
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DECAIMENTO DE CLORO RESIDUAL LIVRE NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE UMA COMUNIDADE DE LONDRINA

COMPUTER SIMULATION OF FREE RESIDUAL CHLORINE DECAY IN A COMMUNITY WATER DISTRIBUTION SYSTEM IN LONDRINA

Matheus Esgote de Almeida¹
Carolina Alves do Nascimento Alvim²
Mirian Ribeiro Alves Maiola²
Rigoberto Lázaro Prieto Cainzos²

RESUMO

A concentração de Cloro Residual Livre-CRL na água é um importante indicador da qualidade microbiológica da água e integridade do sistema de distribuição. Este trabalho objetivou estudar o decaimento CRL por meio da modelagem computacional da rede de distribuição de água do Patrimônio Selva em Londrina – PR. A modelagem foi realizada utilizando o software EPANET, sendo considerados o projeto real da rede, reservatório e elevatória. Para calibração do modelo, foi realizada medida *in loco* de pressão e coleta de amostras para análise de CRL. Os resultados demonstraram que a concentração de CRL na rede atendem aos valores máximos permitidos pelo padrão de potabilidade, no entanto, acima da faixa recomendada. A superdosagem de cloro e decaimento acelerado do cloro na rede sugerem o desgaste da tubulação.

Palavras-chave: Modelagem computacional. EPANET. Coeficiente de decaimento.

ABSTRACT

The concentration of free residual chlorine - FRC in water is a crucial indicator of its microbiological quality and distribution systems integrity. The objective of this research is to study, through computational modeling, the decay of FRC in a water distribution system located in Patrimonio Selva, Londrina – PR. The modeling was carried out using the EPANET software, while considering the real project of the water distribution system, reservoir, and the water pumping station. On-site measurements of pressure and samples gathering for FRC analysis were conducted for the calibration of the model. The results pointed out that the concentration of free residual chlorine (FRC) in the distribution system meets the values allowed by the standards of potability, however, above the recommended range. Finally, the overdosage and accelerated decay of chlorine in the distribution system suggest pipeline deterioration.

Keywords: Computational modeling. EPANET. Decay coefficient.

¹ Acadêmico em Engenharia Civil – Centro Universitário Filadélfia – UNIFIL; E-mail: matheusalmeyda@edu.unifil.br

² Docentes do Centro Universitário Filadélfia

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o índice de atendimento com rede de abastecimento de água é de 83,7% do total da população, ou de 92,9% quando considerada apenas a população urbana. No entanto, este índice é bastante heterogêneo no país, sendo a região Norte a mais distante da universalização dos serviços com índices de atendimento total e urbano de 57,5% e 70,4% respectivamente (BRASIL, 2020). Para atendimento da legislação, a infraestrutura de saneamento deverá atrair investimentos nos próximos anos, visando a ampliação do abastecimento.

Dentre as infraestruturas necessárias para ampliação do abastecimento de água, está a rede de distribuição de água, parte do sistema formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas (ABNT, 1994). A rede de distribuição é o componente de maior custo do sistema de abastecimento de água, correspondendo a cerca de 50 a 75% do custo total dos sistemas de abastecimento (TSUTIYA, 2006).

A operação de sistemas de abastecimento de água potável, composto pelas obras de captação, adução, tratamento, estações de bombeamento, redes de distribuição, reservatórios e dispositivos de controle (válvulas), compreende um conjunto de ações necessárias à distribuição da água, aos pontos de consumo, com boa qualidade e em quantidade suficiente. Essa operação constitui-se na principal ação de gestão das empresas de saneamento, influenciando diretamente na qualidade do sistema de abastecimento em termos sanitários, ambientais, econômicos e sociais (GOMES, 2019).

Para ser considerada potável, a água distribuída deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 do ministério da saúde. Para garantir a segurança microbiológica da água até o seu consumo, o padrão de potabilidade prevê a manutenção de cloro residual livre na água fornecida superior a 0,5 mg L⁻¹. O excesso de cloro também pode provocar danos à saúde sendo estabelecido o valor máximo permitido de 5,0 mg L⁻¹ porém recomendada a concentração máxima de 2,0 mg L⁻¹ (BRASIL, 2021).

