

Simulação do decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água

Simulation of free residual chlorine decay in water distribution reservoirs

• **Data de entrada:**
09/08/2017

• **Data de aprovação:**
26/03/2018

George Antonio Belmino da Silva* / Celeide Maria Belmont Sabino Meira /
Cícero Fellipe Diniz de Santana / Mônica de Amorim Coura / Rui de Oliveira /
Ruth Silveira do Nascimento / Whelton Brito dos Santos

DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.036>

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar a degradação da qualidade da água em reservatórios de distribuição do sistema integrado de abastecimento de água da cidade de Campina Grande, Paraíba. A determinação dos coeficientes cinéticos de decaimento de cloro residual livre foi levada a efeito com a aplicação dos modelos de 1ª ordem, 1ª ordem paralela, 1ª ordem limitada e ordem n. O coeficiente de velocidade de degradação de 1ª ordem foi considerado adequado para a descrição do decaimento do cloro residual livre e para a simulação do seu comportamento empregando o software EPANET 2.0. Uma importante conclusão do estudo foi que a variação temporal da concentração simulada de cloro residual livre refletiu o modo de operação de cada reservatório.

Palavras-chave: Degradação da qualidade da água. Decaimento de cloro residual livre. Cinética do cloro em reservatórios de distribuição.

Abstract

The objective of this study is to evaluate the degradation of water quality in distribution reservoirs of the integrated water supply system of Campina Grande City, Paraíba state, northeast Brazil. The determination of kinetic coefficients of free residual chlorine decay was carried out through the application of the following models: 1st order, parallel 1st order, limited 1st order, and nth order. The 1st order degradation rate coefficient was considered adequate for both the description of the free residual chlorine decay and the simulation of its behavior by using the software EPANET 2.0. An important conclusion of the study was that the temporal variation of the simulated free chlorine residual concentration reflected the mode of operation of each reservoir.

Keywords: Degradation of water quality. Free residual chlorine decay. Chlorine kinetics in distribution reservoirs.

George Antonio Belmino da Silva – Engenheiro Sanitarista e Ambiental (UEPB). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental (UFCG).

Celeide Maria Belmont Sabino Meira – Engenheira Civil, Arquiteta e Urbanista. Mestra em Engenharia Civil (UFPB). Doutora em Recursos Naturais (UFCG). Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UEPB).

Cícero Fellipe Diniz de Santana – Engenheiro Sanitarista e Ambiental (UEPB). Mestre e Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental (UFCG).

Mônica de Amorim Coura – Graduada em Química (Fundação Universidade Regional do Nordeste). Mestra em Engenharia Civil (UFPB). Doutora em Recursos Naturais (UFCG). Professora do Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UFCG).

Rui de Oliveira – Engenheiro Civil (UEMA). Mestre em Engenharia Civil (UFPB). PhD em Engenharia Civil (Leeds University). Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UEPB).

Ruth Silveira do Nascimento – Licenciada em Matemática (UEPB). Engenheira Civil. Mestra em Engenharia Civil (UFPB). Doutora em Recursos Naturais (UFCG). Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UEPB).

Whelton Brito dos Santos – Engenheiro Sanitarista e Ambiental (UEPB). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental (UFCG). Doutorando em Recursos Naturais (UFCG).

***Endereço para correspondência:** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, Rua Baraúnas, 351 - Bairro Universitário, Campina Grande, PB. CEP: 58428 - 500. E-mail: george_belmino@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A água na saída de uma estação de tratamento de água (ETA) é geralmente de boa qualidade e livre de contaminantes. Entretanto, durante o transporte, a água sofre um processo de degradação de sua qualidade devido ao tempo de detenção e ao estado de conservação e manutenção da rede, podendo representar risco à saúde e à segurança da população abastecida (MUNAVALLI e KUMAR, 2004; NASCIMENTO et al., 2016; AL-JASSER, 2007).

Para proteger a saúde pública, a desinfecção é aplicada à água tendo como objetivo secundário manter um residual de desinfetante em todo o sistema de distribuição, garantindo esse residual mesmo nas extremidades do sistema, limitando o crescimento bacteriano (FISHER et al., 2011; CLARK e SIVAGANESAN, 2002; LECHEVALLIER, 1999). O cloro é o desinfetante amplamente usado no mundo, produzindo eficientes resultados em sistemas públicos de abastecimento de água. Porém o cloro reage com diversas substâncias presentes na água, o que provoca o decaimento de sua concentração (CLARK et al., 1995; BOCCELLI et al., 2003; ROSSMAN et al., 1994). Esse decaimento pode ser entendido como ocorrendo em dois estágios: primeiro o cloro reage com compostos mais reativos (matéria inorgânica) e, paralelamente, reage com compostos menos reativos (matéria orgânica) (VIEIRA et al., 2004). Nas últimas décadas, vários estudos foram realizados em diversos países sobre o decaimento do cloro na água potável, e vários modelos foram propostos para descrever a cinética de decaimento desse desinfetante.

