁺)	86 µg/L
*Arseniato (As ⁵⁺)	2894 µg/L
*Arsênio Total (AsTot)	2980 µg/L

*dados da amostra de água subterrânea em Passagem de Mariana (Borba et al, 2004)

Tabela 1 – Características para simulação do caso 2

Recrescimento Bacteriano

O estudo de caso 3 tem por base a topologia da rede apresentada na Figura 2.

Situação: Injeção de bactérias livres em um determinado nó

Um caso típico que geralmente ocorre em estações de tratamento de água é a parada da bomba devido a falhas mecânicas ou operacionais. Essa parada pode ser considerada um fator de risco para a água potável na rede de distribuição, ou seja, durante o período de tempo que a bomba não está em funcionamento pode ocorrer uma demanda negativa (ponto de sucção) em determinado ponto da rede e a entrada de contaminantes na rede.

Essa simulação avalia a situação de uma parada da bomba, das 1:00 as 9:00 horas (do primeiro dia), sendo a demanda suprida pelo reservatório

de nível variado. Supondo que neste reservatório não há dosagem de cloro e que exista uma pressão negativa no nó 11 (localizada no início da rede) – decorrente de vazamentos na tubulação – e uma grande quantidade de bactérias livres seja injetada nesse ponto na velocidade de 10⁶ µg/ minuto, considerando um padrão de injeção de 8 horas (das 1:00 as 9:00 horas do primeiro dia) para o período simulado de 48 horas. A Tabela 2 mostra os parâmetros utilizados para a simulação deste caso.

Parâmetro	Valores de injeção	Qualidade da água nos nós da rede
Bactérias livres (X _b)	106 µg/ minuto	10 ⁸ células/m ³ (na rede)
Bactérias anexadas ao biofilme (X _s)	-	10 ⁷ células/cm ² (na rede)
Substrato Orgânico (S)	-	0.4 mg/L (na rede)

Tabela 2 – Características da simulação na condição de falha do sistema

Resultados

Alguns resultados da aplicação do modelo aos casos propostos estão sintetizados nas figuras 3, 4 e 5.

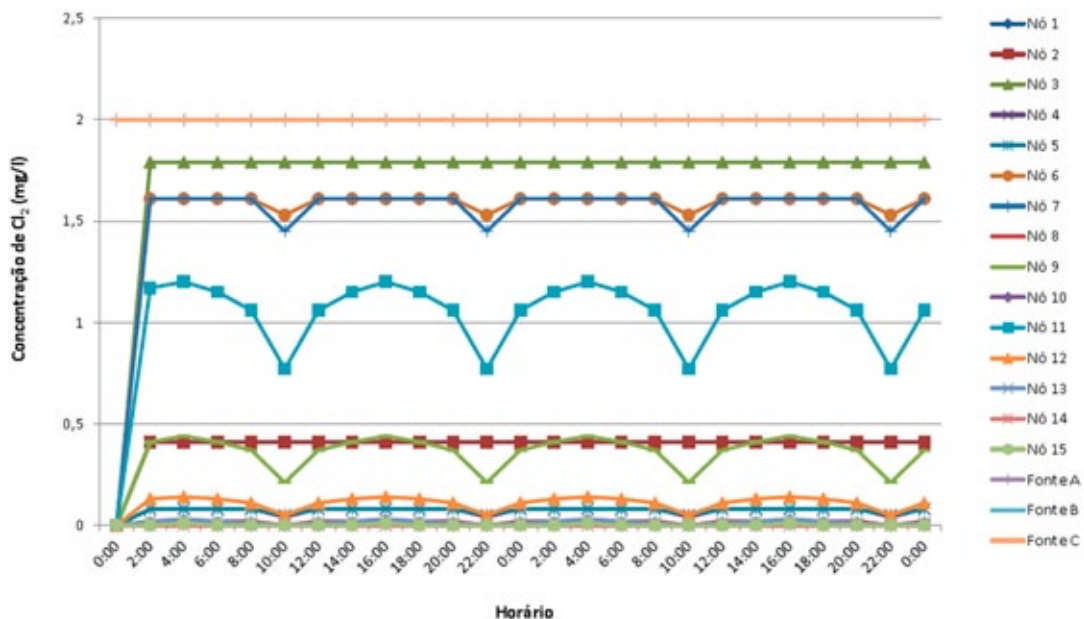


Figura 3 – Resultados de simulação do caso 1 - 3 fontes de abastecimento com dosagem de cloro.