Assim, a concentração de cloro residual livre é importante indicador da

qualidade microbiológica da água sendo necessário mantê-la entre os valores previstos no padrão de potabilidade para preservação da potabilidade. No entanto, durante o percurso pela rede de distribuição, o cloro reage com substâncias presentes na água e nas paredes das tubulações, podendo ter sua capacidade de desinfecção reduzida ou eliminada (SILVA *et al.*, 2019).

Em redes de distribuição grandes e complexas, a modelagem computacional pode ajudar na definição de pontos críticos para coleta e análise do cloro residual livre (SUSE *et al.*, 2014; HOFFMAN *et al.*, 2018). Entre os softwares disponíveis, destaca-se o EPANET, software livre desenvolvido pela agência de proteção ambiental americana, que permite modelar sistemas hidráulico para estudo de pressões e qualidade da água.

O Patrimônio de Selva localiza-se 14 quilômetros ao sul do centro de Londrina-PR, tem como característica ser uma região suburbana, com sistema próprio de abastecimento, formado por um poço tubular profundo, rede e reservatório de Jusante. Por se tratar de uma área de povoamento antigo, apesar de existir cadastro da rede de distribuição existente, pouco se sabe sobre seu ano de implantação bem como a integridade do sistema de distribuição, sendo imperativo o monitoramento da qualidade da água nesta localidade.

9

1.2 Objetivo

Desta forma, este estudo teve como objetivo realizar a modelagem computacional do decaimento do cloro residual livre na rede de distribuição de água do Patrimônio Selva em Londrina-PR, com o uso do software EPANET, visando aferir o atendimento ao padrão de potabilidade.

2 METODOLOGIA

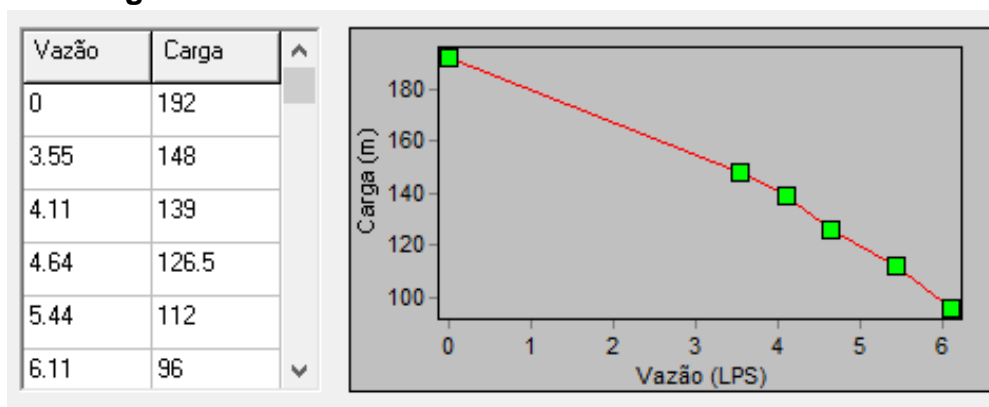
2.1 Apresentação da área de estudo e variáveis utilizadas

O Patrimônio Selva, comunidade tradicional de Londrina, distante 14 km ao sul da região central, sofre com problemas de potabilidade e desabastecimento. O

sistema de distribuição de água é independente do sistema municipal, sendo composto por 1 poço tubular profundo que realiza a captação do aquífero Serra Geral. O terreno onde está localizado o poço está localizado na cota 440 metros, instalado na profundidade 54 metros, com nível dinâmico de 36 metros e vazão de $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O aquífero é modelado como um Reservatório de Nível Fixo – RNF de cota 404 metros.

O recalque é realizado por uma bomba submersa da Marca Leão modelo R20A, tipo monobloco de 11 estágios, potência nominal de 11 CV e pressão de *shutoff* de 192 mca. A curva de operação da bomba foi obtida na página do fabricante e inserida no modelo, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Curva da bomba utilizada no Patrimônio Selva.



Fonte: O autor (2021).