O controle da qualidade da água de consumo humano, levado a efeito pelo serviço de abastecimento, representa importante aspecto do processo de gestão de sistemas de abastecimento de variáveis graus de complexidade. Esse processo de gestão, baseado na política de fornecimento de água de boa qualidade em quantidade satis-

fatória à totalidade da população destinatária do serviço de abastecimento, deve envolver planejamento e gerenciamento contínuos, o que deve implicar na contínua tarefa de tomada de decisões apoiada em fundamentação científica. Por seu turno, a vigilância, levada a efeito pela autoridade de saúde e outro importante elemento do processo de gestão da qualidade da água, deve desenvolver ações para garantir o fornecimento de água potável segura, constituindo fator de promoção da saúde da população. Em ambos os casos, controle e vigilância, a adoção de modelos de simulação da qualidade da água torna-se indispensável, particularmente em sistemas de abastecimento de média a alta complexidades.

O objetivo deste estudo é avaliar a degradação da qualidade da água em reservatórios de distribuição do sistema integrado de abastecimento de água da cidade de Campina Grande, Paraíba, com base na determinação de coeficientes cinéticos de decaimento de cloro residual livre (CRL).

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Decaimento de cloro na massa líquida

As características da água e do sistema de abastecimento (SAA), além dos modos de operação e manutenção, determinam as reações que ocorrem na massa líquida, tornando-se difícil a determinação de um coeficiente de velocidade de degradação de desinfetante (k_b) padrão para qualquer tipo de SAA. Embora diversos autores, entre os quais Bocelli (2003) e Vieira (2004), tenham apresentado propostas para estimar k_b , esse parâmetro está muito ligado à natureza da água, tornando difícil dizer qual das proposições é melhor e, portanto, qual será o comportamento real da curva de decaimento de cloro livre. Devido à sua simplicidade, os modelos de primeira ordem são os mais utilizados; contudo, na maioria das vezes, não conseguem descrever com a exatidão

necessária o decaimento do cloro nos sistemas de distribuição (CLARK e SIVAGANESAN, 2002), tornando adequado testar o ajuste de outros modelos de decaimento.

A Tabela 1 apresenta os modelos propostos por Haas e Karra (1984) para descrever o decaimento do cloro na desinfecção de águas residuárias, mas que têm sido propostos na literatura como capazes de representar o decaimento desse desinfetante em SAA.

Tabela 1 – Modelos de decaimento de cloro

Modelo	Equação integrada	Parâmetros ajustáveis	
Primeira ordem	$C = C_0 \times \exp(-kt)$	k	Equação (1)
Enésima ordem	$C = \left[kt(n-1) + \left(\frac{1}{C_0}\right)^{(n-1)} \right]^{-\frac{1}{n-1}}$	k, n	Equação (2)
Primeira ordem limitada	$C = C^* + (C + C^*)e^{-kt}$	k, C*	Equação (3)
Primeira ordem paralela	$C = xC_0e^{-k_1t} + C_0(1-x)e^{-k_2t}$	k1, k2, x	Equação (4)

Fonte: Haas & Karra (1984).

Onde: C é, em todos os modelos, a concentração de cloro residual livre num determinado tempo t, C₀ é, onde aplicável, a concentração inicial, k é a constante de velocidade de decaimento de cloro nos três primeiros modelos, C* é a concentração limite de cloro (mgCl₂/L) que, no modelo de ordem limitada, é considerada uma parte da concentração inicial que não reage, sendo o decaimento exponencial de primeira ordem dependente da parte complementar (C₀-C*). No modelo de enésima ordem, é a ordem da reação e a constante de velocidade é proporcional à enésima potência da concentração C. O modelo de primeira ordem paralela assume que existam duas constantes específicas de velocidade: uma parte (xC₀) da concentração inicial de cloro decai exponencialmente com constante específica de velocidade k₁, e a outra (1-x)C₀ decai exponencialmente com constante específica de velocidade k₂.

De acordo com Vieira et al. (2004), o modelo de primeira ordem paralela foi o que apresentou o melhor ajuste ao real comportamento do consumo de cloro livre na massa líquida, por apresentar

dois estágios de degradação do cloro, sendo o inicial mais rápido, no qual ocorrem rápidas reações do cloro com organismos e substâncias presentes na água, e o segundo estágio mais lento, no qual estão presentes menos matérias para reagir com o desinfetante, o que difere do modelo de primeira ordem que é bastante empregado nas modelações da qualidade da água.

Para Munavalli e Kumar (2003), o decaimento do cloro na massa de água está, de certa forma, definido e pode ser cabível admitir reações de primeira ordem nos modelos de qualidade.

O desempenho dos modelos que representam o decaimento do cloro depende dos valores dos seus respectivos parâmetros para a representação do decaimento de cloro na rede, sendo necessário considerar alguns pontos, como a representatividade, a complexidade para determinação de parâmetros, a flexibilidade e a praticidade do modelo adotado (SALGADO, 2008).

A literatura aponta a necessidade de incorporar nos modelos os fatores que influenciam o decai-

mento do cloro, como a temperatura, a concentração inicial de cloro, a concentração de matéria orgânica natural e as condições hidráulicas do escoamento, de maneira a deixá-los mais robustos (FIGUEIREDO, 2014).

