



Modelagem matemática para verificação da qualidade da água em sistema de distribuição de água potável

Alexandre Hitoshi Ito¹ Priscila Pini Pereira²

19 novembro 2017

Resumo – A distribuição de água potável deve ser garantida para todos os usuários. Um dos parâmetros principalmente abordado é a concentração de cloro na água para manter a desinfecção ou ausência de patógenos. A presença do cloro residual permite a oxidação de possíveis microrganismos presente na água até os pontos de consumo. No entanto essa concentração regride ao longo do percurso, devendo em algumas condições realizar o processo de “recloração”. Desta maneira, faz-se necessário realizar o monitoramento contínuo em toda a rede de distribuição de água, averiguando se a concentração de cloro na rede se encontra dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes. Para auxiliar o processo de gestão e verificação da concentração de cloro na rede de distribuição, este trabalho visou aplicar um modelo matemático para verificar a variação da concentração na rede da Universidade Estadual de Maringá. Após calibrar hidraulicamente e determinar os parâmetros de decaimento do cloro na tubulação, foi gerado o modelo de qualidade da água no software WaterGEMS, que apresentou resultados semelhantes aos valores monitorados diretamente na rede de distribuição de água, mostrando-se satisfatório para avaliação da qualidade da água.

Palavras-chave: Água potável. Monitoramento de cloro. Simulação numérica. Qualidade da água.

1. INTRODUÇÃO

A água potável é um bem que deve ser acessível a todos. Para garantir características adequadas ao consumo, são realizados processos de tratamento e desinfecção. O principal método utilizado para desinfecção é a cloração. Este processo apresenta elevado potencial de oxidação, eficiência na desinfecção e facilidade durante o manuseio e dosagem (LEÃO, 2008).

A água potável deve conter, no mínimo, 0,5 mg L⁻¹ de cloro residual na saída do tratamento à distribuição,

com manutenção de 0,2 mg L⁻¹ em qualquer ponto da rede, não podendo ultrapassar a concentração máxima de 2,0 mg L⁻¹, conforme Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011).

O cloro é utilizado para desinfecção e oxidação. Ao entrar em contato com a água, o mesmo se dissocia em forma de ácido hipocloroso e íon hipoclorito. O íon hipoclorito é o agente mais ativo no processo de desinfecção e é definido como cloro residual livre. Contudo, nos casos em que houver a presença de amônia, o ácido hipocloroso pode combinar em

¹ alexandreito2@gmail.com, Universidade Estadual de Maringá – UEM, Campus Maringá, Maringá, Paraná, Brasil.
² priscilapereira@utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.



monocloramina, dicloramina e tricloreto de nitrogênio, o que reduz a concentração de cloro na água (MEYER, 1994).

O cloro residual é a parcela de cloro restante na água após a cloração. Este residual poderá evitar o desenvolvimento de microrganismos durante a distribuição até ao ponto de consumo. Devido à instabilidade do cloro, torna-se necessário realizar a “recloração” em pontos estratégicos para que as concentrações máximas e mínimas possam ser atendidas. A portaria MS 2914/2011 estabelece o tempo de contato mínimo do cloro com a água, em minutos, dependendo da temperatura, do pH e da concentração de cloro livre (em mgL^{-1}) presentes na rede de distribuição de água.

O Anexo IV da Portaria 2914 apresenta o tempo de contato mínimo a ser observado para a desinfecção por meio da cloração, em minutos, sendo menor para temperaturas maiores, uma vez que quanto maior a temperatura, mais rápida é a taxa de reação do cloro. Para valores de pH elevado, ou seja, para soluções básicas, as concentrações de cloro na solução são mais elevadas, motivo pelo qual apresentam uma menor taxa de reação, necessitando de um tempo maior para realizar a desinfecção (MEYER, 1994).

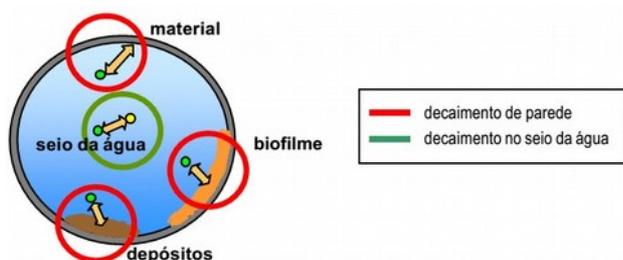


Figura 1 – Reações que contribuem para o decaimento do cloro residual
Fonte: Vieira et al. (2002)

O cloro residual possui a função de evitar o desenvolvimento de microrganismos. Deste modo, a quantidade de cloro presente na água vai sendo consumida na presença de materiais orgânicos. Outras condições que reduzem tal concentração são o pH, a temperatura, e sua volatilidade, variando a concentração do cloro ao longo do tempo. Ademais, os tipos de materiais das tubulações também interferem no decaimento do cloro.

