

26º Encontro Técnico AESABESP

MODELAGEM DO DECAIMENTO DO CLORO RESIDUAL LIVRE EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA TRATADA - IMPORTÂNCIA PARA O REGIME DE INTERMITÊNCIA

Monica Cristina Cabrini Medeiros⁽¹⁾

Engenheira Química pelo Centro Universitário Padre Anchieta e Tecnóloga em Saneamento Ambiental pela Unicamp. Tecnóloga Júnior na empresa Sanear Engenharia e Construção Ltda.

Werner Siegfried Hanisch

Engenheiro Químico, professor da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), campus Diadema na área de Engenharia Química. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Experiência na medição de medição e transmissão de dados por telemetria.

Vanessa Bastos da Silveira

Bióloga pela Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Bióloga Júnior da empresa Monitora Tecnologia e Informação Ltda., com pós-graduação em Gestão de Projetos pela Fundação Vanzolini.

Endereço⁽¹⁾: Rua Edward Joseph, 122- Cj.74 – São Paulo – SP - CEP: 05709-020 - Brasil - Tel: +55 (11) 2337-6876 - e-mail: mmedeiros@sanarengenharia.com.br

RESUMO

O presente trabalho foi elaborado a partir de um levantamento bibliográfico sobre o decaimento do cloro residual livre em sistemas de abastecimento de água. Buscou-se discutir diversos aspectos a respeito da qualidade da água, do sistema de abastecimento em regime de intermitência, da atuação do cloro como agente desinfetante, do decaimento das concentrações de cloro residual livre ao longo do sistema de distribuição e da utilização de modelos matemáticos para diagnosticar e prognosticar cenários de qualidade, enfatizando a importância destes estudos para a qualidade, atendimento aos padrões de potabilidade e tomada de decisões. Tais estudos são importantes não apenas em regime de abastecimento contínuo, como também em sistemas que operam em regime de intermitência. Concluiu-se que muitos estudos foram realizados a respeito do decaimento de cloro residual livre utilizando-se diferentes modelos matemáticos. Muitos trabalhos acerca de estudos dos efeitos da intermitência sobre a qualidade da água foram realizados em países com escassez de recursos, mas não há publicações nacionais a respeito desta temática. Recomenda-se que a avaliação do decaimento de cloro seja realizada também em sistemas que operam em regime de intermitência para garantir não só o abastecimento de água à população, mas também assegurar a qualidade do recurso fornecido.

PALAVRAS-CHAVE: Decaimento de cloro, Modelagem matemática, Regime de intermitência.

INTRODUÇÃO

A instalação de comunidades nas proximidades de fontes de abastecimento de água evidencia que esta é uma condição de sobrevivência à população, desde épocas mais remotas até os dias de hoje. O atendimento por sistemas de abastecimento de água em quantidade e qualidade adequadas é uma das principais prioridades das populações, dada a importância ao atendimento das necessidades relacionadas à saúde e ao desenvolvimento industrial (SOBRINHO; MARTINS, 2006).

Diante da atual crise nos sistemas de abastecimento de água, um dos grandes desafios para as companhias de saneamento é a disponibilização de água à população, dentro dos padrões de qualidade, de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011). Para atendimento adequado à legislação, as águas destinadas ao consumo humano devem passar por processo de tratamento e, posteriormente, por um processo de remoção ou inativação dos microrganismos patogênicos que possam estar presentes na água, antes de distribuí-la à população (PEREIRA, 2009).

A desinfecção da água com o emprego do cloro é o processo de tratamento convencional mais utilizado pelas concessionárias de abastecimento de água. A fim de garantir a qualidade e proteção contra a presença de microrganismos no sistema de distribuição, deve-se considerar a presença de um residual com potencial desinfetante, capaz de alcançar os pontos mais longínquos da rede. Esse residual tem a função de agir caso algum microrganismo seja introduzido acidentalmente no sistema, quer seja por rupturas, desprendimento de biofilme formado nas paredes da tubulação, quer seja por aqueles que não foram eliminados na desinfecção (SALGADO, 2008).

Como a concentração de cloro residual decai devido a algumas reações com substâncias orgânicas e inorgânicas ao longo do sistema de distribuição ou mesmo durante o período de armazenamento em reservatórios, ocorre um diferencial entre as condições da água tratada e da água entregue aos consumidores. Dessa forma, com uma avaliação do comportamento cinético do processo de decaimento do cloro é possível prever indiretamente a potencialidade de uma água natural formar subprodutos de desinfecção (FERREIRA; SAKAGUTI, 2008).

A elaboração de modelos matemáticos que englobam processos químicos, físicos e biológicos de forma simplificada pode auxiliar na simulação de condições futuras e possibilitar a elaboração de alternativas para adequação aos parâmetros de potabilidade (OPPA, 2007).

Modelos matemáticos para simulação de qualidade da água têm sido aplicados em estudos de caso apresentados em literatura com sucesso. Esses estudos utilizam a comparação de dados medidos em campo com resultados teóricos, obtidos matematicamente (FERNANDES, 2004).

OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo contextualizar a questão da qualidade da água associada à operação de sistemas de abastecimento em regime de intermitência, levantar publicações sobre estudos de decaimento de cloro residual livre em sistemas de abastecimento de água, verificar a existência de estudos realizados em períodos de abastecimento contínuo e após período de interrupção de fornecimento e demonstrar a importância da realização de estudos de decaimento de cloro residual livre para a adequação do sistema de abastecimento em relação aos parâmetros de potabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho constituiu-se de uma revisão da literatura, no qual foi realizado um levantamento bibliográfico atualizado em fontes especializadas no assunto, as quais são apresentadas no decorrer desta pesquisa.

FUNDAMENTAÇÃO

Regime de Intermitência

Enquanto a água canalizada é considerada uma fonte segura de fornecimento de água à população, estudos recentes sugerem que muitos sistemas podem não garantir que seu fornecimento seja seguro e confiável. Deficiências nos sistemas de distribuição de água canalizada têm sido associadas à contaminação da água em torneiras de consumidores e surtos de doenças transmitidas pela água. Uma deficiência comum é a prática de fornecimento de água intermitente (rodízios). Cerca de um terço do abastecimento de água canalizada na África e na América Latina e mais da metade na Ásia é feito por meio de fornecimento intermitente (KUMPEL; NELSON, 2013).

Regime de intermitência pode ser definido como serviço de abastecimento que fornece água para os consumidores menos de 24 horas em um dia. É um serviço que, embora pouco encontrado em países desenvolvidos, é muito comum em países em desenvolvimento (MCINTOSH, 2003).

O serviço de fornecimento de água descontínuo pode ser abordado a partir de vários níveis. Em países com pouco acesso à água (como países da África ou no Oriente Médio) é inevitável a utilização desse tipo de regime, pois é necessária sua implantação a fim de minimizar prontamente as consequências da falta de água para os usuários. Em outros países, como nos da América Latina ou da Ásia, onde há abundância de recursos hídricos, os usuários não possuem o recurso na quantidade mínima ou a qualidade necessária e assim o problema incide mais sobre a gestão em longo prazo dos sistemas de abastecimento (MCINTOSH, 2003).