Os diferentes parâmetros dos vários modelos são estimados por meio da aplicação dos modelos a ensaios experimentais de laboratório, denominados genericamente por testes da garrafa (*bottle tests*) (POWELL et al., 2000).

2.2 Degradação da qualidade da água em reservatórios de distribuição

A degradação da qualidade da água em reservatórios está diretamente relacionada com a sua estagnação, a qual tem relação com o tempo de permanência da água. Fatores como o modo de operação, o volume do reservatório e a demanda de água no setor atendido determinam o tempo de permanência. O plano de manutenção do reservatório também exerce influência sobre a degradação da qualidade da água, por prever a descarga de sedimentos e a limpeza do reservatório.

Um tempo de permanência elevado propicia o crescimento de bactérias e a perda de desinfetante residual, dificultando a manutenção de concentrações ótimas de cloro residual livre (CRL) na rede de distribuição de água. Além disso, é necessário que haja uma boa mistura da água no reservatório, sendo imprescindível uma reno-

vação do seu volume, reduzindo a estagnação da água (PIZARRO, 2012). A renovação de água no reservatório está diretamente relacionada à demanda de água da rede, variando as concentrações de CRL no seu interior de acordo com o ciclo diário de consumo.

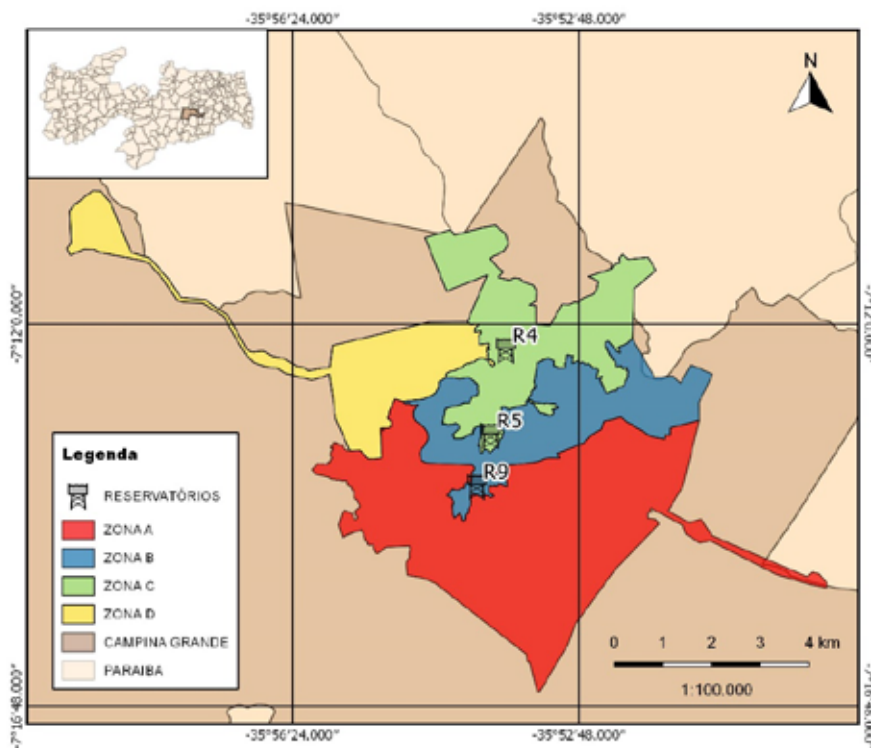
A operação dos reservatórios é um fator que deve ser levado em consideração na avaliação da degradação da qualidade da água. Reservatórios que operam como poço de sucção permitem grande renovação da água; já reservatórios operados em batelada, em ciclos de enchimento/ esvaziamento, favorecem a estagnação e, conseqüentemente, a maior degradação da qualidade e uma maior demanda de cloro residual livre (NASCIMENTO et al., 2016).

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da área de estudo

O objeto de estudo deste trabalho são os reservatórios de distribuição R9, R5 e R4 que compõem o sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande (7°13'20,34"S e 35°52'24,48"O), sede do município homônimo situado na mesorregião do Agreste Paraibano apresentando uma população estimada de 407.754 habitantes (IBGE, 2016).

A rede é dividida em quatro Zonas de Pressão, A, B, C e D. A Figura 1 ilustra a localização das zonas e dos reservatórios estudados.

Figura 1 - Localização dos reservatórios R9, R5 e R4 e zonas de pressão

Os reservatórios R9 e R5 são os dois principais do sistema de distribuição de água e são responsáveis pelo recebimento de águas provenientes do sistema adutor de água tratada. O R9 tem capacidade de 29.000 m³, recebe água de três adutoras de água tratada, com diâmetros de 500, 700 e 800 mm, e abastece as Zonas de Pressão A e D, onde se encontram aproximadamente 61% das economias atendidas pelo sistema.