As reações que ocorrem dentro das tubulações são classificadas como decaimento de cloro no seio da água e decaimento nas paredes da tubulação, como ilustrado na Figura 1 (VIEIRA et al., 2002).

De acordo com Beleza (2005), o decaimento no seio da água engloba três tipos principais de reações: a oxidação, em que o cloro atua como oxidante ganhando elétrons; a substituição, quando ocorre uma troca de elementos ou parte de moléculas pelo cloro; e a desinfecção, na qual ocorre a ação sobre os microrganismos presente no meio. Caso existam materiais orgânicos e/ou inorgânicos na água, a reação do cloro com estes dependerá da capacidade reativa dos mesmos. O material orgânico, embora menos reativo, pode resultar em subprodutos perigosos para a saúde, tais como os trihalometanos.

Os compostos inorgânicos, diferentemente dos compostos orgânicos, são mais reativos com o cloro, proporcionando uma redução significativa da concentração de cloro na água. Os principais componentes inorgânicos são ferro, manganês, cianetos, amônia, sulfetos de hidrogênio e nitritos (BELEZA, 2005).

O decaimento de cloro nas paredes do tubo é influenciado principalmente pelo material constituinte da tubulação, sua idade e rugosidade, conforme demonstram os estudos realizados por Hallam et al. (2002) e Al-Jasser (2007).

De acordo com estudos realizados em laboratório e publicados por Hallam et al. (2002), é possível classificar os materiais com maior grau de reação com o cloro, como: ferro fundido dúctil cinzento e ferro fundido dúctil; ferro fundido dúctil com revestimento interno betuminoso; ferro fundido dúctil com revestimento interno cimentício; ferro fundido dúctil com revestimento interno epoxy; PVC e polietileno.

Estudos de análise matemática do decaimento do cloro têm sido realizados com o intuito de propor modelos que melhor caracterizem ou se aproximem da realidade do decaimento de cloro no sistema de distribuição de água. Biswas et al. (1993) propôs modelos de decaimento da concentração de cloro em



tubos. Rossman et al. (1994) propôs a modelagem de cloro residual em sistema de abastecimento de água potável. Powell et al. (2000) propôs fatores para o controle do decaimento de cloro. Além disso, a modelagem da propagação dos contaminantes e os seus efeitos na qualidade da água são descritos nos trabalhos de Clark et al. (1993) e Grayman e Clark (1993). Estes trabalhos oferecem subsídios para a prática da “recloração”, auxiliando a determinação dos novos locais para estações de “recloração”, a fim de proporcionar uma redução no consumo total de produtos químicos, além de garantir a concentração adequada de cloro na água consumida.

Os modelos estudados são descritos por uma equação de advecção, unidimensional, podendo ser expressa pela Equação 1 (SALGADO, 2008).

$$\frac{dC_i}{dt} = -u_i \frac{dC_i}{dx} + r(C_i) \quad (1)$$

Sendo C_i a concentração (massa/volume) na tubulação i em função da distância x e do tempo t , u_i a velocidade média do escoamento (comprimento/tempo) na tubulação, i e r a taxa de reação (massa/volume/tempo), função da concentração, que representa a combinação dos efeitos das reações no escoamento e na região da parede da tubulação.

Para determinação do decaimento do cloro residual no sistema de distribuição de água, são consideradas duas variáveis: k_b relacionado ao escoamento; e k_w relacionado às regiões próximas às paredes das tubulações. Na Figura 2, são ilustradas a reação do decaimento de cloro e a variável relacionada no seio d’água e nas paredes do tubo.

