

Simulação de alterações numa ETA convencional de porte médio para a produção de água segura

Changes simulation in a conventional ETA midsize to safe water production

Ruth Silveira do Nascimento, Rosires Catão Curi, Wilson Fadlo Curi, Rui de Oliveira, Cícero Fellipe Diniz de Santana e Celeide Maria Belmont Sabino Meira

Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil

ruthsn@gmail.com; rosirescuri@yahoo.com.br; wfcuri@yahoo.com.br; ruideo@gmail.com; cicero.esa@hotmail.com; celeide.sabino@globo.com

Recebido: 02/11/2015- Revisado: 16/12/2015- Aceito: 22/01/2016

RESUMO

Este trabalho envolve a análise de cenários, que prevêem alterações operacionais e estruturais em sistemas de abastecimento de águas - SAA e seu impacto na qualidade da água distribuída. O objetivo deste estudo é avaliar o impacto de alterações estruturais e de gerenciamento propostas para a estação de tratamento de água (ETA) sobre a qualidade da água na rede, com base na simulação do comportamento do cloro residual livre, como também, avaliar a redução dos riscos à saúde dos usuários, através da aplicação do método de análise de risco Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), visando um abastecimento seguro para a população de uma cidade de porte médio. A simulação do comportamento da qualidade da água foi desenvolvida no software EPANET 2.0, com malha construída a partir do traçado da rede do SAA de dois bairros de Campina Grande - PB. No cenário atual (C1) um dos bairros apresentou CRL abaixo do mínimo recomendado, em todos os nós; após as alterações, simuladas no cenário 2 (C2) foi observada uma melhoria de 60% na conformidade da concentração do desinfetante com o padrão mínimo. A avaliação de risco para o C2 demonstrou que as alterações proporcionaram uma redução de cerca de 66% dos riscos em relação ao C1. A simulação indicou que há melhoria na qualidade da água, tendo sido concluído, no entanto, que apenas promover alterações na ETA não é suficiente para garantir concentrações iguais ou superiores a 0,2 mgCl₂/L, em toda a rede.

Palavras Chave: Sistema de abastecimento de água. Qualidade da água. cloro residual livre. Avaliação de risco. EPANET.

ABSTRACT

This work involving the analysis of scenarios based on the proposition of operational and structural changes in water supply systems and their impacts on the quality of water supplied to the population. The aim of this study is to evaluate the impacts of structural and management alterations proposed for the water treatment plant on water quality in the network, based on the simulation of the behavior of free residual chlorine (FRC), as well as to evaluate the reduction the risks to the health of consumers, through the application of risk analysis method Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), aiming a safe supply for the population of a medium-sized city. The simulation of water quality behavior was developed in the software EPANET 2.0, being the network map constructed from the network tracing of water supply network of two places of Campina Grande City, Paraíba state, Brazil. In the current scenario (C1) one of the places presented, on all nodes, FRC below the minimum recommended by the Ordinance of Brazilian Health Ministry; after the changes, simulated in scenario 2 (C2) an improvement of 60% was observed in the disinfectant concentration compliance with the minimum recommended value. The risk assessment for C2 showed that the changes provided a reduction of about 66% of the risks in relation to C1. The simulation indicated that there is an improvement in the quality of water but it was concluded, however, that only promoting changes in the water treatment plant is not sufficient to ensure the same or higher concentrations of FRC equal or superior to 0.2mgCl₂/L, throughout the network.

Keywords: Water supply system. Water quality. free residual chlorine. Risk assessment. EPANET.

INTRODUÇÃO

A garantia da qualidade da água para consumo humano fornecida por um sistema de abastecimento público constitui elemento essencial das políticas de saúde pública. Esta tem sido também uma preocupação de agências de proteção ambiental e da Organização Mundial de Saúde (OMS).