A cloração é realizada no poço, sendo dosado $5,1 \text{ mg L}^{-1}$ de cloro. A água clorada é bombeada em marcha para a rede de distribuição de água, existindo um reservatório de jusante. O acionamento do sistema produtor é realizado por meio de eletrodos de nível localizados no reservatório. O reservatório de jusante atua como um Reservatório de Nível Variável – RNV, com diâmetro de 2,50 metros, totalizando até 29 m^3 de água sendo 15 m^3 úteis. O reservatório está localizado na cota 491 metros, apresentando nível de água variável entre 3,0 e 6,0 metros. A Figura 2 apresenta a entrada de dados no RNV.

Figura 2 - Entrada de dados do RNV.

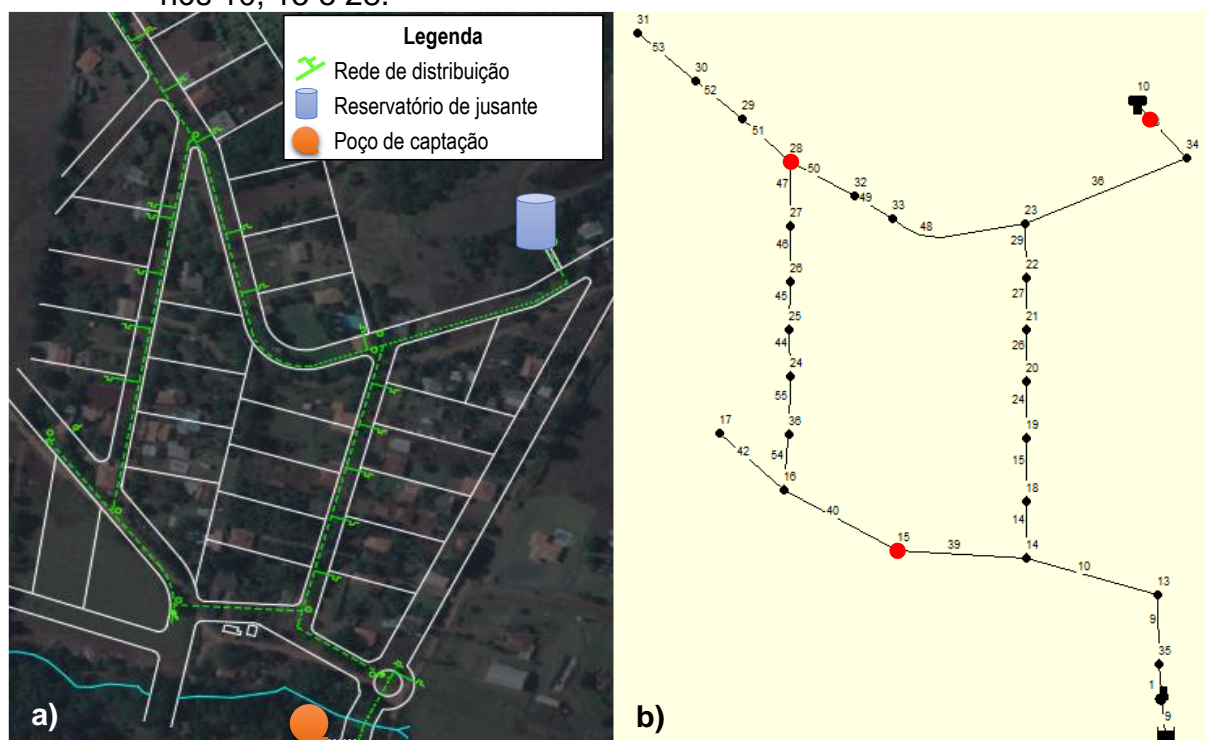
RNV 10	
Propriedade	Valor
*Cota	491
*Altura de Água Inicial	5.0
*Altura de Água Mínima	3.0
*Altura de Água Máxima	6.0
*Diâmetro	2.5

Fonte: O autor (2021).