O reservatório R5 tem capacidade de 8.000 m³, é alimentado por uma derivação da adutora de 700 mm e abastece as Zonas de Pressão B e C, onde estão localizados bairros que possuem elevado índice de população flutuante, igrejas, colégios, comércios e clínicas. Essas Zonas de Pressão estão situadas nas partes norte e central da cidade, possuem 50.445 economias e abrangem os bairros mais comerciais da cidade.

O reservatório R4 abastece parte da Zona de Pressão C, tem capacidade de 10.000 m³, sendo alimentado

diretamente pelo reservatório R5. Esse sistema de alimentação (R5-R4) tem ênfase neste trabalho por possibilitar a avaliação da qualidade de água de reservatórios em série, comuns no sistema de abastecimento de água de Campina Grande.

3.2 Determinação das constantes cinéticas de degradação de cloro residual livre nos reservatórios

O decaimento do cloro residual livre foi avaliado por meio do “teste da garrafa”, que permite medir unicamente o efeito das reações que ocorrem no seio da água. Esse teste consiste em coletar amostras de água em fracos âmbar, mantidos sob condições controladas de temperatura e luminosidade, para posterior determinação do cloro residual livre em intervalos regulares de tempo. Foram testadas águas coletadas em torneiras localizadas imediatamente após a saída de cada um dos três reservatórios investigados.

Os testes foram realizados semanalmente, no período de junho a dezembro, durante cinco campanhas para cada reservatório com ensaios com duração total de 75 minutos, em intervalos de 15 minutos entre uma determinação e outra.

A determinação do CRL foi realizada por meio do método titulométrico DPD-SFA, conforme descrito no Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2012). O monitoramento da temperatura, durante os testes, foi realizado com um termômetro infravermelho modelo CEM DT – 8867H tipo K 3002F.

A determinação dos coeficientes cinéticos de degradação de cloro residual livre foi realizada por meio de ajustes de modelos, de 1ª ordem, 1ª ordem limitada, 1ª ordem paralela e ordem n, aos dados experimentais obtidos pelo teste da garrafa, sendo esses ajustes realizados com base no método dos mínimos quadrados, e os parâmetros de cada modelo estimados por meio da minimização da soma dos quadrados dos resíduos utilizando a ferramenta “Solver” do software Microsoft Excel 2013 pelo método “*trial and error*”, conforme detalhado no parágrafo seguinte.

O ajuste dos modelos com base nos dados experimentais foi realizado utilizando as seguintes etapas: 1) Cálculo das concentrações de CRL ao longo do tempo no modelo a partir da concentração inicial experimental; 2) Cálculo dos quadrados dos resíduos entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo ao longo do tempo; 3) Obtenção do somatório dos quadrados dos resíduos; 4) Aplicação da ferramenta “Solver” para a minimização desse somatório, variando os parâmetros do modelo. Os parâmetros ajustáveis de cada modelo estão listados na Tabela 1.

3.3 Simulação do comportamento do cloro residual livre

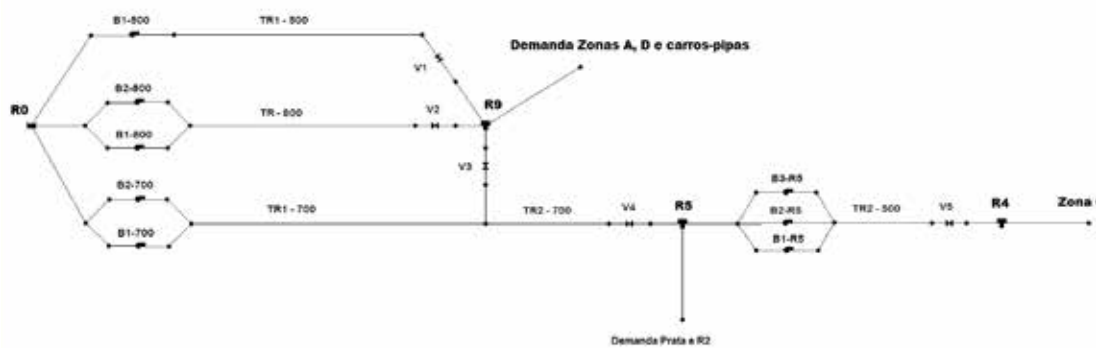
Com o uso do software EPANET 2.0, foi realizada a simulação do comportamento da qualidade da água, com o traçado da rede (Figura 2) construído a partir da planta real do sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande.

A água que abastece os reservatórios de distribuição estudados é proveniente do reservatório (RO) de água tratada. Localizado na estação de tratamento, funcionando em sua capacidade máxima como poço de sucção, foi considerado no modelo como reservatório de nível fixo (RNF). A concentração inicial de CRL atribuída para esse reservatório foi de 5,0 mgCl₂/L, correspondente ao valor mais frequente de CRL na saída do reservatório, segundo boletins de monitoramento da qualidade da água fornecidos pelo setor de controle da qualidade de água da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

Por seu turno, os reservatórios R9, R5 e R4 foram considerados como reservatórios de nível variado (RNV) por operarem continuamente recebendo e distribuindo água nova.