O fornecimento intermitente de água está ligado a problemas de quantidade e qualidade da água. A consequência mais crítica do regime de intermitência é o risco de contaminação da água devido à entrada de contaminantes e consequentes perigos à saúde pública. Outras consequências incluem distribuição desigual de água, inconvenientes aos consumidores e adição de custos ao abastecimento de água devido à necessidade de instalações adicionais, como tanques de estocagem e bombas (MATSHINE; JUIZO; KENNETH, 2014).

Quando as tubulações estão submetidas à baixa pressão ou quando estão vazias, contaminantes provenientes de fora da rede podem entrar na tubulação por refluxo ou intrusão. Além disso, o fornecimento de água de maneira intermitente requer armazenamento domiciliar, uma prática que pode estar associada à recontaminação (KUMPEL; NELSON, 2013; RENWICK, 2013).

Longos períodos de residência podem também resultar na queda do residual de desinfetante. A manutenção de cloro residual na água é necessária para tentar evitar a recontaminação que vem com a percolação de substâncias estranhas fora do horário de abastecimento. Como a concentração de cloro decai ao longo do tempo, o aumento da retenção, do tempo de armazenamento ou períodos prolongados de interrupção do fornecimento aumentam o risco de ocorrência de microrganismos nos pontos de consumo de água. O abastecimento intermitente pode promover o crescimento de microrganismos na tubulação durante o período de estagnação e posterior destacamento deste biofilme quando o fornecimento é restabelecido (MATSHINE; JUIZO; KENNETH, 2014).

Decaimento do Cloro

Ao longo do sistema de distribuição de água o teor de cloro residual não se mantém constante. A concentração desta espécie química diminui ao longo do seu percurso devido não só a reações existentes na própria água, mas também a outras que ocorrem nas paredes das tubulações. Este tipo de reação pode ocorrer tanto em tubulações novas como em tubulações com mais tempo de operação, que podem apresentar biofilme e material resultante de corrosão, no caso de dutos metálicos (LOPES, 2005).

O decaimento de cloro em sistemas de distribuição e abastecimento de água é composto de duas componentes, segundo Clark e colaboradores (1993). Uma componente é a demanda da parede, e a outra é demanda do corpo do escoamento associado ao canal da fase aquosa. Estes são os mecanismos que mais atuam no decaimento do cloro em uma rede de distribuição, e são influenciados pelas constantes cinéticas k_b que caracteriza o decaimento no corpo do escoamento e k_w , que caracteriza o decaimento na parede da tubulação.

Os modelos para análise da qualidade da água consideram as tubulações como reatores químicos, conforme ilustrado pela Figura 1.

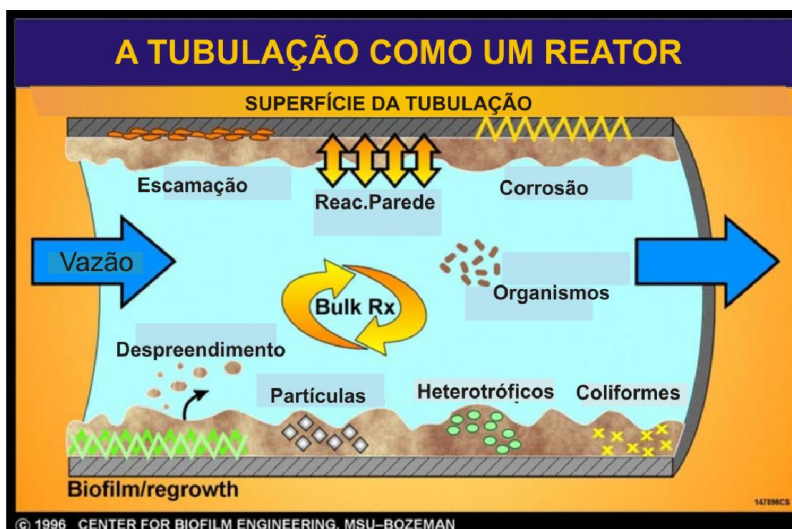


Figura 1 - Reações nas tubulações

Fonte: PIEREZAN, 2009.

Considerando a tubulação como um reator, assume-se que o cloro entra por uma das extremidades, reage com matéria orgânica presente no interior do tubo, com a parede da tubulação, e com o biofilme, e sai pela outra extremidade. Adotando este princípio, o decaimento de cloro deve ser analisado de acordo com as reações que acontecem no corpo do escoamento e as reações que ocorrem na parede da tubulação.

Uma pequena parcela do decaimento do cloro pode ser atribuída às reações de corrosão da tubulação, encontradas, principalmente, em tubulações antigas ou classificadas como tubulações reativas (ferro não revestido). A maioria dos sistemas de abastecimento de água da atualidade opera com tubulação não reativa como, por exemplo, PVC, PEAD ou tubos de ferro revestido (JUNQUEIRA, 2010).

Modelagem da Qualidade da Água

A modelagem da qualidade da água em sistemas de distribuição é uma ferramenta que tem sido usada para prever o transporte e a propagação de substâncias dissolvidas. Estes modelos estão ganhando importância por várias razões, que incluem: o aumento das exigências de controle por meio de legislação governamental; as mudanças nas expectativas dos consumidores, em especial no que diz respeito à qualidade da água; o registro crescente do número de incidentes envolvendo questões de qualidade da água e a divulgação e popularização para o uso de técnicas de monitoramento e gerenciamento para fins de qualidade da água (FERNANDES, 2004).

A simulação da qualidade das águas em redes de distribuição utilizando modelos de previsão da evolução do cloro residual constitui num eficiente meio de controle da qualidade da água distribuída (DANIELI; GASTALDINI; BARROSO, 2006).

Modelagem de Decaimento do Cloro

O decaimento do cloro nas redes de distribuição tem sido objeto de muitos estudos que conduziram a vários modelos propostos para descrever a sua cinética.

Com relação às reações que ocorrem no corpo do escoamento, o decaimento pode ser modelado utilizando cinética de primeira ordem, na qual a concentração de cloro decai exponencialmente com o tempo, conforme expressa a equação (1):

$$C_t = C_0 e^{-k.t} \quad \text{Equação (1)}$$

Nesta equação, C_t é a concentração de cloro no tempo t , C_0 é a concentração inicial, t é o tempo (horas), e k é a constante específica da velocidade para a cinética de primeira ordem (hora^{-1}).

A constante k é altamente dependente da qualidade da água e do grau de tratamento recebido. Este modelo é de simples aplicação e se ajusta bem aos dados observados, porém falha em reproduzir as taxas de decaimento

mais altas observadas nas primeiras horas na maior parte dos testes de decaimento de cloro, conforme observado por Clark e colaboradores (1993).

Para solucionar esse problema, outros modelos foram investigados para descrever o decaimento do cloro: modelo de ordem n , de primeira ordem limitada e de primeira ordem paralela.