A rede de distribuição tem aproximadamente 1470 metros de extensão com 28 trechos e 29 nós. Cada um desses nós representa a simplificação do ponto de abastecimento de uma ou mais economias e possui seu consumo base alocado com de acordo com as quantidades aproximadas de economias atendidas. A Figura 3 apresenta a imagem de satélite da comunidade com os pontos principais do sistema de abastecimento bem como o modelo hidráulico.

11

Figura 3 - a) Localização dos principais componentes do sistema de abastecimento e b) Modelo hidráulico da rede elaborado no EPANET com destaque para os nós 10, 15 e 28.



Fonte: O autor (2021).

O comprimento e diâmetro de cada trecho da rede de distribuição foi obtido no cadastro técnico da rede, sendo diâmetro de 50 mm em PVC, com coeficiente de rugosidade 135. As cotas topográficas dos nós da rede foram obtidas por meio das curvas de nível do cadatro. A Figura 4 apresenta um exemplo de lançamento de dados nos nós e nos trechos da rede.

Figura 4 - Lançamento de dados da rede de distribuição a) trechos e b) nós.

Trecho 17 a)		Nó 2 b)	
Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
*Identificador do Trecho	17	*Identificador do Nó	2
*Nó Inicial	4	Coordenada X	3489.42
*Nó Final	3	Coordenada Y	1720.38
Descrição		Descrição	
Zona		Zona	
*Comprimento	124.48	*Cota	463.5
*Diâmetro	50	Consumo-Base	0.05
*Rugosidade	135	Padrão de Consumo	

Fonte: O autor (2021).

A simulação foi realizada em tempo estendido com duração de 7 dias (168 horas), com intervalo de cálculo hidráulico de 01:00 hora e intervalo de cálculo de qualidade da água de 0:05 horas. Para a simulação da qualidade da água, foi utilizado o coeficiente de decaimento do cloro no seio do líquido (K_b) de - 0,191, conforme recomendação de Salgado (2008). O valor do coeficiente de decaimento do cloro na parede da tubulação (K_w) foi obtido na etapa de calibração.

2.2 Medidas *in loco* e calibração

Para calibração das vazões e pressões do modelo, foi instalado um manômetro digital tipo DATA-LOGGER, da marca LAMON no reservatório de jusante – RNV (nó 10), programado para registrar o horário e a pressões a cada 5 minutos por 20 horas, com início as 10:00 horas e término às 5:00 horas do dia seguinte. A Figura 5 apresenta o manômetro digital e o local de instalação.

Para a calibração da qualidade da água, foram realizadas coletas de amostras de água de 4 pontos do sistema de abastecimento, sendo do poço tubular profundo - RNF (nó 9), do reservatório de jusante – RNV (nó 10) e do cavalete de duas residências (nós 15 e 28).

Figura 5 - Manômetro digital e local de instalação.



Fonte: O autor (2021).

Após a coleta, as amostras foram levadas até o LabTAR - Laboratório de tratamento de águas e resíduos da Universidade Estadual de Londrina (UEL) para análise imediata de cloro residual livre. As análises foram realizadas pelo método espectrofotométrico com DPD, em um fotômetro Macherey Nagel modelo PF-3, conforme método SM 4.500 CL (APHA, AWWA, WEF, 2018). A Figura 6 apresenta o equipamento utilizado e uma amostra em análise.

Figura 6 - Fotômetro PF-3 utilizado e amostra após a adição do reagente DPD.