O tempo de duração total da simulação foi de 336 horas (duas semanas), apresentando uma configuração básica com intervalos iguais a 5 segundos para os cálculos hidráulicos e de qualidade, com o objetivo de representar melhor o comportamento hidráulico e a distribuição do cloro residual livre. O uso de um tempo igual para os intervalos ajuda na coerência da simulação, devido aos módulos computacionais determinantes das condições de qualidade da água apresentarem dependência com o modelo hidráulico (NASCIMENTO, 2016).

Figura 2 – Traçado da rede de abastecimento



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As determinações de CRL ao longo do tempo obtidas pelo teste da garrafa foram plotadas em gráficos, conforme apresentado nas Figuras 3 a 5.

Figura 3 – Testes da garrafa no reservatório R9

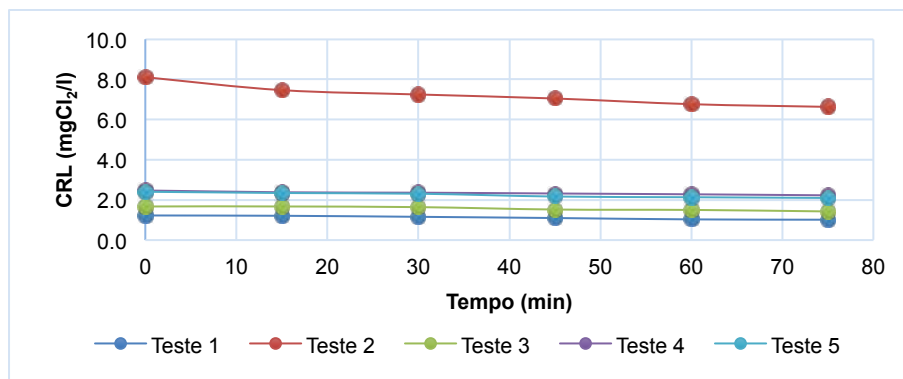


Figura 4 – Testes da garrafa para o reservatório R5

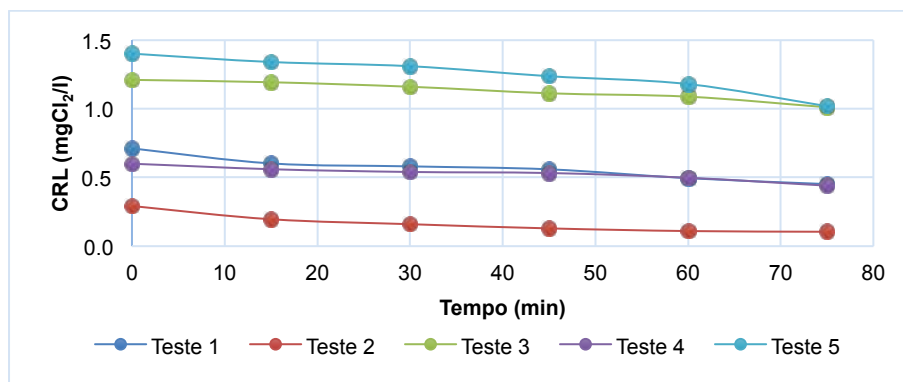
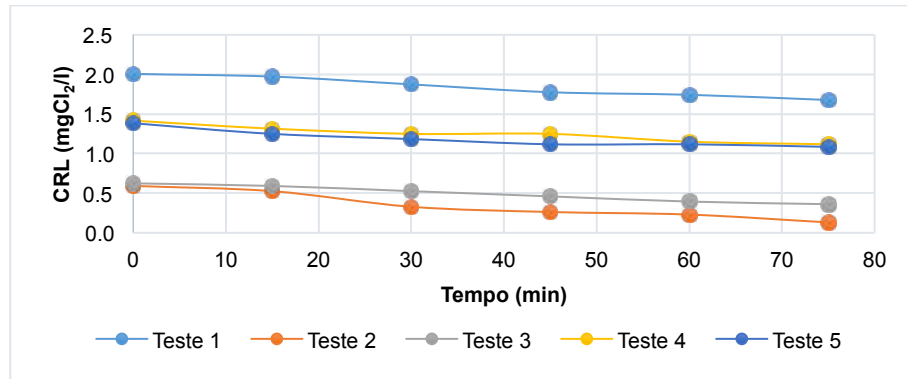


Figura 5 – Testes da garrafa para o reservatório R4



A realização dos ensaios teve como objetivo determinar as constantes cinéticas de decaimento do CRL na massa líquida (k_p), que descrevem a velocidade em que ocorrem as reações do cloro com diversos compostos presentes na água. De acordo com as figuras apresentadas, pode ser verificado que o CRL em solução vai decaindo ao longo do tempo, devido a reações de oxirredução com as espécies químicas e microbianas presentes na água. A temperatura média estimada com base na monitoração dessa variável ao longo dos testes foi de 26,6 °C.

Os valores médios de pH das águas dos reservatórios de distribuição analisados variaram entre 6,7 e 7,0.