Para a determinação do coeficiente de decaimento do cloro no meio aquoso, um teste em laboratório pode ser realizado, uma vez que o decaimento em meio aquoso depende somente das características físico-químicas da água. Conforme indica Coelho; Loureiro e Alegre (2006), a utilização de uma metodologia denominada “*bottle test*” ou “teste das garrafas”, permite que o decaimento do cloro associado ao meio aquoso seja analisado separadamente de outros processos que afetam a qualidade da água, sendo analisado simplesmente em função do tempo.

Conforme esta metodologia, amostras de água devem ser coletadas na entrada do sistema e utilizadas para preencher garrafas que permanecerão hermeticamente fechadas durante todo o período de testes. Estas garrafas devem ser mantidas à mesma temperatura encontrada no sistema de distribuição, de onde foram coletadas. Medidas da concentração de cloro residual livre são realizadas em intervalos de tempo pré-estabelecidos. A duração do experimento deve considerar o tempo de residência da água na rede de abastecimento e a frequência de amostragem é usualmente maior no início do experimento (15 minutos para reações rápidas e uma vez a cada duas horas para uma reação mais lenta) sendo gradualmente diminuída (uma vez ao dia). Com os resultados destas medições é possível tabular os valores e plotá-los em função do tempo transcorrido, chegando-se assim a taxa de decaimento do cloro para a água (TRIMBOLI, 2006).

A modelagem do decaimento do cloro nas paredes da tubulação é mais complexa, uma vez que essa reage com os materiais que se encontrem junto ou na parede da tubulação. Assim, a área de superfície da tubulação e a taxa de transferência de massa entre o corpo do escoamento do fluido e a parede influenciam na velocidade de reação.

DISCUSSÃO

Estudos acerca da cinética de decaimento do cloro em sistemas de abastecimento não são recentes. De acordo com Vieira e colaboradores (2004), vários estudos realizados durante as últimas décadas, por autores de muitos países, a respeito do decaimento do cloro em água potável, têm proposto vários modelos para descrever a cinética do decaimento do cloro. Visto que o conhecimento sobre a cinética das reações do cloro em sistemas de distribuição é limitado, os modelos trabalham com equações que englobam todas as reações nas quais o cloro pode participar cada qual caracterizada por cinéticas e mecanismos individuais. Devido a esta complexidade e ao fato de que a composição exata dos reagentes permanece desconhecida, os modelos desenvolvidos têm adotado uma abordagem “caixa preta”, ou seja, reações únicas que levam ao decaimento do cloro não são consideradas separadamente, mas como um todo, com uma velocidade global e uma lei de cinética global representando o decaimento do cloro (VIEIRA *et al.*, 2004).

Uma variedade de modelos computacionais tem sido desenvolvida e usada pela indústria da água para avaliar o movimento e o destino de contaminantes nos sistemas de distribuição. Cada modelo inclui: modelos dinâmicos e estacionários que simulam a vazão, direção do fluxo e pressão no sistema; modelos dinâmicos que simulam o movimento e transporte de substâncias na água conforme variações de tempo. Cada tipo de modelo atende a uma proposta particular para avaliação da qualidade da água no sistema de distribuição e podem ser considerados como ferramentas úteis para os engenheiros e planejadores que desejam investigar a qualidade da água.

Um estudo realizado por Clark e colaboradores (1993) constatou a grande variação da concentração de cloro com o tempo, invalidando a caracterização da qualidade da água pela simples verificação de parâmetros em um determinado ponto da rede. Os autores chamam a atenção para a importância da postura dos administradores dos serviços com o problema, ressaltando também a influência marcante do reservatório de distribuição na questão da qualidade da água, bem como o conflito natural entre a necessidade de reserva de água para garantir o abastecimento e o prejuízo que isso implica na da qualidade da água.

Observou-se que os residuais de cloro variam no tempo, no espaço, assim como na mudança dos cenários de operação (como bombeamento direto e/ou uso de reservatórios de estocagem). Os resultados do estudo, os quais podem ser observados nas Figuras 2, sugerem que o decaimento do cloro ocorre devido aos longos tempos de permanência no reservatório, destacando a importância da adequada operação dos reservatórios bem como o conhecimento do decaimento que ocorre na rede, o qual exerce uma menor influência (CLARK *et al.*, 1993).

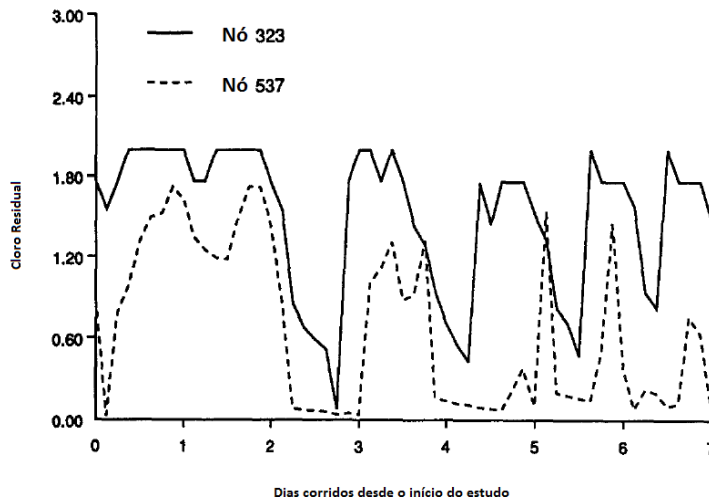


Figura 2 - Cloro residual simulado em vários nós, com 2,7m de variação do nível do tanque, ao longo do tempo.

Fonte: CLARK *et al.*, 1993.

Trimboli (2006) estudou e avaliou as etapas que visam à aplicação de modelagem matemática para obtenção de parâmetros de qualidade, como a concentração de cloro livre residual em sistemas de abastecimento de água, em Jundiá-SP.

Para expressar o comportamento das reações foi utilizado o modelo de primeira ordem, resultando num $k_b = 0,0001 \text{ min}^{-1}$, conforme ilustrado na Figura 3.

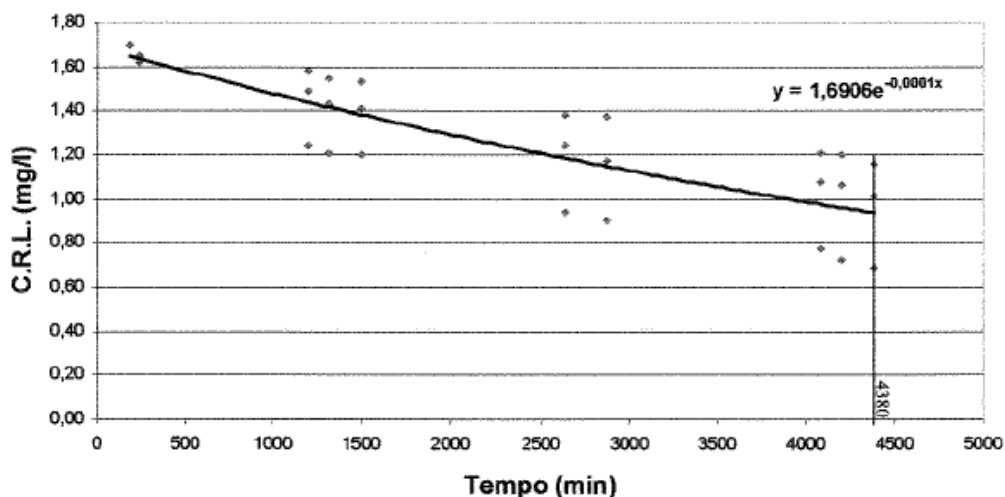


Figura 0 - Determinação da taxa de consumo de cloro k_b , através da curva de tendências dos resultados das análises de garrafa.

