

SIMULAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO O EPANET 2.0

Ana Alice Quintans de Araujo¹
Amanda Raquel Bezerra de Lima²
Rui de Oliveira³
Sabrina Holanda Oliveira⁴

RESUMO

Fatores como pressão de serviço, qualidade do material das canalizações, qualidade da água e aqueles decorrentes do envelhecimento das tubulações, bem como práticas inadequadas de operação e manutenção de um sistema de abastecimento de água podem contribuir para o seu maior desgaste, reduzindo sua vida útil. Além disso, parece faltar a aplicação de um processo de gestão mais técnico-científico, envolvendo ações contínuas de planejamento e gerenciamento eficientes visando o bom funcionamento e a garantia do fornecimento de água de qualidade adequada e acessível à população. Diante do exposto, uma revisão bibliográfica acerca de modelagem hídrica, torna-se importante auxiliadora no processo para um bom planejamento de reabilitação da rede de distribuição de água, como ferramenta auxiliar de gestão. O processo de modelagem estudado teve como base a utilização do programa EPANET 2.0 que simula eletronicamente o comportamento das pressões e do cloro residual livre na rede de distribuição de água de uma cidade, propondo cenários com melhorias para a operação do sistema de abastecimento que estejam em conformidade com as exigências da Portaria nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde. Portanto, foi concluído que a simulação, com o uso do EPANET 2.0, é uma importante ferramenta auxiliadora no processo de gestão dos sistemas de abastecimento juntamente com o uso de modelos conceituais, podendo contribuir significativamente para a melhoria da qualidade do serviço de abastecimento de água, incluindo o planejamento de sua reabilitação.

Palavras-chave: EPANET, Modelagem hidráulica, Sistema de abastecimento de água.

INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de água é dimensionado levando em consideração a previsão de uma determinada vida útil, ou seja, um determinado horizonte de tempo, capaz de continuar atendendo à demanda dos consumidores por um período limitado, tendo em vista que as canalizações, acessórios e instalações enfrentam o processo de envelhecimento e desgaste, contribuindo efetivamente para a perda de água tratada. Proporcionalmente ao tempo de utilização, surgem problemas de operação, manutenção e deterioração do sistema. Fatores como

¹Doutoranda em Engenharia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, anaaliceq@gmail.com;

²Graduanda em Engenharia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, amandarblima@hotmail.com;

³Doutor em Engenharia Civil da Leeds Metropolitan - LEEDS, ruideo@gmail.com;

⁴Graduanda em Engenharia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, sabrina.holanda.oliveira@hotmail.com.

rugosidade do material utilizado, diâmetro das tubulações, pressão nos nós e perda de carga, contribuem para a necessidade contínua de reparos e manutenção, dificultando o andamento do processo de abastecimento e criando pontos frágeis ao longo do percurso da água. Hoogsteen (1993) reitera que a incidência maior dos problemas do sistema de distribuição de água é frequentemente decorrente de altas pressões, transientes hidráulicos, influências externas como tráfego, acidez do solo, envelhecimento natural do material da tubulação, sedimentação de materiais particulados nas tubulações, devido à ineficiência da estação de tratamento, e da qualidade do material das canalizações.

Venturine e Barbosa (2002) reforçam que os sistemas, com o passar do tempo, se deterioram de maneira natural ou acelerada, dando origem a problemas operacionais, que provocam a diminuição da qualidade dos serviços prestados e o aumento dos custos operacionais, os quais recairão sobre seus consumidores na forma de aumento de tarifas.

Para lidar com esses inconvenientes e para a realização de um planejamento mais eficiente, pode-se recorrer à modelagem, haja vista que, a partir do manuseio de dados e simulação de cenários, pode-se prever comportamentos futuros, representar situações reais e/ou cenários desejados para otimização de todo o sistema.

A intervenção para solucionar essas questões, baseada no monitoramento de indicadores que representem as condições da operação, é necessária e deve orientar a escolha entre reabilitar o sistema ou implementar um novo, com vistas a uma solução mais eficiente do processo. O planejamento é o elemento essencial para a implementação da solução definida, em especial porque, ordinariamente, os sistemas de abastecimento não podem ser retirados de operação, interrompendo o fornecimento de água à população. Diante do exposto esta pesquisa propõe uma avaliação sobre simulação de redes de abastecimento de água com uso do software EPANET 2.0.