4.1 Coeficientes cinéticos de decaimento

As Figuras 6 a 8 apresentam os ajustes dos modelos cinéticos para os testes de decaimento de CRL referentes aos reservatórios R9, R5 e R4, respectivamente. Essas figuras referem-se a testes considerados típicos para cada reservatório e que foram escolhidos para ilustrar os ajustes dos modelos cinéticos.

Figura 6 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R9

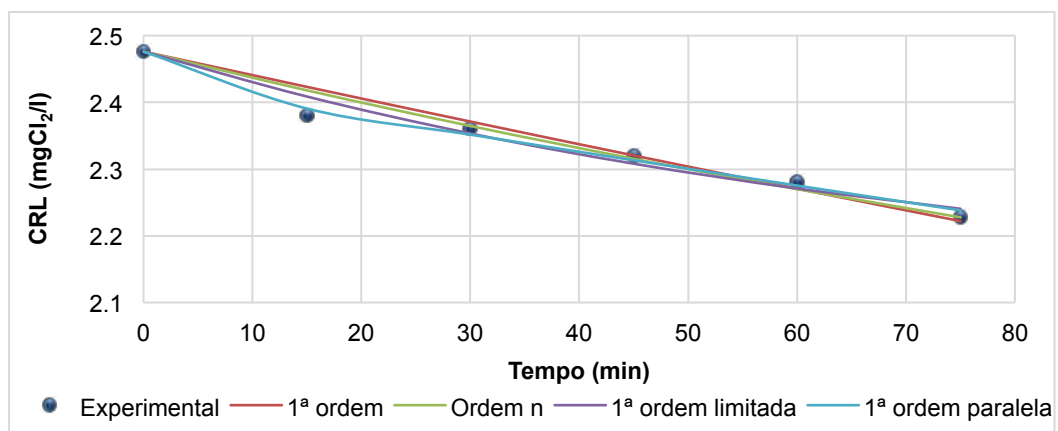


Figura 7 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R5

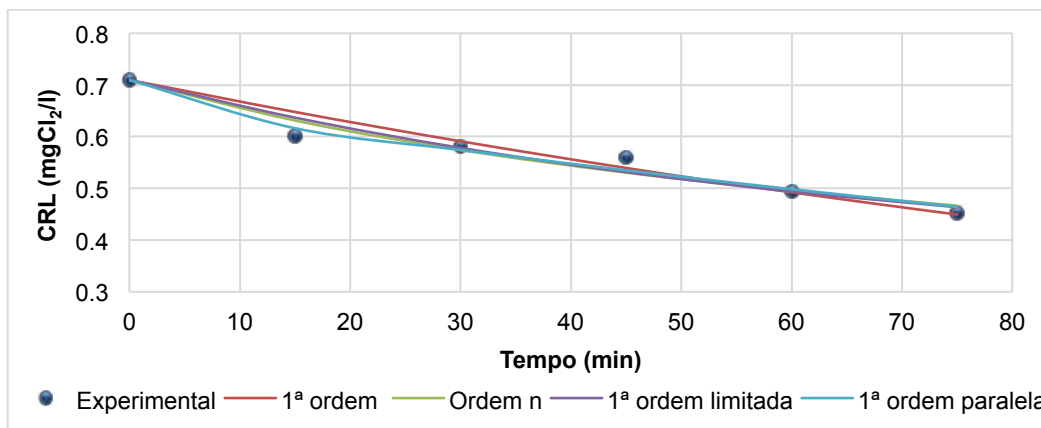
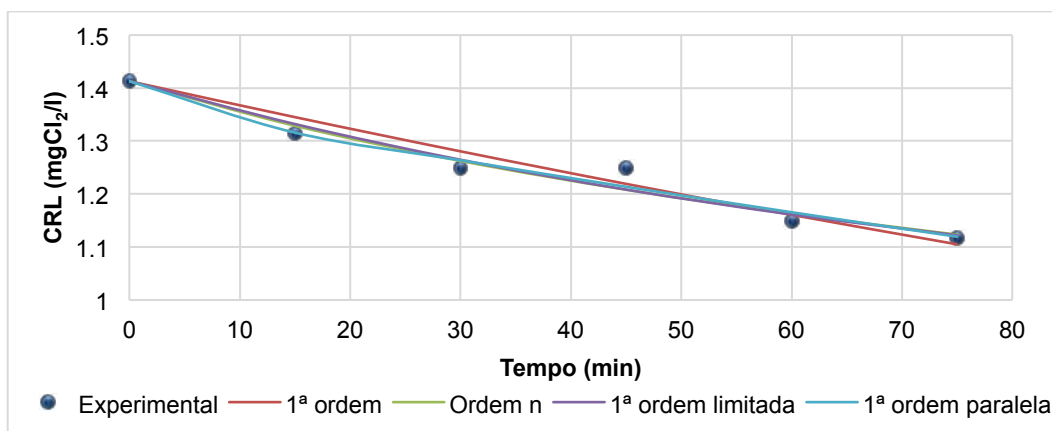


Figura 8 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R4



A Tabela 2 apresenta os valores médios e os respectivos desvios padrões de todos os coeficientes de decaimento do cloro residual livre e de correlação obtidos nos diferentes testes da garrafa para cada modelo estudado.