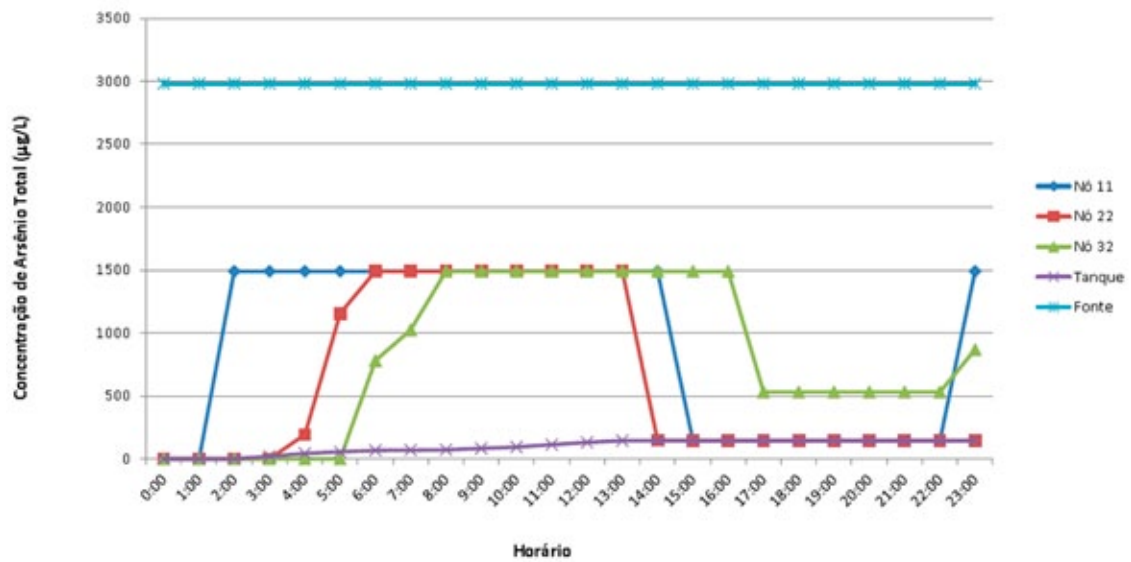


Figura 4 – Resultados de simulação do caso 2 - alta concentração de arsênio total na rede.

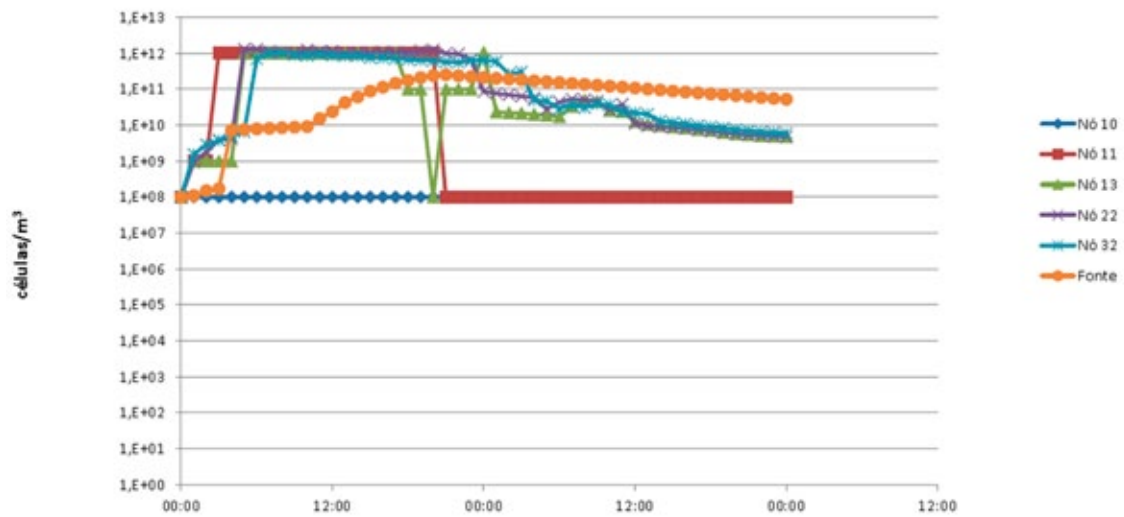


Figura 5 – Resultados de simulação do caso 3 - números de bactérias livres.