Afim de evitar que estes inconvenientes ocorram e para a realização de um planejamento mais eficiente, recorre-se para uma ferramenta bastante importante neste contexto que é a modelagem, haja vista que a partir da manipulação de dados e simulação de cenários, pode-se prever comportamentos futuros, representar eletronicamente situações reais e/ou cenários desejados para otimização de todo o sistema.

A intervenção para solucionar estas questões é necessária, sendo baseada no monitoramento de indicadores que representem as condições da operação e oriente na escolha a ser feita, entre reabilitar o sistema ou implementar um novo, com vistas a uma solução mais eficiente do processo. O planejamento é o elemento essencial para a implementação da solução

definida, em especial porque, ordinariamente, os sistemas de abastecimento não podem ser retirados de operação, interrompendo o fornecimento de água à população.

METODOLOGIA

No presente estudo foi realizada uma revisão bibliográfica sobre simulação de redes de abastecimento de água utilizando software EPANET 2.0. Para tanto, foram utilizados como recursos artigos científicos com abordagem do tema em estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1) Modelagem

Segundo Cunha (2015), para suprir a demanda de água de abastecimento da população, é necessário reduzir o índice de perdas por meio de um gerenciamento eficaz dos sistemas de abastecimento de água. Viegas et al. (2002) afirmam que um dos instrumentos disponíveis para este gerenciamento é a modelagem hidráulica das redes de distribuição de água, que proporciona o aumento da eficiência, seja na fase de projeto ou de controle operacional.

A aplicação de modelos matemáticos, mediante simulações, é bastante utilizada pela comunidade acadêmica devido sua praticidade, rapidez na execução dos modelos, análise de cenários com alto nível de detalhe e ótimo custo-benefício. Existem aplicativos para a simulação hidráulica como, por exemplo, WaterCAD desenvolvido pela Haestad Methods, e o EPANET desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

Um dos simuladores mais atrativos, o EPANET 2.0, trata-se de um simulador amplamente testado e credível, de distribuição gratuita tanto do programa como do seu código computacional (Coelho, 2001). Mas, para que os modelos simulados consigam gerar dados confiáveis, faz-se necessária uma calibração do modelo do sistema que, conforme Soares et al. (2004), visa o ajuste dos parâmetros (cloro residual livre e K_b , por exemplo) do sistema de tal forma que os desvios entre os dados simulados e observados em campo sejam minimizados.

2) EPANET 2.0

Existem várias ferramentas que podem ser utilizadas na modelagem hidráulica, no entanto, alguns softwares têm se destacado para auxiliar e agilizar o desenvolvimento da pesquisa, a exemplo do EPANET 2.0.

Desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (EPA) e licenciado como de domínio público, seu Manual do Usuário explica que este é um programa de computador que permite executar simulações estatísticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição constituídas por tubulações, bombas, válvulas e reservatórios de nível fixo (RNF) e/ou variável (RNV).

Como as redes de distribuição de água, em geral, podem se localizar sob vias com tráfego intenso, sua inspeção física é limitada e de difícil acesso. Logo, uma solução para o problema é a análise do comportamento deste sistema de forma indireta com auxílio de software.

Com a entrada de valores de variáveis, coeficientes, informações estruturais e hidráulicas do sistema, e do traçado da rede de distribuição de água composto por trechos e nós que representam, respectivamente, tubulações e conexões existentes, é possível extrair do software dados como pressão nos nós e de qualidade da água, bem como simular todo o transporte e destino de água e estabelecimento de cenários de projeto, o que possibilita uma visão sistêmica do processo de abastecimento e acompanhamento contínuo dos parâmetros hidráulicos e de qualidade desejados.

Devido sua capacidade de representar os aspectos de operação e qualidade da água, este software tem grande utilização no meio acadêmico (LUCENA, 2018; SILVA, 2017; SANTOS, 2017; NASCIMENTO, 2016; RICCALDONE, 2016; SOUSA, 2014; LEAL, 2012; MENEZES, 2011). Neste trabalho, a análise destas informações basea-se nos indicadores Cloro Residual Livre (CRL) e pressão.

a. Modelagem hidráulica no EPANET 2.0

Conforme Vieira (2013), o EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, de que se destacam como principais características:

- Dimensão de rede ilimitada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamento, etc.;
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo de energia de bombeamento e do respectivo custo;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e caudal;
- Modelagem de reservatórios de armazenamento e de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema através controles simples, dependentes de uma só condição (ex.: altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

As equações da continuidade e da conservação da energia e a relação entre a vazão e a perda de carga, que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede num dado instante, podem ser resolvidas através do Método Híbrido Nó-Malha que, por ser o mais simples, foi escolhido para obter os valores de vazão e cota piezométrica na rede utilizando o EPANET (ROSSMAN, 2000).