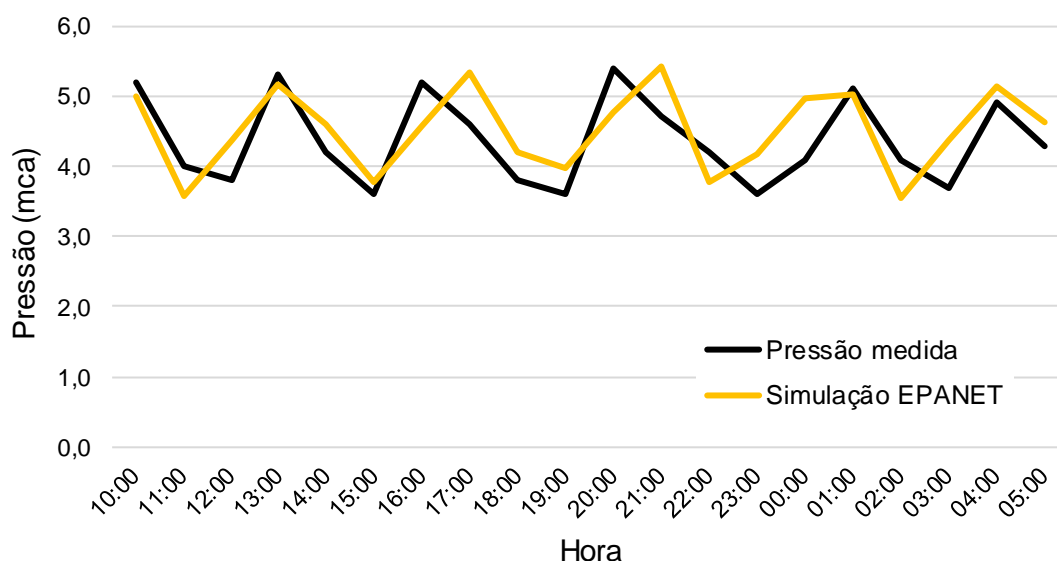
Fonte: O autor (2021).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados coletados pelo manômetro digital sobre a variação de pressão naquele no reservatório de jusante – RNV (nó 10), foi possível calibrar os pontos de início e parada da bomba, de forma que o modelo computacional representasse os dados obtidos em campo. As pressões medidas in loco e as pressões simuladas computacionalmente para o nó 10 após a calibração são apresentadas na Figura 7.

14

Figura 7 - Comparação de pressões medidas e simuladas no modelo hidráulico.



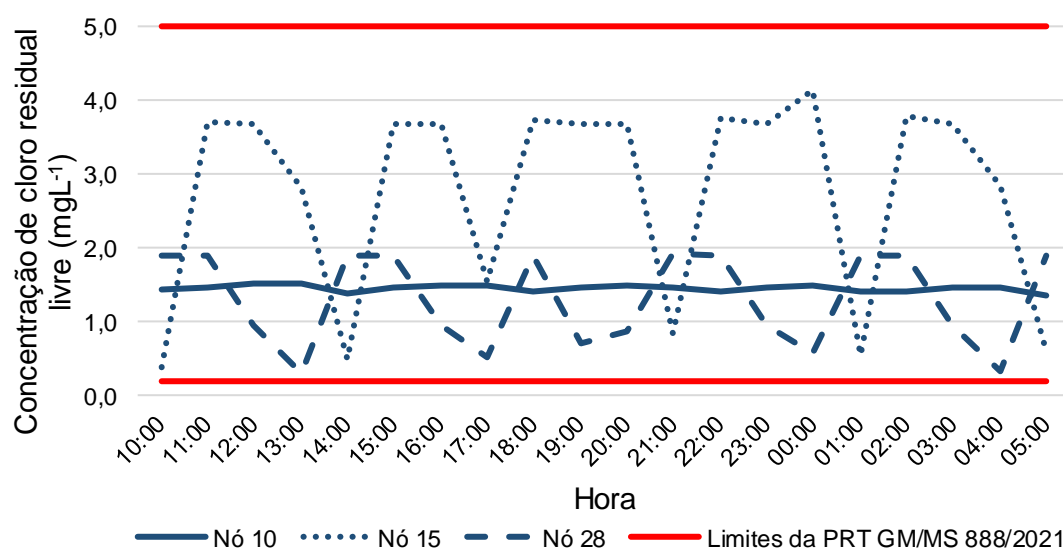
Fonte: O autor (2021).

Após a calibração hidráulica do modelo computacional, iniciou-se a calibração das reações químicas de decaimento de cloro residual livre. A calibração das reações químicas foi iniciada inserindo a concentração de cloro no poço - RNF (nó 9) medida de $5,1 \text{ mg L}^{-1}$ e o coeficiente de decaimento do cloro no seio do líquido (K_b) de $-0,191$. Para que o modelo computacional reproduzisse os valores de CRL nos 10, 15 e 28, o valor encontrado para o coeficiente de decaimento do cloro na parede da tubulação (K_w) foi de $0,40 \text{ m dia}^{-1}$. De acordo com Salgado (2008) os valores de K_w no Brasil variam entre $0,0001 \text{ m dia}^{-1}$ e $0,50 \text{ m dia}^{-1}$. Dessa forma, observa-se que o valor encontrado é próximo aos valores superiores observados por Salgado (2008) sugerindo um desgaste elevado das tubulações.