Fonte: TRIMBOLI, 2006.

No estudo realizado por Danieli, Gastaldini e Barroso (2006) foi abordada a modelagem do cloro residual em redes de distribuição, numa aplicação ao sistema de abastecimento de Santa Maria-RS, utilizado o software EPANET para modelagem.

De acordo com os valores simulados e encontrados pelos autores, pôde-se notar que o modelo obtido foi eficiente para prever o decaimento de cloro. Um exemplo dos resultados encontrados é apresentado na Figura 4.

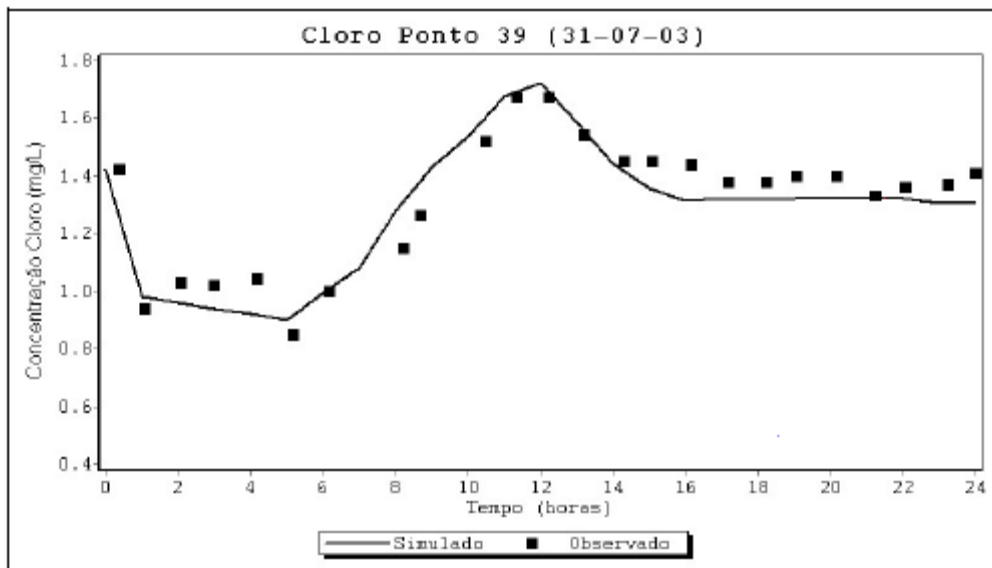


Figura 4 - Concentrações de cloro simuladas e encontradas para o ponto 39.

Fonte: DANIELI; GASTALDINI; BARROSO, 2006.

Moraes (2008) estudou a calibração de modelo de decaimento de cloro aplicado a um setor de rede de distribuição de água real, em São Carlos-SP, enfocando um dos principais aspectos do gerenciamento da qualidade da água para abastecimento: a manutenção do residual de cloro no interior da rede para atendimento da legislação vigente, trabalhando com modelagem e simulação do comportamento do decaimento desta substância. No estudo desenvolvido foi realizada a calibração hidráulica considerando situações de vazamento.

Ferreira e Sakaguti (2008) estudaram o comportamento cinético do cloro livre em meio aquoso para fins de previsão da formação de subprodutos da desinfecção. Esse estudo foi desenvolvido empregando três diferentes águas brutas provenientes de mananciais localizados na Região Metropolitana de São Paulo-SP.

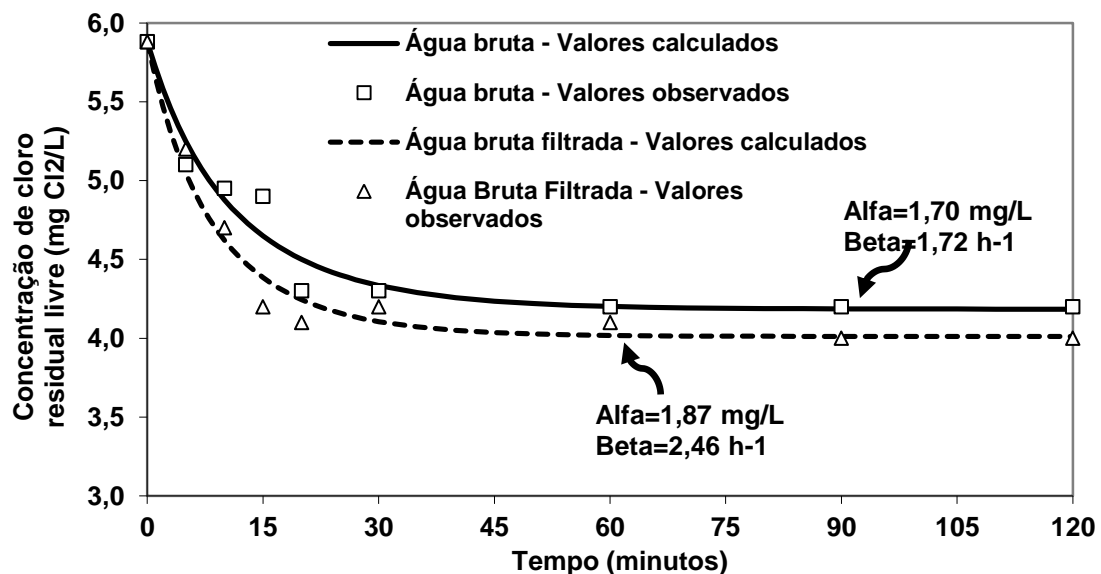


Figura 5 - Concentração de cloro residual livre em função do tempo para água 1.

Fonte: FERREIRA; SAKAGUTI, 2008.

Com os resultados desse estudo foi possível verificar que o uso de modelagem matemática apresentou-se bastante adequado para descrever o comportamento do cloro livre e seu decaimento para diferentes tipos de águas submetidas a diferentes condições de cloração, podendo ser utilizada para previsão de comportamentos em processos de oxidação química e desinfecção. Foi possível avaliar as diferenças nos valores de demanda de cloro para diferentes tipos de águas, o impacto do processo de pré-cloração precedido da etapa de coagulação e a relação da formação de THM com os valores de demanda de cloro. Os procedimentos adotados nesse estudo foram recomendados para fins de gerenciamento das dosagens de cloro aplicadas em processos de tratamento de água, objetivando a minimização da formação de subprodutos da desinfecção (FERREIRA; SAKAGUTI, 2008).