Ainda segundo ROSSMAN (2000), a relação vazão-perda de carga numa tubulação entre os nós “i” e “j” pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (1)$$

Onde:

H = cota piezométrica no nó

h = perda de carga total

r = termo de perda de carga

Q = vazão

n = expoente da vazão

m = coeficiente de perda de carga localizada.

O Método do Gradiente arbitra uma primeira distribuição de vazões nas tubulações que não tem necessariamente que satisfazer as equações de continuidade nos nós. Em cada iteração do método, novas cotas piezométricas são obtidas resolvendo a seguinte matriz:

$$A * H = F \quad (2)$$

Onde:

A = matriz Jacobiana de $(N \times N)$

H = vetor de incógnitas em termos de cota piezométrica $(N \times 1)$

F = vetor dos termos do lado direito da equação $(N \times 1)$.

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são:

$$A_{ij} = \sum_j p_{ij} \quad (3)$$

Enquanto que os elementos não nulos fora da diagonal são:

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (4)$$

Onde:

p_{ij} = inverso da derivada da perda de carga total no trecho entre os nós “ i ” e “ j ” em relação a vazão.

Para tubulações:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr |Q_{ij}|^{n-1} + 2m |Q_{ij}|} \quad (5)$$

Cada termo do lado direito da matriz é composto por uma parcela referente ao balanço de vazão no nó a qual é adicionado um fator de correção de vazão:

$$F_i = (\sum_j Q_{ij} - D_i) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (6)$$

Sendo o último termo aplicável a qualquer trecho que ligue um no “*i*” a um no “*f*” de cota piezométrica fixa e o fator de correção de vazão, y_{ij} , e dado pela seguinte expressão para tubulações:

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn} (Q_{ij}) \quad (7)$$

Após terem sido calculadas as cotas piezométricas, resolvendo a Eq. 1, as novas vazões podem ser obtidas de acordo com a seguinte equação:

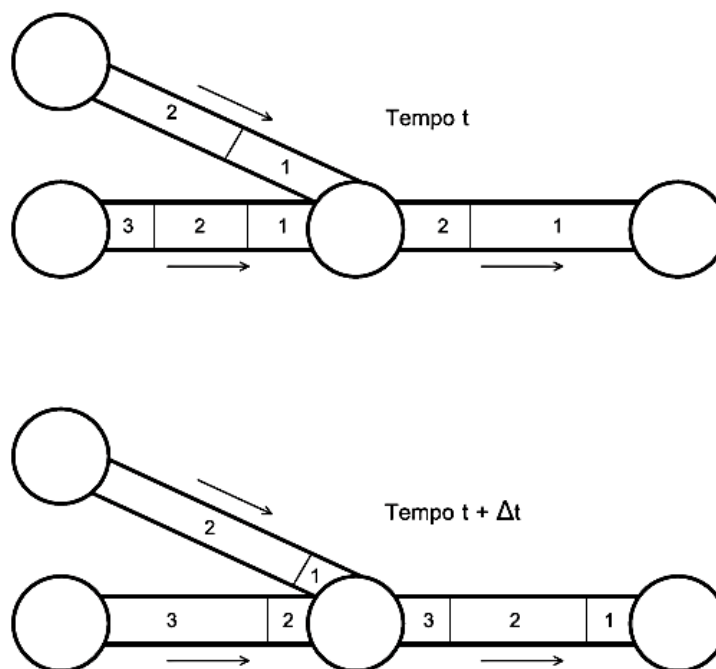
$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j)) \quad (8)$$

Se, conforme Rossman (2000), a soma de todas as variações de vazão (em valor absoluto) relativamente à vazão total em todos os trechos for superior à tolerância especificada (p.ex., 0,001), as equações (7) e (8) serão resolvidas novamente. A nova vazão obtida a partir da equação (8) satisfaz o princípio da continuidade da vazão nos nós, após a 1ª iteração.