As concentrações de CRL mensuradas nos nós 10, 15 e 28 foram respectivamente $1,33 \text{ mg L}^{-1}$, $2,77 \text{ mg L}^{-1}$ e $2,10 \text{ mg L}^{-1}$. Após a calibração, o modelo computacional apresentou CRL nos pontos com até 10% de diferença em relação aos dados coletados *in loco*. A Figura 8 apresenta o gráfico de concentração de CRL no período de 20 horas dos nós 10, 15 e 28.

15

Figura 08 - Concentração de CRL nos nós 10, 15 e 28 e limites do padrão de potabilidade.



Fonte: O autor (2021).

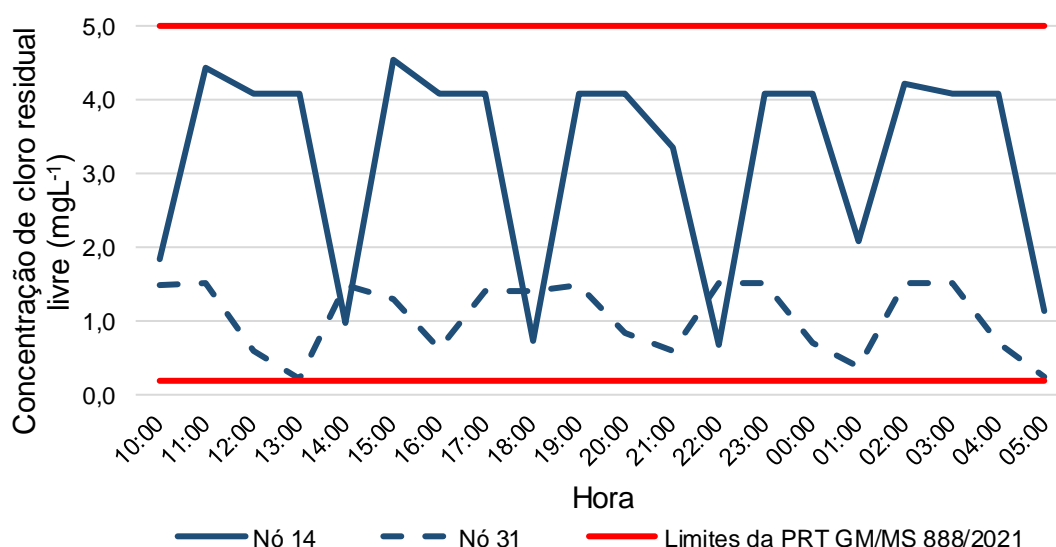
3.1 Análise de pontos extremos

Após a calibração do modelo, foi possível analisar o modelo global da rede e partir dele constatou-se que concentrações críticas de cloro são encontradas nos nós 14 e 31. Os resultados de cloro residual livre na rede de distribuição foram comparados com o padrão de potabilidade da PRT GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021) para avaliação da regularidade sanitárias da rede em relação à concentração de cloro para manutenção da qualidade da água.

O nó 14 refere-se ao ponto inicial da rede de distribuição, onde inicia-se a distribuição em marcha, sendo, portanto, o ponto mais próximo da elevatória. Neste nó foram observadas concentrações de cloro de $4,56 \text{ mg L}^{-1}$, próximo ao limite máximo estabelecido no padrão de potabilidade vigente, de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$. A Figura 09 apresenta a variação da concentração de CRL nos nós críticos da rede de distribuição.

Figura 09 - Concentração de CRL no nó 14 e 31 e limites do padrão de potabilidade.

16



Fonte: O autor (2021).