O trabalho de Pierezan (2009) consistiu no estudo experimental e numérico para a determinação de parâmetros cinéticos para analisar o comportamento do cloro em sistemas de distribuição de água para abastecimento. Através de dados experimentais o autor estimou os parâmetros cinéticos utilizando modelos inversos e avaliou o efeito de fatores, como tempo de residência e material de tubulações, sobre a demanda de cloro. Utilizando o "teste de garrafa", cujo esquema pode ser visualizado na Figura 6, para determinação de k_b , constatou que o decaimento é mais influenciado pelas reações que ocorrem na parede das tubulações do que pelas reações que ocorrem no corpo do escoamento.

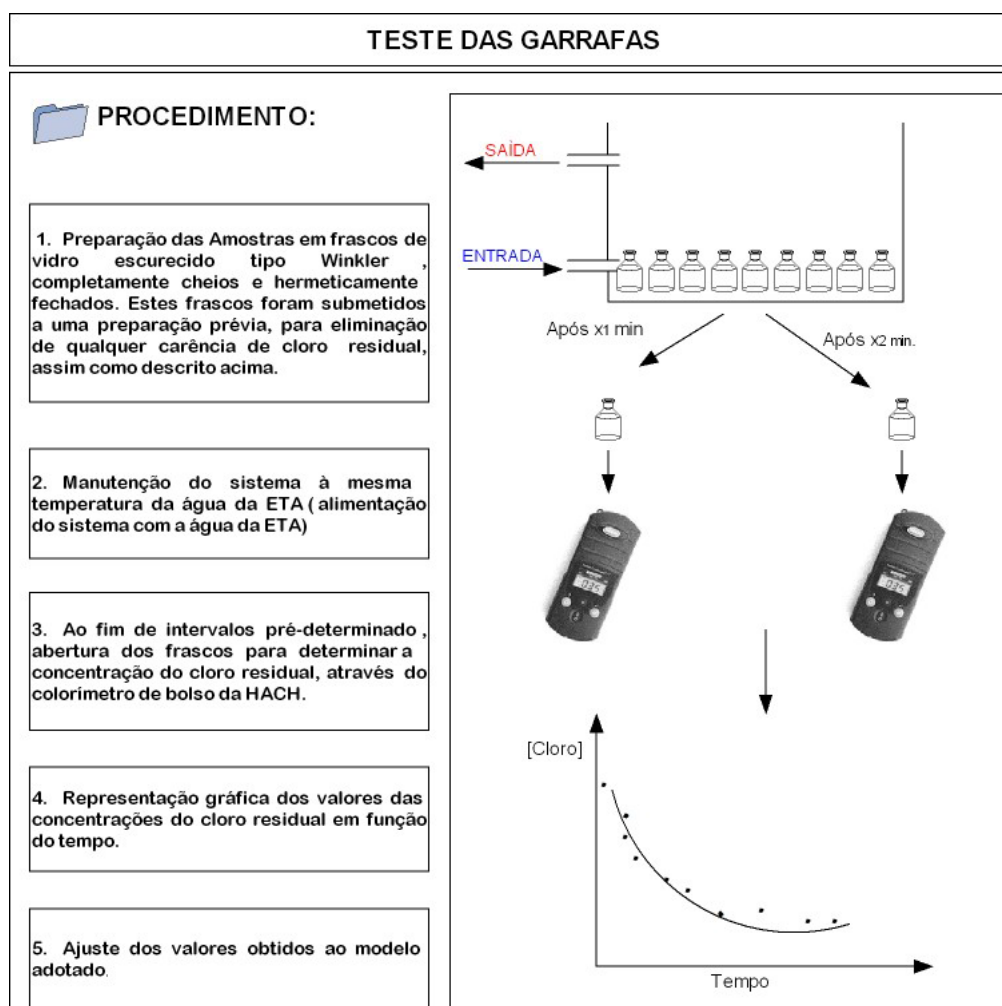


Figura 6 - Esquema de "teste de garrafa" utilizado.

Fonte: PIEREZAN, 2009.

Foi possível concluir que a utilização de medidas de campo associadas com a modelagem computacional se mostrou um método eficaz para a representação fiel do comportamento do cloro em sistemas de distribuição e abastecimento de água, como ilustrado na Figura 7, tornando-se uma ferramenta muito útil para a identificação

de estratégias de otimização da dosagem de cloro, redução custos e auxílio na identificação de problemas como contaminações ou falhas no sistema de distribuição.

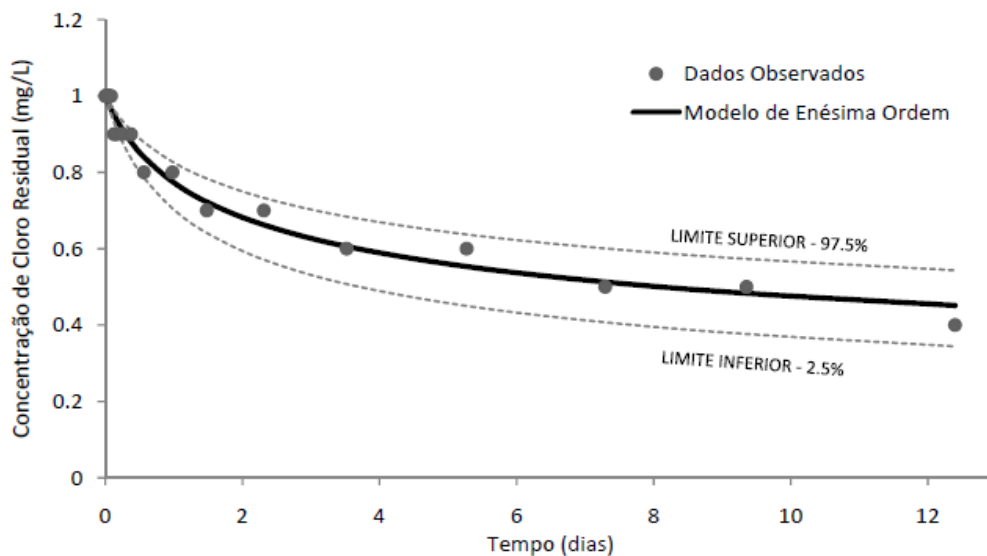


Figura 7 - Valores estimados x observados, com intervalo de confiança.

Fonte: PIEREZAN, 2009.

Um estudo para o monitoramento do decaimento de cloro residual e contaminação por coliformes na rede de distribuição de Kampala, em Uganda, foi realizado por Ecuru, Okot-Okumu e Okurut (2011). Os autores utilizaram modelo de decaimento de primeira ordem para processar os resultados obtidos em “teste de garrafa”.

Os resultados obtidos mostram que as concentrações de cloro residual nos reservatórios aumentaram gradualmente nas primeiras horas da manhã, e no período da tarde tiveram sua concentração gradualmente reduzida, como mostra a Figura 3.15, sendo que esta redução foi atribuída ao processo de enchimento e esvaziamento dos reservatórios.