b. Modelagem da qualidade de água no EPANET 2.0

O módulo de qualidade do EPANET utiliza o Modelo Lagrangeano que modela a água em segmentos que se deslocam nas tubulações e se misturam nos nós, em intervalos fixos de cálculo (ROSSMAN, 2000). Os tamanhos desses segmentos são alterados à medida que o tempo avança, como pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Comportamento dos segmentos pelo Método Lagrangeano



Fonte: Rossman (2000)

À medida que o tempo passa e com a entrada de água no sistema, o tamanho dos segmentos a montante aumenta ao passo que na saída da água a magnitude dos segmentos a jusante diminui, enquanto os trechos intermediários permanecem inalterados.

O modelo de qualidade da água é constituído de dois módulos computacionais, conforme Nascimento (2016), um que determina as condições hidráulicas e outro que tem relação com a qualidade da água, que depende do modelo hidráulico, pois é necessário ter conhecimento das misturas nos diferentes pontos, do fluxo nas canalizações e da diluição de contaminantes/desinfetante.

Seguem-se as seguintes possibilidades fornecidas pelo EPANET, conforme Vieira (2013), relativamente à modelação da qualidade da água:

- Modelação do transporte de um constituinte não reativo através da rede ao longo do tempo;
- Modelação do transporte, mistura e transformação de um constituinte reativo, à medida que este sofre decaimento (ex.: cloro residual livre) ou crescimento (ex.: um subproduto da desinfecção) com o tempo;
- Modelação do tempo de percurso da água através da rede;

- Cálculo da percentagem de pontas de rede que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo (ex.: cálculo da importância relativa de duas origens de água diferentes);
- Modelação de reações de decaimento de cloro no seio do escoamento e na parede da tubagem;
- Definição de limites para a transferência de massa na modelação de reações na parede;
- Permitir que as reações de crescimento ou decaimento sejam controladas por um valor de concentração limite;
- Aplicação à rede de coeficientes de reação globais, que podem ser modificados individualmente para cada tubulação;
- Possibilidade de relacionar o coeficiente de reação na parede com a rugosidade da tubulação;
- Definição de variação temporal da concentração ou de entrada de massa em qualquer ponto da rede;
- Mistura de água a partir de diversas origens;
- Determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- Determinação da perda de cloro residual livre;
- Determinação do crescimento de subprodutos da desinfecção.

Uma substância dissolvida e transportada ao longo de uma tubulação com a mesma velocidade média do escoamento, está, ordinariamente, sujeita a uma determinada taxa de reação (crescimento ou decaimento). Na concepção do EPANET a dispersão longitudinal foi considerada um mecanismo de transporte pouco importante para a maioria das condições operacionais admitindo, portanto, a não existência de mistura de massas entre segmentos adjacentes que se deslocam ao longo da tubulação. Assim, desprezando a dispersão longitudinal, obtém-se a seguinte equação de advecção com reação (ROSSMAN, 2000):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (9)$$

Onde:

C_i = concentração (massa/volume) na tubulação i em função da distância x e do tempo t

u_i = velocidade média do escoamento (comprimento/tempo) na tubulação i

r = taxa de reação (massa/volume/tempo) que depende da concentração.

Admite-se que nos nós que recebem vazão de duas ou mais tubulações ocorre mistura completa e instantânea. Deste modo, a concentração de uma substância contida no volume do escoamento que sai do nó pode ser obtida simplesmente através de um balanço de massas podendo-se escrever a seguinte equação para um nó específico (ROSSMAN, 2000):

$$C_{i|x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_{j|x=L_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext}}{\sum_{j \in I_k} Q_j + C_{k,ext}} \quad (10)$$

Onde:

i = trecho com vazão que sai do nó k

I_k = conjunto de trechos com vazão que convergem em k

L_j = comprimento do trecho j

Q_j = vazão (volume/tempo) no trecho j

$Q_{k, ext}$ = origem externa de vazão que entra na rede através no nó k

$C_{k, ext}$ = concentração externa de vazão que entra no nó k

É conveniente assumir que ocorre mistura completa nas estruturas de armazenamento (RNVs e RNFs). Esta é uma hipótese razoável para muitos RNFs que operam em condições de enchimento-esvaziamento, desde que seja fornecido um fluxo suficiente ao reservatório. Ainda segundo Rossman (2000), em condições de mistura completa, a concentração num RNV resulta da mistura do conteúdo do RNV com a vazão que entra. Ao mesmo tempo, a concentração interna pode ser alterada devido a reações de decaimento ou crescimento. A seguinte equação descreve este fenômeno:

$$\frac{\partial(V_s C_s)}{\partial t} = \sum_{i \in I_s} Q_i C_{i|x=L_i} - \sum_{j \in O_s} Q_j C_s + r(C_s) \quad (11)$$