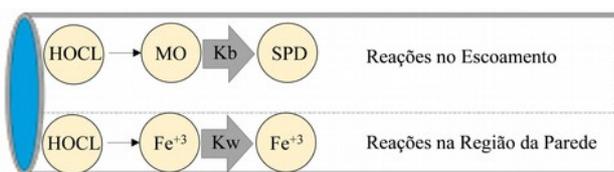


Figura 2 – Esquema ilustrativo das reações do decaimento do cloro numa tubulação de ferro
Fonte: Adaptado de Clark et al. (1993)

A soma das duas parcelas do consumo de cloro

residual, k_b a constante de decaimento de cloro na massa de água (h^{-1}) e k_w a constante de decaimento na parede (h^{-1}), fornece a constante de decaimento global K , de decaimento de primeira ordem, sendo uma constante de decaimento único, conforme a Equação 2.

$$K = k_b + k_w \quad (2)$$

Segundo Pinto (2010), a modelagem matemática é uma ferramenta que permite aplicar e replicar diferentes situações e alterações na rede de distribuição de água, sem a necessidade de mudança do sistema físico que o representa. Estes modelos matemáticos possuem o objetivo de reduzir custos operacionais, bem como de criar cenários que possibilitem a realização de manobras que sejam necessárias durante a manutenção do sistema de distribuição de água, e verificar as suas consequências.

Os modelos computacionais também auxiliam na gestão hídrica, como descreve Feil (2014), o que permite verificar a qualidade da água e os processos de monitoramento de campo, facilitando assim o diagnóstico das redes de distribuição e garantindo a distribuição da água dentro dos parâmetros da norma vigente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo corresponde ao campus da Universidade Estadual de Maringá, no município de Maringá-PR, cujos projetos da rede de água foram obtidos junto à Prefeitura do Campus Universitário (PCU).

Foram selecionados dois pontos para obtenção dos parâmetros de decaimento do cloro. O ponto 1 localizado na entrada da rede e o ponto 2 em uma das saídas da rede, conforme apresentado na Figura 3. A área delimitada em vermelho corresponde à região em que está sendo estudada, uma vez que o sistema de distribuição apresenta duas redes independentes.

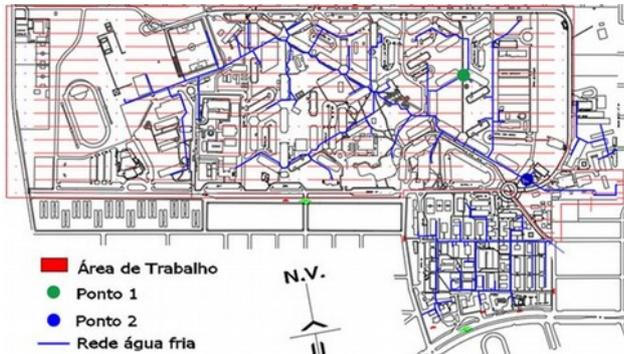


Figura 3 – Rede de distribuição de água fria da UEM e delimitação dos pontos 1 e 2 de estudo e da área de trabalho
Fonte: PCU UEM (2014)

Para coleta e análise das amostras de água nos pontos 1 e 2, foram utilizados um termômetro de mercúrio, um balde, um par de luvas e 90 frascos de 10 mL, apresentados na Figura 4. Quarenta e cinco frascos foram utilizados na entrada da rede de distribuição (ponto 1); e os outros quarenta e cinco frascos no ponto 2. Os frascos foram limpos três vezes com água destilada, para evitar contaminação, e devidamente fechados utilizando os equipamentos presentes na Figura 4.



Figura 4 – Equipamento para determinação dos coeficientes k_b e k_w

Em laboratório, foram determinadas as concentrações de cloro em intervalos de tempo de uma hora durante quinze horas para obter os coeficientes de decaimento do cloro na região da parede e do seio do escoamento. Estes coeficientes foram obtidos experimentalmente com o Teste do Jarro e para determinação do cloro utilizou-se o método DPD.

O modelo de qualidade de água do *WaterGEMS* foi calibrado utilizando-se os dados de concentração de cloro para os pontos 1 e 2, obtidos no dia 01/09/2015 e o modelo hidráulico calibrado para a rede.

3. RESULTADOS

Os coeficientes de decaimento que melhor

aproximaram os dados observados foram, no seio do fluido (*bulk fluid*), $k_b = -0,30 \text{ dia}^{-1}$, e nas paredes (*wall*), $k_w = -0,13 \text{ dia}^{-1}$. Para uma difusividade obteve-se o coeficiente de $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, característica essa que representa a capacidade que as substâncias possuem para se misturar.