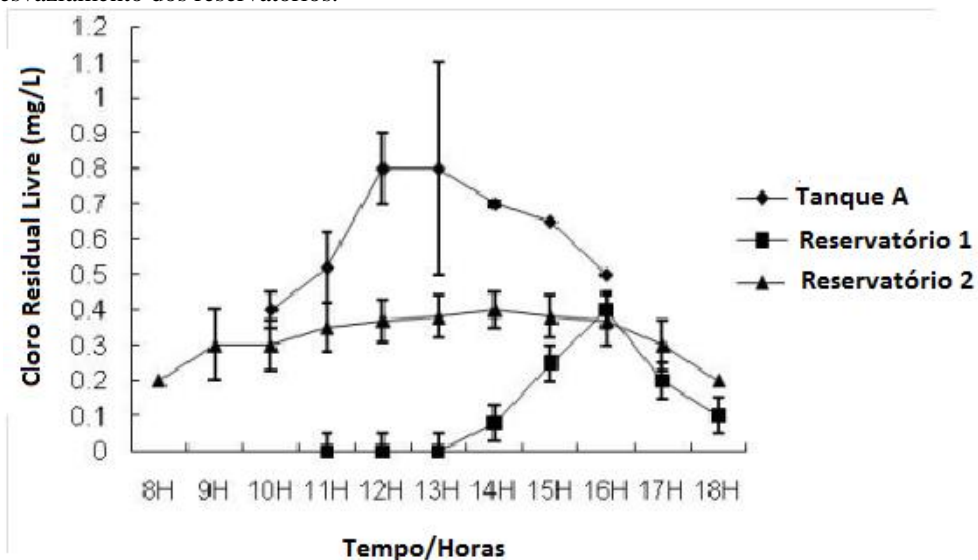


Figura 8 - Variação horária de cloro residual livre em 3 tanques/reservatórios de água, em Kampala .

Fonte: ECURU; OKOT-OKUMU; OKURUT, 2011.

Foi relatado também que, em alguns reservatórios avaliados, em muitas ocasiões as concentrações de cloro residual ficaram abaixo daquelas recomendadas pela Organização Mundial de Saúde, conforme pode ser observado na Figura 9. Tal fato foi atribuído ao regime de intermitência adotado no sistema de abastecimento,

longos períodos de armazenamento e reservatórios com idade avançada. Em outros casos, foi relatado decaimento da qualidade da água a ponto de ser observada recontaminação.

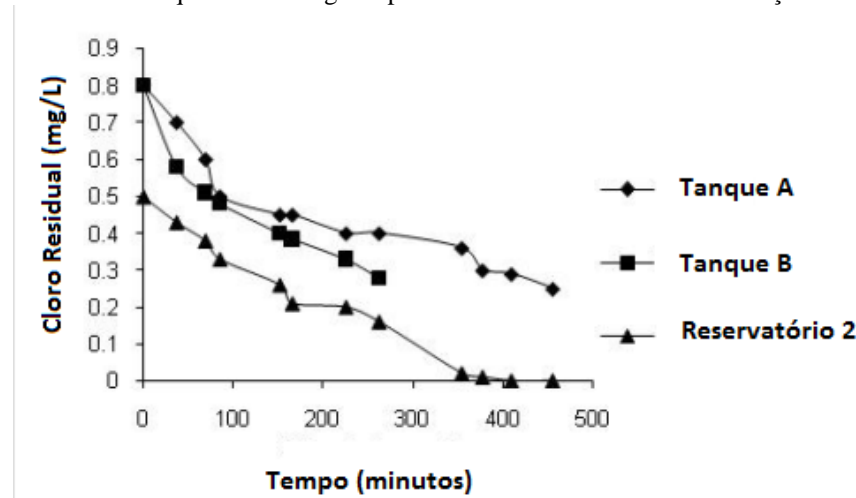


Figura 9 - Decaimento de cloro residual ao longo do tempo, em 3 tanques reservatórios de água, em Kampala.

Fonte: ECURU; OKOT-OKUMU; OKURUT, 2011.

O coeficiente de decaimento de cloro determinado para o sistema de distribuição de água de Kampala k_b estava entre 0,002 e 0,003 min^{-1} , indicando alta taxa de perda de cloro com outros sistemas de abastecimento encontrados na literatura, como os relatados anteriormente. O estudo concluiu que o risco de recontaminação da água e perda da qualidade era muito grande neste sistema. Ações para evitar o fornecimento intermitente e, conseqüentemente, minimizar o período de residência da água nos reservatórios, foram recomendadas para atendimento à legislação (ECURU; OKOT-OKUMU; OKURUT; 2011).

Kumpel e Nelson (2013) realizaram um estudo comparativo entre a qualidade microbiológica da água em um sistema de abastecimento de água intermitente e um sistema de abastecimento contínuo em Hubli, Índia. Foi confirmado que um sistema de abastecimento de água contínuo (24 horas por dia, 7 dias por semana, representado por 24x7) forneceu água com menor contaminação microbiológica, nesse estudo representada por bactérias, do que o sistema de abastecimento intermitente (IWS – intermittent water supply). Amostras de água foram testadas para coliformes totais, *Escherichia coli*, turbidez, cloro residual livre e combinado, em ambos os sistemas. A presença de bactérias foi detectada mais frequentemente e em maiores concentrações nas amostras oriundas do sistema de abastecimento intermitente, conforme mostra a Figura 10.

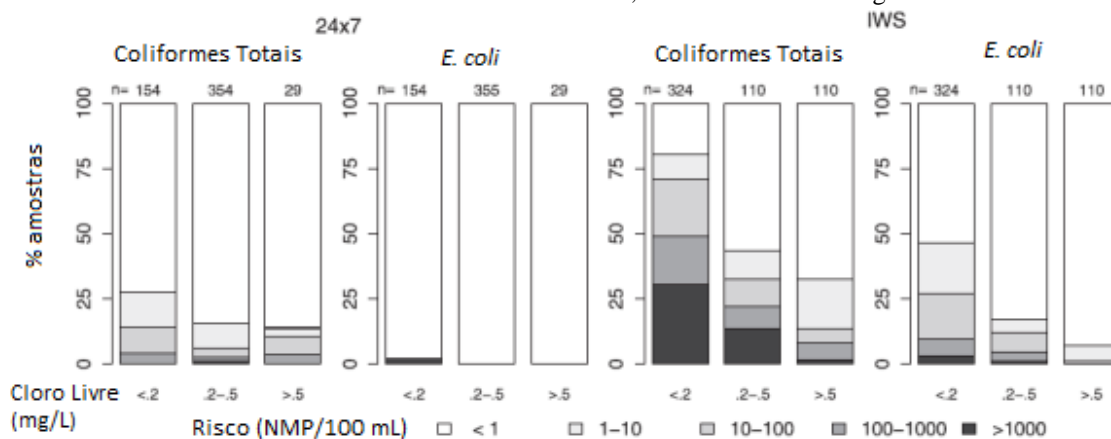


Figura 10 - Percentual de amostras com contaminação por coliformes totais, agrupadas por concentração de cloro residual livre.

Fonte: KUMPEL; NELSON, 2013.