A água fornecida à população urbana está em contínuo processo de degradação, decorrente do transporte e armazenamento da água tratada, através do sistema de abastecimento, que comporta uma grande diversidade de equipamentos e materiais em diversos estados de conservação, que não dependem somente de um processo de desgaste físico, mas também dos modos de operação e manutenção. Em todos os casos, no entanto, a degradação da qualidade da água representa grave risco à saúde e à segurança da população abastecida (ALVES, 2014; AL-JASSER, 2007; MUNAVALLI; KUMAR, 2004).

Os sistemas de distribuição de água são infraestruturas urbanas críticas projetadas para fornecer água potável aos consumidores com um mínimo de interrupção. A contaminação desses sistemas tem sido historicamente reconhecida como uma ameaça para a saúde pública em todo o mundo (HRUDEY; HRUDEY; POLLARD, 2007; KHAN et al., 2013). Apesar de recentes avanços tecnológicos, os surtos de contaminação da água têm persistido, mesmo em nações desenvolvidas, e são, principalmente, resultantes de um conhecimento insuficiente dos riscos associados às fontes de água, às falhas nos processos de operação e manutenção e tecnológicas (HUSBAND; BOXALL, 2011; AL-JASSER, 2007; CRAUN et al., 2010).

A produção de água segura para consumo humano passa atualmente por uma revisão de seus paradigmas, devido, por um lado, aos chamados contaminantes emergentes (químicos e biológicos) e, por outro, ao reconhecimento das limitações das técnicas do controle laboratorial da qualidade da água (BRASIL, 2012). A implementação apropriada do Plano de Segurança da Água (PSA) oferece um importante meio de promover o gerenciamento preventivo do risco associado aos serviços de abastecimento público de água (SUMMERILL; POLLARD; SMITH, 2010). Essas mudanças de abordagem implicam no entendimento e na aceitação de que os métodos de avaliação e gerenciamento de risco, aplicados de modo abrangente e integrado, desde a captação até o consumo, são uma forma efetiva de garantir a segurança da qualidade da água para consumo humano (JALBA et al., 2010).

A gestão da qualidade da água tratada requer a construção de modelos capazes de prever sua degradação em diferentes cenários caracterizados por fatores diversos, entre os quais capacidade, constituição e idade das tubulações, bem como a qualidade da operação e manutenção (FISHER; KASTL; SATHASIVAN, 2012). Os softwares para simulação de comportamento hidráulico e de qualidade da água em sistemas de distribuição já são usados há bastante tempo. Essa utilização tem, comumente, a finalidade de reproduzir as variações espaço-temporais dos níveis de cloro residual livre em SAA e, atualmente, são também utilizados para auxiliar no planejamento e gestão do desempenho de SAA (FISHER; KASTL; SATHASIVAN, 2012; ZECHMAN, 2011; MUNAVALLI; KUMAR, 2004; ROSSMAN, 2000).

No Brasil as instalações dos SAA são frequentemente antigas, apresentando deficiências em suas unidades, além de serem operadas de modo predominantemente empíricos. Assim, as avaliações e tomadas de decisão do administrador contêm grau significativo de incerteza e propiciam a convivência permanente com inúmeros riscos (ALVES, 2014).

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto de alterações estruturais e de gerenciamento propostas para a estação de tratamento de água (ETA) sobre a qualidade da água na rede, com base na simulação do comportamento do cloro residual livre, como também, avaliar a redução dos riscos à saúde dos usuários, através da aplicação de método de análise de risco.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

Campina Grande (7° 13'50" S e 35° 52'52" O) é um município do estado da Paraíba, situado na região Nordeste do Brasil. Sua sede é uma típica cidade de porte médio, com uma população de aproximadamente 400.000 habitantes. Possui um clima seco com temperaturas moderadas de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (IBGE, 2010).

O objeto de estudo é o sistema de abastecimento público da cidade de Campina Grande (SAACG), que é bastante complexo, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 1. O referido sistema compreende uma rede de distribuição com uma extensão de 1350,8 quilômetros que distribui mensalmente uma média de 3,1 milhões de metros cúbicos de água, beneficiando 156.298 economias, através de 135.532 ligações domiciliares, sob a responsabilidade de uma empresa concessionária.