O nó 31, sendo o ponto mais distante do sistema de produção apresentou concentrações mínimas de CRL a partir da terceira hora de simulação, atingindo o valor mínimo de $0,23 \text{ mg L}^{-1}$ e máximo de $1,51 \text{ mg L}^{-1}$. Com a aplicação da margem de erro de até 10% admitida no modelo, é possível dizer que a concentração de Cloro se manteve igual ou superior ao limite mínimo estabelecido no padrão de potabilidade

vigente de 0,20 mg L⁻¹.

A concentração de cloro na rede de distribuição atende aos padrão de potabilidade PRT GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021). No entanto, o elevado decaimento de cloro na rede provoca a necessidade da superdosagem no sistema produtor, o que pode acarretar a produção de gosto e odor na água distribuída.

Além disso, em períodos de consumo reduzido, o aumento do tempo de permanência da água nas redes e no reservatório podem contribuir para a redução do CRL, tornando a concentração residual fora dos padrões exigidos. Recomenda-se a limpeza da rede ou a substituição da rede para reduzir o decaimento de cloro na rede.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos conclui-se que o modelo computacional do sistema de distribuição de água do Patrimônio Selva foi capaz de reproduzir as variáveis hidráulicas medidas *in loco* e as concentrações de CRL com erros de até 10%, sendo considerado robusto para realizar previsões sobre o sistema de distribuição de água.

A dosagem de cloro no poço tubular profundo – RNF (nó 9) de 5,1 mg L⁻¹ é elevada, o que pode ser justificado pelo valor do coeficiente de decaimento do cloro na parede da tubulação (Kw) de 0,40 m dia⁻¹. Este coeficiente sugere desgaste acentuado das tubulações, aumentando o decaimento do CRL na rede de distribuição.

A modelagem da rede de distribuição permitiu a identificação dos nós da rede com concentração crítica de CRL (mínimas e máximas), sendo mínima de 0,23 mg L⁻¹ no nó 31 e a máxima de 4,56 mg L⁻¹ no nó 14, atendendo, portanto, ao padrão de potabilidade estabelecido pela PRT GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021). Apesar do atendimento ao padrão, períodos de consumo reduzido podem contribuir para a elevação do tempo de permanência da água na rede e redução da concentração de CRL a níveis inferiores ao estabelecido na portaria.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.218:** Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.
- APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water e Wastewater**, 23^a ed. Washington. D. C., 2018.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020b. 183 p.
- BRASIL. **Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. Diário oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília/DF, 16 de julho de 2020, edição 135, seção 1, p. 1.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 - DOU**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Diário oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília/DF, 03 out. 2021, Anexo XX, p. 377-399.
- GOMES, Heber. **Abastecimento de água**. João Pessoa, LENHS UFPB, 2019.
- HOFFMANN, Nora Katia Saavedra dal Aguila; REAL, Carolina Alexandre Leite Villa;
- OLIVEIRA, Luciano de; BRAGA, Talita Cintra. Decaimento do cloro no sistema de abastecimento de água. *In: XIV SIBESA – Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 18 a 20 de junho de 2018. Foz do Iguaçu-PR.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. General Assembly report: A/70/L.1. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: United Nations, 18 set. 2015. 35 p.
- SALGADO, Sérgio. **Estudo dos parâmetros de decaimento do cloro residual em sistema de distribuição de água tratada considerando vazamento**. São Carlos, 2008.
- SILVA, George Antonio Belmiro da; MEIRA, Celeide Maria Belmont Sabino; SANTANA, Cícero Fellipe Diniz de; COURA, Mônica de Amorim; OLIVEIRA, Rui de; NASCIMENTO, Ruth Silveira do; SANTOS, Whelton Brito. Simulação do decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água. **Revista DAE**, n. 218, vol. 67, p. 92 a 103. Julho a setembro de 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.036>.
- SUSE, Roberto; YOSHIKAWA, Andréa Manami; LUZIVOTTO JUNIOR, Edevar.

Simulação da qualidade de água em redes de distribuição empregando o EPANET-MSX. **Revista DAE**, n. 197, p. 32 a 41. setembro-dezembro de 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.126>.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. 4. ed. São Paulo: DHS USP, 2006.