Conforme apresentado anteriormente, a presença de contaminação microbiológica na água de abastecimento é um indicativo de que a cloração, como processo de desinfecção, apresenta-se ineficiente seja pela aplicação de quantidade insuficiente do agente desinfetante, seja pelo decaimento da concentração ao longo da rede de distribuição ou mesmo pela presença de grandes períodos de residência. O estudo de Kumpel e Nelson (2013) comprova que a qualidade da água é seriamente prejudicada em regime de abastecimento intermitente.

Matshine, Juizo e Kenneth (2014) avaliaram o efeito da intermitência e armazenamento doméstico na qualidade da água de abastecimento distribuída em Maputo, cidade de Moçambique. O abastecimento era realizado 24 horas por dia, porém a distribuição era intermitente devido às baixas pressões no sistema e à necessidade de minimizar perdas. Para esse estudo foram avaliados vários parâmetros de qualidade, inclusive cloro residual.

A taxa de decaimento de cloro obtida para a água tratada foi muito maior do que aquela observada nos reservatórios da rede e domésticos. Os autores sugeriram que tal fato tenha ocorrido devido à influência de vários fatores externos, como aumento de biomassa na rede e presença de material particulado, elevando a turbidez. A combinação dos efeitos da intermitência na distribuição e armazenagem doméstica aumentam os tempos de retenção e colaboram para o decaimento das concentrações de cloro e ocorrência de contaminação microbiológica. O resultado desse estudo mostrou que a água tratada de Maputo não é segura para consumo humano e a contaminação devido ao ingresso de contaminantes durante os períodos sem água ou de baixa pressão se mostraram fatores críticos na deterioração da qualidade da água (MATSHINE; JUIZO; KENNETH, 2014).

O conhecimento da concentração de cloro residual em vários locais em um sistema de distribuição de água potável é essencial para a verificação da qualidade da água fornecida aos consumidores. O estudo realizado por Goyal e Patel (2014) apresentou uma metodologia para encontrar a concentração de cloro residual em vários locais da rede, integrando modelos hidráulicos e de qualidade de água, utilizando equação de decaimento de cloro de primeira ordem para sistema de abastecimento de água intermitente. As equações obtidas foram aplicáveis às condições de água da Índia, onde o abastecimento intermitente é o sistema mais comum de abastecimento de água.

Foram analisados dois cenários: o cenário I, com cloração convencional e o cenário II, utilizando *booster* para recloração. Foi observado que no abastecimento de água intermitente, o residual de cloro no nó mais distante é sensível à hora de fornecimento de água e tempo de percurso de cloro, conforme apresentado na Figura 11. A Figura 12 apresenta o segundo cenário estudado.

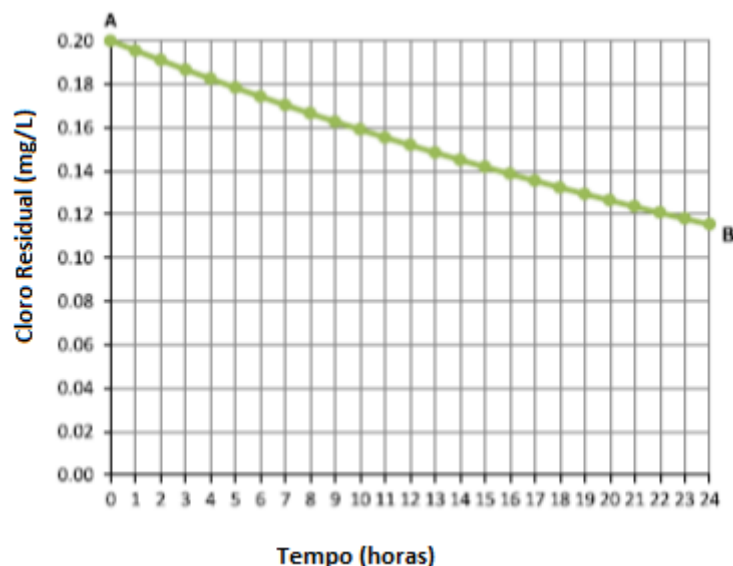


Figura 11 - Residual de cloro obtido no caso I.

Fonte: GOYAL; PATEL, 2014.

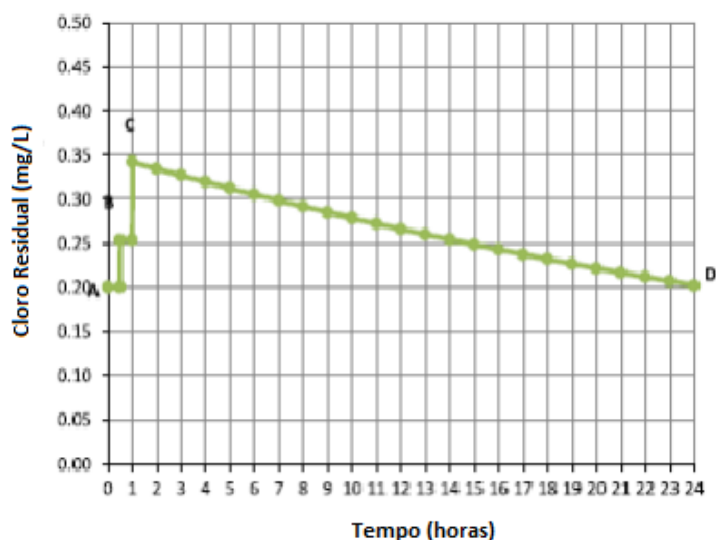


Figura 12 - Residual de cloro obtido no caso II.

Fonte: GOYAL; PATEL, 2014.

Desta forma, o tempo de residência ou percurso do cloro pode ser considerado significativo para justificar a exigência de recloração para o abastecimento de água intermitente, utilizando *boosters* (GOYAL; PATEL, 2014).

Em seu trabalho intitulado “Deficiencies in drink water distribution systems in developing countries”, Lee e Schwab (2005) afirmaram que, historicamente, nos países desenvolvidos, o estabelecimento de um sistema de distribuição para disseminar água potável tem colaborado para a melhoria da saúde pública. No entanto, nos países em desenvolvimento, muitos sistemas de abastecimento estão funcionando de forma intermitente e aquém de sua capacidade. Além disso, muitos outros problemas com os sistemas de distribuição existem e também ocorrem com mais frequência, do que em países desenvolvidos. Portanto, embora a presença de uma rede pública de distribuição de água seja muitas vezes um indicador de melhoria do abastecimento de água em um país em desenvolvimento, não se deve assumir que a qualidade da água resultante seja sempre adequada para o consumo humano.

Segundo os autores, muitos países em desenvolvimento possuem sistemas intermitentes de abastecimento de água. Em sua pesquisa, na América Latina e no Caribe, foi estimado que 60% da população eram servidos por ligações domiciliares com serviço intermitente. Na África e na Ásia, estimou-se que mais de um terço e metade do abastecimento urbano de água, respectivamente, operavam de forma intermitente.

Um fornecimento intermitente influencia o comportamento daqueles que recebem o serviço, o qual poderia agravar os problemas de abastecimento de água, como os riscos para a saúde, a partir da armazenagem de água em reservatórios domésticos. Devido à inconstância no fornecimento este era um procedimento muito praticado na região estudada. Além disso, estes reservatórios eram raramente limpos e/ou utilizados adequadamente. Assim, ficou evidente que a pressão intermitente e fornecimento intermitente puderam ser considerados contribuidores complexos, mas importantes para o fracasso no sistema de distribuição e a diminuição do estado de saúde da população afetada por este regime (LEE; SCHWAB, 2005).