Os principais reservatórios de distribuição do sistema são denominados R9 e R5, com capacidades úteis de 26.000m³ e 8000m³, respectivamente. Esses reservatórios abastecem a rede de distribuição e outros 20 reservatórios, sendo alimentados por água tratada na Estação de Tratamento de Gravatá de Queimadas, situada a cerca de 20km de distância, com capacidade para tratar 1500 L/s, (MENESES, 2011), utilizando operações unitárias convencionais de tratamento. A água tratada é transportada entre a ETA e o R9 por três linhas adutoras paralelas (Adutora A: de ferro fundido com diâmetro de 500 mm; Adutora B: de aço com diâmetro de 700mm; Adutora C: de aço com diâmetro de 800mm).

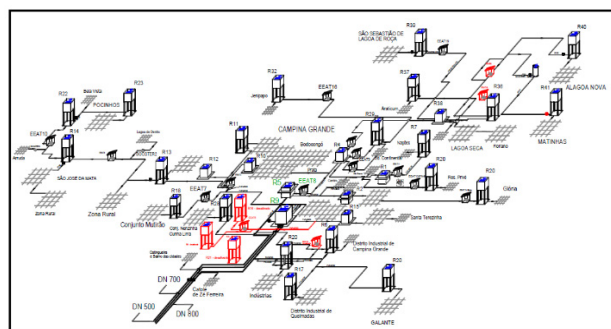


Figura 1 - Representação esquemática das unidades operacionais do SAACG
Fonte - Menezes (2011)

Na intenção de amenizar os efeitos dos desníveis acentuados do relevo, a rede foi dividida em quatro zonas de pressão A, B, C e D (Figura 2).

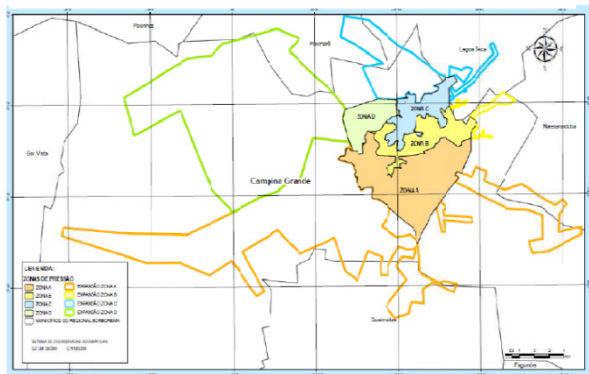


Figura 2 – Representação das zonas de pressão da rede de distribuição de água de Campina Grande
Fonte - Meneses (2011)

Diante da complexidade do sistema foi escolhida a zona de pressão B como a área de estudo deste trabalho. Esta zona abrange os bairros mais centrais da cidade que já dispõem de infraestrutura instalada e apresentam dinâmica de crescimento urbano associada à verticalização. A área, com uma população de aproximadamente 79.700 habitantes e 33.650 economias, é constituída por 15 bairros. A rede de distribuição de água possui 170 km de canalizações, sendo constituída por 46,7% de PVC, 34,9% de cimento amianto e 18,4% de ferro fundido.

A zona de pressão B é abastecida pelo reservatório R5 (8000 m³), que redistribui para os reservatórios R2 (2290m³) e R4 (10.000m³). O R2 está localizado no centro da cidade e é alimentado por gravidade por uma adutora de diâmetro 600mm e abastece o bairro do São José, sendo os outros bairros são abastecidos por vazões aduzidas do R5 e do R4.

Simulação

A simulação do comportamento da qualidade da água foi realizada no software EPANET 2.0, com malha construída a partir do traçado da rede do SAACG. Para simular a qualidade da água na zona de pressão B foram escolhidos dois bairros, Prata e São José (Figura 3).