Os resultados obtidos em laboratório para determinar os coeficientes de decaimento do cloro na parede e no seio do escoamento são apresentados na Figura 5.

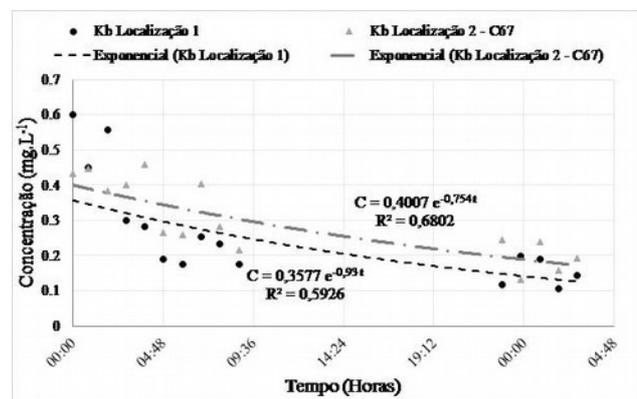


Figura 5 – Cloro residual e curva de aproximação para K_b

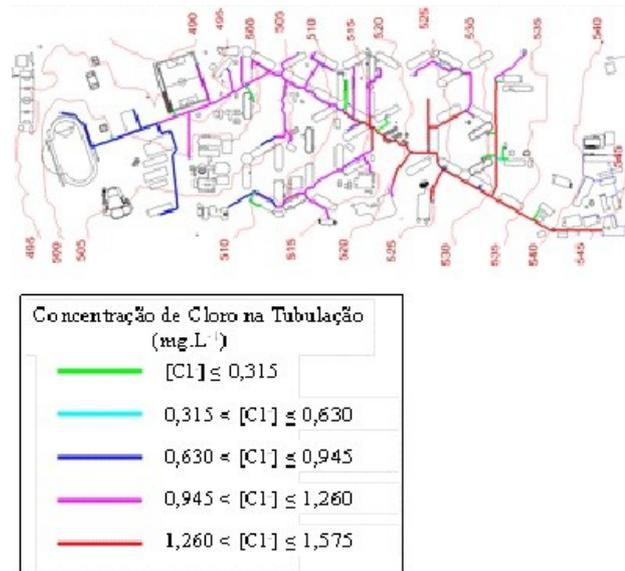


Figura 6 – Concentração de cloro na rede de distribuição no instante 330 horas

Estes dados foram inseridos no *WaterGEMS* para se analisar a concentração de cloro na rede de distribuição da universidade ao longo do tempo.

Com o modelo numérico pode ser observado que a concentração de cloro varia ao longo do dia, apresentando trechos de tubulação com concentração



de cloro menor em relação as concentrações de entrada da rede, conforme apresentado na Figura 6.

Pode ser observado também que os resultados apresentados pelo modelo foram próximos aos realizados com sensores de cloro que realizam o monitoramento em tempo real da rede de distribuição por um sistema sem fio. A Figura 6 mostra a concentração de cloro na rede analisada em um certo instante.

4. CONCLUSÃO

Para se realizar o desenvolvimento de um modelo numérico da concentração de cloro é necessário realizar a calibração do escoamento hidráulico e

REFERÊNCIAS

BRASIL. Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

AL-JASSER, A. O. Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution system: Pipe service age effect. **Water Research**, v. 41, n. 2, p. 387–396p, 2007.

BELEZA, Joaquim Manuel de Bessa Branco. **Simulação das Concentrações de Cloro Residual e Tri-halometanos em Redes de Distribuição de Água para Consumo Humano**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dissertação (Mestrado), 2005.

BISWAS, Pratim.; LU, Chungsyng; CLARK, Robert., A Model for Chlorine Concentration Decay in Pipes. **Water Research**, v. 27, n. 12, p. 1715–1724, 1993.

CLARK, Robert; GRAYMAN, Walter; MALES, Richard, HESS, Alan. Modeling contaminant propagation in drinking water distribution systems. **Journal of Environmental Engineering**, v. 119, n. 2, p. 349–364, 1993.

FEIL, Alexandre André; HAETINGER, Claus. Previsão de Consumo de Água Via Modelagem Matemática de Sistema de Abastecimento de Água. **Revista DAE**, v. 195, n. 1, p. 32–46, 2014.

GRAYMAN, Walter; CLARK, Robert. Using Computer Models to Determine the Effect of Storage on Water Quality. **Journal American Water Works Association**, v. 85, n. 7, p. 67–77, 1993.