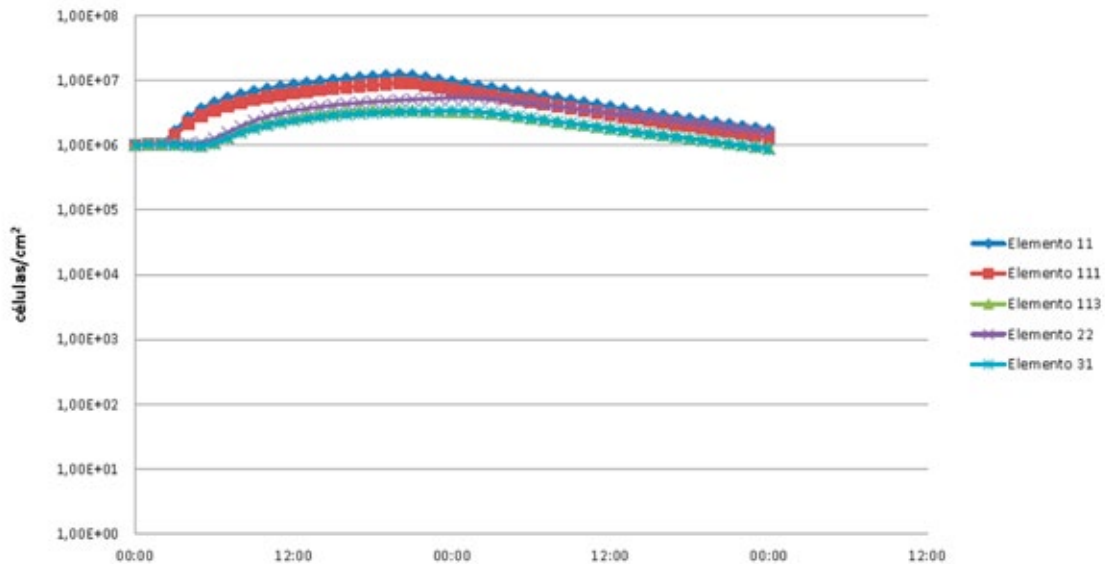


Figura 6 – Resultados de simulação do caso 3 - número de bactérias anexadas.

Discussão

Caso 1 - Decaimento de cloro de múltiplas origens: sistema de distribuição com três fontes de abastecimento.

A Portaria 518/04 determina após a desinfecção da água, a manutenção de no mínimo 0,2 mg/L de cloro residual livre em qualquer ponto da rede de distribuição. No caso da rede estudada constatou-se que 8 nós não atenderam esta determinação, conforme Figura 3, ou seja, 53,3% da rede estaria comprometida com pontos de deficiência de cloro residual livre. O que ocorreria se o monitoramento para o atendimento da Portaria não contemplasse estes pontos?

Em trabalho realizado por (Al-Zahrani & Moied, 2003) visando à localização ótima de estações de monitoramento, os autores obtiveram como conjunto de melhores pontos de monitoramento os nós 15, 8, 10 e 11. Por sua vez, (Hirose, 2010) observou que além desses, um conjunto de pontos ótimos de monitoramento poderia também ser composto pelos nós 7, 8, 11 e 15. Comparando os resultados encontrados por esses autores com os resultados obtidos pelo EPANET-MSX e, considerando que os melhores pontos para monitoramento em uma rede de distribuição de

água sejam os que têm condições críticas, o EPANET-MSX também consideraria adequado como pontos de monitoramento os nós 8, 10 e 15.

Os nós 11 e 7 mantiveram uma concentração estável de cloro, por isso poderiam deixar de serem englobados no conjunto de nós para monitoramento. Cabe observar que, (Al-Zahrani & Moied, 2003) e (Hirose, 2010) consideram vazões constantes na rede, ao contrário do EPANET-MSX, que utilizou variação no consumo de água ao longo do tempo.

Caso 2 - Oxidação, transferência de massa e adsorção do arsênio: alta concentração de arsênio total na rede.

Altas concentrações de arsênio levaram aproximadamente 5 horas para atingir um dos pontos mais distante da rede (nó 32), conforme Figura 4. A concentração de arsênio total no nó 11 (ponto mais próximo à fonte de abastecimento) nas primeiras horas já atinge valores extremamente altos da espécie química, cerca de 1490,06 µg/L. Valor extremamente alto quando comparado ao VMP estabelecido pela PORTARIA 518/04, que é de 10 µg/L.

O nó 22 (nó intermediário da rede) é atingindo por altas concentrações de arsênio total cerca de

4 horas após a falha no sistema e o tanque de armazenamento após 3 horas. O tanque apresentou as concentrações mais baixas de arsênio total.

Caso 3 - Recrescimento Bacteriano: Injeção de bactérias livres em um determinado nó.

Segundo (Van der Kooij, 2003), a concentração de bactérias livres consideradas “não perigosas” está na faixa de $10^7 - 10^9$ células/ m^3 em redes de distribuição de água da Europa e América do Norte. Em observância com dados de (Nunes *et al*, 2007) citado por (Juhna *et al*, 2009) as bactérias anexadas ao biofilme das tubulações encontram-se em torno de 10^6 células/ cm^2 .