CONCLUSÃO

Diante da atual situação de crise no sistema de abastecimento de água, o fornecimento de água em regime de intermitência se faz necessário numa tentativa de equalizar a distribuição do recurso que se encontra em escassez.

Duas abordagens podem ser consideradas para melhorar os sistemas de abastecimento intermitente: na primeira alternativa sugere-se a redução do período de intermitência, aumentando a oferta e reduzindo a

quantidade de água não faturada pelas companhias de abastecimento e, a segunda abordagem seria que, ao operar um sistema de maneira intermitente deverão ser tomadas medidas para evitar contaminação no sistema de distribuição.

A manutenção de teores de cloro residual livre em níveis adequados para garantir a potabilidade da água é requerida por órgãos nacionais (Ministério da Saúde) e internacionais (Organização Mundial de Saúde). Este estudo relatou que, sendo o cloro uma substância que pode ter sua concentração reduzida ao longo do tempo, as companhias de saneamento devem planejar e executar ações para que a população receba água dentro dos padrões estabelecidos pelos órgãos reguladores. Em muitos estudos apresentados a utilização de modelos matemáticos se mostrou uma ferramenta importante para o alcance deste objetivo,

Um número considerável de publicações nacionais e internacionais pode ser encontrado a respeito da modelagem do decaimento de cloro nas redes de abastecimento, ao longo dos anos, demonstrando que esta é uma prática eficaz para monitoramento da qualidade da água em sistemas de abastecimento contínuo.

Há também um grande número de pesquisadores atuando em sistemas de abastecimento de água intermitentes, com o objetivo de melhorar a qualidade da água servida por estes sistemas, bem como melhorar as condições de operação para o atendimento da população. No entanto, estes trabalhos são publicados por pesquisadores que atuam em regiões onde a escassez de recursos hídricos é conhecida mundialmente, como África e Índia. Não há publicações de âmbito nacional acerca desta temática, apesar do cenário de racionamento de água ser relatado em grande parte do país.

RECOMENDAÇÕES

A longo prazo, devem ser tomadas medidas para reduzir o período de intermitência do sistema de distribuição uma vez que esta redução tem como consequência a melhoria da qualidade da água no sistema, reduzindo episódios de baixa pressão que podem levar à contaminação. A curto prazo, faz-se necessário destinar maior atenção aos sistemas nacionais que operam em regime de intermitência, a fim de garantir o fornecimento de água de qualidade à população, enquanto o recurso não for oferecido continuamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. Portaria nº 2914 de 12/2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Ministério da Saúde, 2011. Disponível em < http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 11 mar. 2015.
2. CLARK, R. et al. Modeling Contaminant Propagation in Drinking -Water Distribution Systems. Journal of Environmental Engineering, v. 119, n. 2, p. 349-364, mar/abr. 1993.
3. COELHO, S. T.; LOUREIRO, D.; ALEGRE, H. Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água. Instituto Regulador de Água e Resíduos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal, 2006.
4. DANIELI, R. D.; GASTALDINI, M. C. C.; BARROSO, L. B. Modelagem do Cloro Residual em Redes de Distribuição – Aplicação ao Sistema de Abastecimento de Santa Maria. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.11, n.4, p. 201-208, 2006.
5. ECURU, J.; OKOT-OKUMU, J.; OKURUT, T. Monitoring Residual Chlorine Decay and Coliform Contamination in Water Distribution Network of Kampala, Uganda. J. Appl. Sci. Environ. Manage. v. 15, n. 1, P. 167-173, 2011.
6. FERNANDES, C. V. S. Modelagem da qualidade da água em redes de distribuição de água: a influência dos transientes hidráulicos. Artigo publicado no IV SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa. 2004.
7. FERREIRA, S. S.; SAKAGUTI, M. Comportamento cinético do cloro livre em meio aquoso e formação de subprodutos da desinfecção. Eng. Sanit. Amb., Rio de Janeiro, v. 13, n.2, p. 198-206, 2008.
8. GOYAL, V.R.; PATEL, H.M. Analysis of residual chlorine in simple drinking water distribution system with intermittent water supply. Appl Water Sci. Disponível em: <

http://download.springer.com/static/pdf/580/art%253A10.1007%252Fs13201-014-0193-7.pdf?auth66=1412188841_324cfece98f44beb8870dfacbc06f9ba&ext=.pdf>. Acesso em 11 de mar. 2014.

9. JUNQUEIRA, R. F. Modelagem matemática de cloro residual em redes de distribuição de água – Estudo de caso no Jardim Higienópolis em Maringá-PR. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Brasil, 2010.
10. KUMPEL, E.; NELSON, K. L. Comparing microbial water quality in an intermittent and continuous piped water supply. *Water Research*, v.47, p. 5176-5188, 2013.
11. LEE, E. J.; SCHWAB, K. J. Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of water health*, n.3, p. 109-127, 2005.
12. LOPES, A. J. P. C. S. Subprodutos da desinfecção da água para consumo humano. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 2005.
13. MATSHINE, N. P; JUIZO, D. L; KENNETH, M. P. The effects of intermittent supply and household storage in the quality of drinking water in Maputo. *Journal of Water Management and Research*, v. 70, p. 51-60, 2014.
14. MCINTOSH, A. C. Chapter 5. Intermittent Water Supply. In: MCINTOSH, A.C.: *Asian Water Supplies. Reaching the Urban Poor*. 2003. Disponível em: <http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/MCINTOSH%202003%20Asian%20Water%20Supply%20Chap%205%20Intermittent%20Supply.pdf>. Acesso em: 24 de mar. 2014.
15. MORAES, F. A. Calibração de modelo de decaimento de cloro aplicado a setor de rede de distribuição de água. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Estadual de São Paulo, Brasil, 2008.
16. OPPA, L. F. Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do rio Vacai Mirim. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil, 2007.
17. PEREIRA, R. F. Calibração do coeficiente de decaimento do cloro (kw) em redes de abastecimento de água utilizando o método iterativo do coeficiente hidráulico alternativo (MIGHA). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Brasil, 2009.
18. PIEREZAN, L. M. Monitoramento contínuo do resíduo do cloro em sistemas de distribuição de água para o abastecimento. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Brasil, 2009.
19. SALGADO, S. R. T. Estudos dos parâmetros do decaimento de cloro residual em sistema de distribuição de água tratada considerando vazamento. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Estadual de São Paulo, Brasil, 2008.
20. SOBRINHO, P. A.; MARTINS, G. Abastecimento de água. In TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de água*. 4ª edição. São Paulo: Depto de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP, 2006.
21. TRIMBOLI, M.J. Aplicação e análise de um modelo de qualidade de água para a determinação da concentração de cloro livre residual em um setor de abastecimento de água. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Campinas, Brasil, 2006.
22. 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*, v. 53, n. 7, p. 453-467, 2004.