HALLAM, N. B.; WEST, J. R.; FOSTER, C. F.; POWELL, J. C.; SPENCER, I. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. **Water Research**, v. 36, n. 14, p. 3479–3488, 2002.

determinar os parâmetros de decaimento do cloro para a região que se pretende estudar.

Desta maneira é possível prever situação em que a concentração de cloro está fora dos padrões estabelecidos pelas legislações vigentes. Permitindo assim que o gestor possa providenciar ações necessárias, antes mesmo do evento ocorrer.

Com estes resultados é possível prever o comportamento da rede e verificar a qualidade da água, sem a necessidade de realizar coleta de amostras extensivas e desnecessárias.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá.

LEÃO, Vonivaldo Gonçalves. **Água tratada: formação de trihalometanos pelo uso do cloro e os riscos potenciais à saúde pública em cidades da mesorregião do leste rondoniense**. Universidade de Brasília, Departamento de Ciências da Saúde, Dissertação (Mestrado), 2008.

MEYER, Sheila. O Uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. **Caderno Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 10 n. 1, p. 99–110, 1994.

POWELL, James C.; HALLAM, Nicholas B.; WEST, John Richard; FORSTER, C. F.; SIMM, John. Factors which controls bulk chlorine decay rates. **Water Research**, v. 37, n. 1, p. 117–126p, 2000.

PINTO, Tiago Manuel Vieira. **Modelação e calibração de um sistema de abastecimento de água**. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto FEUP, 2010.

ROSSMAN, Lewis; CLARK, Robert; GRAYMAN, Walter. Modeling chlorine residuals in drinking water distribution system. **Journal of environmental engineering**, v. 20, n. 4, p. 803–820, 1994.

SALGADO, Sérgio Ricardo Toledo. **Estudos dos Parâmetros do Decaimento de Cloro Residual em Sistema de Distribuição de Água Tratada Considerando Vazamento**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Dissertação (Mestrado), 2008.

VIEIRA, Paula; COELHO, Sérgio Teixeira, PRAÇA, Paulo. Modelação do Cloro Residual como Instrumento de Controle da Qualidade da Água em Sistemas de Abastecimento. In: **6º Congresso da Água – Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH)**, p. 90–91, 2002.



Mathematical modeling to verify the quality of drinking water distribution system

Alexandre Hitoshi Ito³ Priscila Pini Pereira⁴

19 novembro 2017

Abstract – The water distribution system must guarantee potable water for all users. One of the parameters mainly studied is the concentration of chlorine in the water to maintain the disinfection or absence of pathogens. The presence of residual chlorine allows an oxidation of potential microorganisms present in the water to the points of consumption. However, this concentration regresses along the course, and in some conditions, must perform the “rechloration” process. Therefore, it is necessary to monitor continuously the entire water distribution network, ascertaining if the concentration of chlorine in the network is within the limits established by current regulations. To support the process of management and verification of chlorine concentration in the distribution system, this work aims to apply a model to verify the variation of the concentration in the drinking water distribution system of the State University of Maringá. After hydraulically calibrating and determining the chlorine decay parameters in the pipeline, a water quality model in WaterGEMS software was generated, which presented similar results to the values that were directly monitored in the water distribution network, showing to be satisfactory for water quality assessment.

Keywords: Potable water. Chlorine monitoring. Numerical simulation. Water quality.

Correspondência:

Alexandre Hitoshi Ito

Av. Colombo, 5.790 Jd. Universitário, Maringá, Paraná, Brasil. CEP 87020-900

Recebido: 17/09/2017

Aprovado: 19/11/2017

Como citar: ITO, Alexandre Hitoshi; PEREIRA, Priscila Pini. Modelagem matemática para verificação da qualidade da água em sistema de distribuição de água potável. *Syn. scy. UTFPR*, Pato Branco, v. 12, n. 1, p. 213–218. 2017. ISSN 2316-4689 (Eletrônico). Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/synscy>>. Acesso em: DD mmm. AAAA.

DOI: “registro apenas quando a revista for depositada no portal do PERI”



Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença **Creative Commons** Atribuição 4.0 Internacional.

³ alexandreito2@gmail.com, Universidade Estadual de Maringá – UEM, Campus Maringá, Maringá, Paraná, Brasil.
⁴ priscilapereira@utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.