Nesta simulação, o número de bactérias livres variou de 10^8 a 10^{12} células/ m^3 em quase todos os pontos da rede de distribuição (Figura 5), ou seja, a intrusão de bactérias livres ocorreu e elevou o número de bactérias livres na massa de água. A parada da bomba e a demanda negativa no nó 11 da rede ocorreram entre as 1:00 e 9:00 horas (do primeiro dia). A Tabela 3 mostra a faixa de horário em que houve picos de bactérias livres nos nós (início, intermediário e final) e o horário em que a rede estava normalizada.

A bomba foi religada às 10:00 (1º dia), contudo a situação só começou a se normalizar (número de bactérias livres abaixo de 10^{10} células/ m^3) as 21:00 (1º dia) nos nós de início da rede; entre 14:00 e 15:00 (2º dia) nos nós intermediários da rede e as 18:00 (2º dia) nos nós finais da rede. O número de bactérias anexadas ao biofilme atingiu picos de 10^{12} no elemento 11, onde ocorreu a demanda negativa e passado às 48 horas ainda mantinha alta concentração no número de bactérias em 10^9 . O número de bactérias anexadas ao biofilme variou de 10^5 a 10^7 células/ m^3 nos ele-

mentos. Os elementos mais próximos ao ponto de injeção mantiveram picos de 10^7 células/ m^3 por várias horas após a ocorrência e o elemento 31 (um dos elementos mais distantes do rompimento) não apresentou grandes oscilações desse parâmetro, mantendo-se em 10^6 células/ m^3 .

As simulações realizadas tentaram avaliar o tempo que uma parada de bomba aliada a uma injeção de bactérias, em um determinado ponto da rede afeta o sistema de distribuição. Em uma situação real, após determinar esse período, seria possível estimar o tempo necessário de descarte de água para “limpar” a rede de distribuição sem grandes desperdícios.

Conclusões

A multiplicidade de eventos que o EPANET-MSX pode simular é bastante extensa e sua potencialidade pôde ser verificada através dos estudos de caso apresentados neste trabalho. Casos reais devem ser estudados com o objetivo de comprovar o nível de precisão dos resultados previstos pela simulação. Entretanto, as aplicações hipotéticas permitiram o entendimento do problema da modelação computacional da qualidade em redes de distribuição de água. Os resultados evidenciam que as simulações apresentadas são factíveis de emprego na prática.

A utilização desta ferramenta em problemas reais poderá nortear operações da rede hidráulica para melhoria da qualidade de água, evitando descargas de grandes volumes de água para esta finalidade (circulação de “zonas mortas” ou com baixas velocidades). Aplicação desta ferramenta é ainda recente no Brasil, mas certamente é de grande interesse no contexto do saneamento ambiental.

Nós		11 (início)	13 (intermediário)	22 (intermediário)	32 (final)
Picos	Início	3:00	5:00	5:00	6:00
	Fim	20:00	17:00	22:00	27:00
Normalizada (10^{10} células/ m^3)		21:00	15:00 (2º dia)	14:00 (2º dia)	18:00 (2º dia)

Tabela 3 – Faixa de horário em que houve picos de bactérias livres nos nós

Referências

BAIRD, C. Química Ambiental. 2ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BELEZA, J.M.B.B. Simulação das concentrações de cloro residual e trihalometanos em redes de distribuição de água para consumo humano. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2005.

BORBA, R.P.; FIGUEIREDO, B.R.; CAVALCANTI, J.A. Arsênio na água subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). R. Esc. Minas, Ouro Preto, p. 45-51, 2004.

HIROSE, H.S.N. Localização ótima de estações de monitoramento de qualidade da água em redes de distribuição baseada em algoritmos genéticos. Trabalho de Conclusão de Curso. FEC. UNICAMP. 2010.

PORTARIA Nº 518/04, DE 25 DE MARÇO DE 2004 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE; estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras

providências.

SHANG, F.; UBER, J.G. Epanet Multi-Species Extension user's manual. US Environmental Protection Agency. 2008.

TRIMBOLI, M.J. Aplicação e análise de um modelo de qualidade de água para a determinação da concentração de cloro livre em um setor de abastecimento de água. Dissertação de mestrado. FEC. Unicamp. 2006.

VAN DER KOOIJ, D. Managing regrowth in drinking water distribution systems. In: HPC and Drinking-water Safety. World Health Organization (WHO). London. Chapter 11. 2003.

VANKAYALA, P. Contaminant Source Identification in Water Distribution Networks under the conditions do Uncertainty. North Carolina State University. Master of Science in Civil Engineering. 2007.

ZHANG, W.; MILLER, C.T.; DIGIANO, F.A. Bacterial Regrowth Model for Water Distribution Systems Incorporating Alternating Split-Operator Solution Technique. Journal of Environmental Engineering. 2004.

O site da Revista DAE está repleto de novidades

ASSINE GRATUITAMENTE
O BOLETIM ELETRÔNICO,
É SÓ SE CADASTRAR