Tabela 2 – Valores médios obtidos para os modelos estudados

Modelo cinético	Parâmetro ajustável	R9		R5		R4	
		*n = 5		*n = 5		*n = 5	
		Média	σ_{n-1}	Média	σ_{n-1}	Média	σ_{n-1}
1ª ordem	k	0,0022	0,0006	0,0064	0,0062	0,0068	0,0061
	R	0,9344	0,0257	0,9258	0,0139	0,9377	0,0572
Ordem n	k	0,0014	0,0015	0,0536	0,1054	0,0037	0,0043
	n	2,1309	2,2332	1,1169	1,5381	3,2300	3,9856
	R	0,9532	0,0223	0,9505	0,0287	0,9755	0,0127
1ª ordem limitada	k	0,0116	0,0081	0,0143	0,0151	0,0149	0,0127
	C*	2,3349	2,3624	0,3631	0,2033	0,4357	0,5162
	R	0,9484	0,0329	0,9314	0,0446	0,9695	0,0157
1ª ordem paralela	k1	0,0021	0,0009	0,0061	0,0016	0,0073	0,0084
	k2	0,3065	0,3576	0,1736	0,2660	0,3144	0,2678
	x	0,9938	0,0581	1,7797	1,2879	1,0211	0,1280
	R	0,9791	0,0123	0,9673	0,0272	0,9845	0,0110

* n= número de testes.

A maioria dos autores tende a considerar o coeficiente de correlação como principal critério para a hierarquização no processo de escolha dos modelos cinéticos. Como pode ser verificado, os coeficientes de correlação médios referentes ao ajuste de todos os modelos cinéticos foram muito elevados, superiores a 0,92, mas os modelos de 1ª ordem limitada, 1ª ordem paralela e ordem n apresentaram coeficientes mais elevados e mais semelhantes entre si.

Os coeficientes de correlação referentes ao modelo de 1ª ordem paralela foram os mais elevados, o que, à primeira vista, parece demonstrar um melhor ajuste do modelo, conforme descrito por Vieira et al. (2004) e Beza (2005). Mas um exame mais acurado dos coeficientes k_1 e k_2 mostra uma contradição no significado desses coeficientes, os quais devem descrever reações rápidas e lentas, respectivamente. O ajuste, no entanto, mostra o contrário: o que deve estar associado ao relativamente curto período, somente 75 minutos, de duração do teste da garrafa, sugerindo que esse modelo só deve ser considerado para ensaios de longa duração.

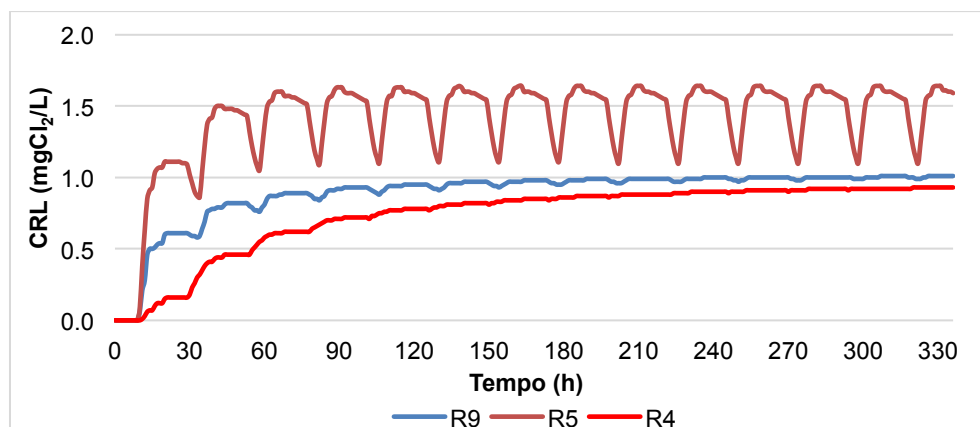
Pelo critério do coeficiente de correlação, os modelos de ordem n e de primeira ordem limitada apresentam bons resultados, mas o software si-

mulador EPANET 2.0 apresenta limitações para a simulação do decaimento do cloro residual livre conforme esses modelos cinéticos. O simulador exige o uso de uma única ordem n para a simulação do comportamento do desinfetante, mas os resultados mostraram diferentes ordens para os três reservatórios analisados, inviabilizando a adoção desse modelo para simulação. Por seu turno, a adoção do modelo de primeira ordem limitada exigiria a introdução de rotinas de programação que possibilitassem a inserção dos valores da concentração do desinfetante que não reage (C^*). Assim, apesar de apresentar o menor coeficiente de correlação, o modelo de primeira ordem, em virtude de ser amplamente reconhecido como capaz de representar o comportamento cinético do cloro residual livre, além de ser mais simples computacionalmente, entre outras vantagens, foi o modelo escolhido para a aplicação no simulador.