Onde:

V_s = volume armazenado no instante t

C_s = concentração na estrutura de armazenamento

I_s = conjunto de trechos que fornecem vazão a estrutura de armazenamento

O_s = conjunto de trechos que recebem vazão da estrutura de armazenamento.

Conforme Nascimento (2016), a qualidade da água em sistemas de abastecimento pode se degradar por diferentes razões, podendo o decaimento do cloro residual nos sistemas de distribuição, por exemplo, estar relacionado à presença de substâncias orgânicas e inorgânicas (p. ex. amônia, sulfeto, íons ferrosos e matéria orgânica), ao consumo pelo processo de corrosão, principalmente nas tubulações de ferro e a reações com o biofilme formado nas tubulações.

De fato, o decaimento do cloro residual é resultante da combinação de dois coeficientes, (Equação 12), sendo um associado às reações ao longo do escoamento na massa líquida com materiais redutores (k_b) e o outro (k_w) associado a reações ao nível da parede da tubulação (CLARK et al., 1993).

$$K = k_b + k_w \quad (12)$$

A reação no fluxo central de escoamento ocorre quando uma substância, no caso o cloro, é transportada ao longo de uma canalização ou permanece em um reservatório, reagindo com outros constituintes presentes no fluxo (NASCIMENTO, 2016). A taxa de reação pode ser descrita através equação:

$$r = k_b C^n \quad (13)$$

Onde:

k_b = coeficiente de reação no volume do escoamento - (dia-1)

C = concentração do reagente (massa/volume)

n = ordem da reação.

Quando existe uma concentração limitante para o crescimento ou decaimento de uma substância, a taxa de reação é descrita pelas Equações 14 e 15, em que C_L é a concentração-limite (NASCIMENTO, 2016).

$$R = k_b (C_L - C) C^{n-1} \quad \text{para } n > 0, k_b > 0 \quad (14)$$

$$R = k_b (C - C_L) C^{n-1} \quad \text{para } n > 0, k_b < 0 \quad (15)$$

Onde:

C_L = concentração limite.

Leal (2012) determinou o valor da constante k_b para o sistema de abastecimento de Campina Grande, através do teste da garrafa, sendo os resultados representados graficamente pelos valores de $\log(C_t/C_0)$ em função do tempo (C_t é a concentração no instante t e C_0 a concentração no instante inicial). Desse modo, com base num modelo cinético de primeira ordem, obtém-se uma linha reta, sendo o valor de k_b estimado a partir de sua declividade (ROSSMAN, 2000). As equações 16 e 17 representam a dinâmica temporal da concentração de cloro.

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (16)$$

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (17)$$

Onde:

C = concentração de cloro no tempo t ;

C_0 = concentração de cloro inicial;

k = constante de decaimento de primeira ordem.

Parte do decaimento do cloro ocorre na interface com a parede de tubulações, quando as substâncias dissolvidas são transportadas para a parede da tubulação e reagem com os biofilmes existentes na parede interna e com o próprio material da canalização (NASCIMENTO, 2016), bem como devido a corrosão e em relação as substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água. Segundo Rossman (2000), a taxa de reação na tubulação resulta do comportamento de dois coeficientes, o de reação na parede e o de transferência de massa, que depende da difusão molecular das espécies reativas e do número de Reynolds do escoamento. Considerando cinética de 1ª ordem, a taxa de reação na tubulação pode ser traduzida pela seguinte Equação:

$$r = \frac{2 k_w k_f C}{R(k_w + k_f)} \quad (18)$$

Onde:

C = concentração de cloro

k_w = coeficiente de reação na parede (comprimento/tempo)

k_f = coeficiente de transferência de massa (comprimento/tempo)

R = raio da tubulação.