4.2 Simulação do decaimento do cloro

A simulação do decaimento do cloro residual livre na massa líquida dos reservatórios, ilustrada na Figura 9, foi feita utilizando os coeficientes cinéticos de 1ª ordem.

Figura 9 – Simulação da variação temporal do cloro residual livre nas águas dos reservatórios R9, R5 e R4



A Figura 9 apresenta a simulação do comportamento do CRL para um intervalo de tempo de duas semanas, podendo ser observados ciclos de variação da concentração de CRL nos reservatórios, coincidindo com os ciclos diários de consumo e, conseqüentemente, com a renovação da água.

O reservatório R5 apresenta uma concentração de cloro mais elevada e uma variação considerável no ciclo diário por operar como poço de sucção, experimentando, portanto, renovação contínua de água. A queda da concentração observada no gráfico coincide com o período de maior consumo, a partir das 17h. Logo após, a concentração de cloro vai aumentando conforme a entrada de água nova, contrastando com o comportamento dos reservatórios R9 e R4, operados essencialmente como reservatórios de distribuição, nos quais não é observado esse ciclo de variação. O R9 é um reservatório de grandes dimensões e elevado tempo de detenção hidráulica, resultando numa maior estagnação da água e, conseqüentemente, maior grau de degradação do desinfetante. Por outro lado, o reservatório R4 por ser operado em série com o R5, apresenta concentrações mais baixas e mantém um perfil de simulação temporal típico de reservatórios de distribuição, como o R9.

5 CONCLUSÕES

A simulação do decaimento do cloro residual livre, indicador sentinela, é uma importante ferramenta no processo de tomada de decisão no âmbito da gestão da qualidade da água;

O modelo cinético de 1ª ordem demonstrou ser adequado para descrever o decaimento do cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água;

A variação temporal da concentração simulada de cloro residual livre refletiu o modo de operação de cada reservatório. O perfil temporal da

concentração do desinfetante no reservatório R5, que opera como poço de sucção, apresentou variações associadas às variações de consumo de água no ciclo diário, contrastando com os perfis dos reservatórios R9 e R4, que são operados como reservatórios de distribuição de água.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-JASSER, A.O. Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. **Water Research**. 41 (2): 387-396. 2007.
- APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22th ed. Washington, D.C. 2012.
- BELEZA, J. M. B. B. **Simulação das concentrações de cloro residual e trihalometanos em redes de distribuição de água para consumo humano**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.
- BOCCELLI, D. L., TRYBY, M. E., UBER, J. G., SUMMERS, R. S. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions. **Water Research**. 37 (11): 2654-2666. 2003.
- CLARK R. M., ROSSMAN L. A., WYMER L. J. Modeling distribution system water quality: regulatory implications. **Journal of Water Resources Planning and Management ASCE** 121 (6): 423-428. 1995.
- CLARK, R., SIVAGANESAN, M. Predicting Chlorine Residuals in Drinking Water: Second Order Model. **Journal of Water Resources Planning and Management ASCE**. 128 (2): 152-161. 2002.
- FIGUEIREDO, D. M. D. **Modelação do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Técnico Lisboa, 2014.
- FISHER, I.; KASTL, G.; SATHASIVAN, A. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. **Water Research**. 45 (16): 4896-4908. 2011.
- HAAS C. N., KARRA S. B. Kinetics of Wastewater Chlorine Demand Exertion. **Journal WPCF**, 56 (2): 170-173. 1984.
- LECHEVALLIER, M. The case for maintaining a disinfectant residual. **Journal of American Water Works Association** 91 (1), 86-94.1999.
- MUNAVALLI, G.R., KUMAR M. S. M. Dynamic simulation of multi-component reaction transport in water distribution system. **Water Research**. 38 (8): 1971-1988. 2004.

NASCIMENTO, R.S. **Modelo conceitual para a gestão da qualidade da água em sistemas de abastecimento de médio porte.** 2007. 198f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.

NASCIMENTO, R.S.; CURI, R.C.; CURI, W.F.; OLIVEIRA, R.; SANTANA, C.F.D.; MEIRA, C.M.B.S. Simulação de alterações numa ETA convencional de porte médio para a produção de água segura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** 21 (2): 439-450. 2016.

PIZARRO, R. G. N. P. **A mistura em reservatórios de sistemas de distribuição de água: Um estudo de caso.** Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

POWELL, J. C.; HALLAM, N. B.; WEST, J. R.; FORSTER, C. F.; SIMMS, J. Factors which control bulk chlorine decay rates. **Water Research.** 34 (1): 117-126. 2000.

ROSSMAN, L. A., CLARK, R. M., GRAYMAN, W. M. Modelling chlorine residuals in drinking water distribution systems. **Journal of Environmental Engineering ASCE.** 120 (4): 803-820. 1994.

SALGADO, S. R. T. **Estudo dos parâmetros do decaimento do cloro residual em sistema de distribuição de água tratada considerando vazamento.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

VIEIRA, P., COELHO, S. T., LOUREIRO, D. Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modelling chlorine decay in water supply. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA.** 53(7): 453-467. 2004.