Os coeficientes de transferência de massa são expressos em termos do número adimensional de Sherwood (Sh), segundo a Equação 19:

$$k_f = Sh \frac{D}{d} \quad (19)$$

Onde:

D = difusão molecular da espécie a ser transportada (comprimento²/tempo)

d = diâmetro da tubulação

Em regime laminar, o número de Sherwood médio ao longo do comprimento de uma tubulação pode ser expresso conforme a Equação 20:

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668 \frac{d}{L} Re Sc}{1 + 0,04 \left(\frac{d}{L} Re Sc\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (20)$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

d = diâmetro da tubulação

Sc = número de Schmidt

Para escoamento turbulento, a correlação empírica de Nottter e Sleicher (1971) pode ser utilizada, conforme a expressão a seguir:

$$Sh = 0,0149 Re^{0,88} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O software EPANET 2.0 é um programa de código livre que dispensa o investimento monetário para sua aquisição e de fácil utilização, por este motivo tem sido largamente utilizado pela comunidade acadêmica e auxiliando diversos estudos na área de reabilitação de redes de abastecimento.

A partir da construção de um traçado realizado no software, podem ser escolhidos cenários que melhor representam a vulnerabilidade da rede de distribuição de água para a realização da análise e, conseqüentemente, a elaboração de propostas que permitam a otimização do funcionamento da rede, ou até mesmo a solução de falhas que ocorrem no sistema.

Portanto, foi concluído que a simulação, com o uso do software EPANET 2.0, é uma importante ferramenta auxiliadora no processo de gestão dos sistemas de abastecimento hídrico juntamente com o uso de modelos hídricos e que qualidade já existentes, podendo contribuir significativamente para a melhoria da qualidade do serviço de abastecimento de água de uma cidade, incluindo o planejamento e execução de sua reabilitação.

REFERÊNCIAS

CLARK, R.; GRAYMAN, W.; MALES, R. M; HESS, A. **Modeling contaminant propagation in drinking water distribution systems**. Journal of Environmental Engineering, v. 119, n. 2, p.349-364, 1993.

COÊLHO, A. C. **Manual de Economia de Água (Conservação de Água)**. Comuigraf, Recife, 2001.

CUNHA, A. P.; LEMES, C. de S.; PINTO, W. T.; SOARES, A. K. **Modelagem hidráulica de rede de abastecimento de água de pequeno porte**. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília -DF, 2015.

HOOGSTEEEN, K. J. **Basic Distribution System Maintenance**. AWWA (American Water Works Association), Annual Conference and Exposition; Chicago, 1993.

LEAL, E. S. Modelagem da degradação de cloro residual livre em sistemas e adução de água de abastecimento de porte médio. UFCG. 106p. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

LUCENA, D. P. M, Simulações da implantação de ações de gestão no açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande-PB e região. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2018.

MENEZES, R. A. Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de Campina Grande. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2011.

NASCIMENTO, R.S. Modelo conceitual para a gestão da qualidade da água em sistemas de abastecimento de médio porte. **Tese (Doutorado)** – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2016.

RICCALDONE, D. Comparação de dimensionamento de redes de distribuição de água por modelos computacionais. **Monografia** – Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 user's manual**: U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.

SANTOS, W. B dos. Modelagem da degradação de cloro residual livre na rede de distribuição de água da cidade de Campina Grande-PB. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

SILVA, G. A. B. da. Decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água da cidade de Campina Grande-PB. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

SOARES, A. K.; REIS, L. F. R. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água utilizando modelo de simulação hidráulica dirigido pela pressão (MSHDP) e Método Híbrido AG-Simplex**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 9, n. 2, p. 85-96, 2004.

SOUSA, J R de; MORAES, M. E. B. de; SONODA, S. L.; SANTOS, H. C. R. G. **A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil**. Revista eletrônica do Prodema, v.8, n.1, p. 26-45, 2014.

VENTURINI, M. A.; BARBOSA, P. F. **Subsídios à escolha de técnicas de reabilitação de redes de distribuição de água**. Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas-SP, 2002.

VIEGAS, J.V.; PAZ, M.F.; GASTALDINI, M.C.C.; DANIELLE, R.D.; BARROSO, L.B. **Simulação do comportamento hidráulico de redes de abastecimento de água utilizando o modelo EPANET** In: Anais do XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 2002.

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, v.53, n.7,p.453-467, Nov, 2004.