O bairro da Prata está localizado na zona oeste de Campina Grande, sendo um dos mais antigos da cidade, com uma área de 761.621 m² e população de aproximadamente 8507 habitantes, entre os residentes e os flutuantes, caracterizando-se por concentrar diversos centros médicos, clínicas e hospitais particulares, além de colégios e igrejas. O bairro conta ainda com a tradicional Feira da Prata, aonde comerciantes de diversas cidades vêm, aos domingos, vender seus produtos.

O bairro de São José fica situado na zona sul da cidade, com área de 715.142 m² e população de 8016 habitantes, onde estão localizados dois grandes hospitais públicos, Hospital Universitário Alcides Carneiro e o Hospital Municipal Pedro I, além de escolas e igrejas.

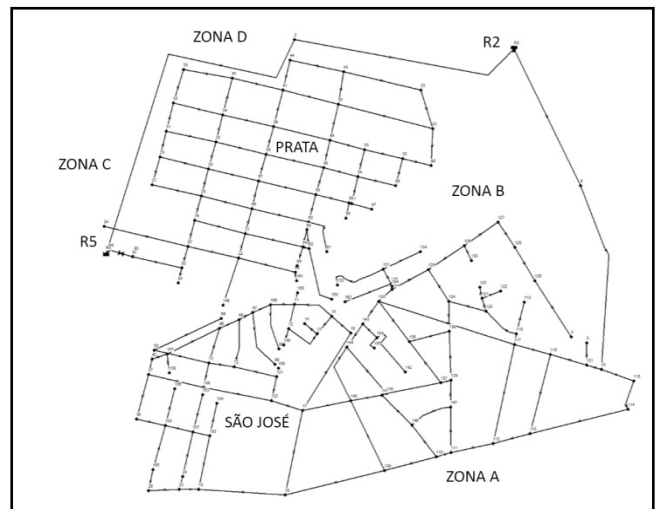


Figura 3 - Esquema da rede simulado no EPANET

Os bairros da Prata e São José (Figura 4) possuem similaridades tais como: localização na zona de pressão B, redes com idades semelhantes, predominância das canalizações de cimento amianto na rede secundária e são alimentados por um único reservatório.

Além das semelhanças, outros fatores para a escolha destes foram às diferenças entre os comportamentos com relação à qualidade da água, observados em estudos anteriores (SANTOS, 2011; ALVES, 2014) e por possuírem fontes de alimentação e regimes hidráulicos distintos, uma vez que o bairro da Prata é atendido pelo R5, em regime contínuo, enquanto o bairro do São José, abastecido pelo R2 em regime de batelada, é um setor confinado da rede de distribuição, que favorece a estagnação da água.

O tempo de duração total da simulação escolhido foi de 168 horas, com início a zero hora. Teve como configuração básica intervalos iguais (5 segundos) para os cálculos hidráulicos e de qualidade, com vistas a representar melhor o comportamento hidráulico e, conseqüentemente, a distribuição do cloro residual livre na rede. A utilização de um mesmo tempo para os intervalos auxilia na coesão da simulação, pelo fato dos módulos computacionais que determinam as condições de qualidade serem dependentes do modelo hidráulico.



Figura 4 – Delimitação dos bairros Prata e São José
Fonte - Google Earth

Com base em dados fornecidos pelo Centro de Controle de Operações (CCO) da CAGEPA foram estabelecidas curvas de padrão temporal, exigidas pelo simulador, para descrever o comportamento do consumo-base e dos níveis e volumes atribuídos aos objetos (reservatórios e nós). Para os cenários estudados o intervalo de tempo para as curvas de padrão temporal foi de 1 hora. A porcentagem de cada valor da curva em relação ao valor mais frequente foi introduzida no EPANET 2.0 como fator multiplicativo.

Na malha foram localizados os reservatórios R5 e R2, as válvulas borboleta, os 142 nós e representados 185 trechos, com base no traçado da rede de distribuição dos bairros. Ambos os reservatórios são de nível variado, porém, como a simulação tratou de apenas uma parcela do sistema de abastecimento, foi admitido que o R5 seria representado computacionalmente como um reservatório de nível fixo (RNF) e o R2 como reservatório de nível variado (RNV).

O nível de água utilizado no RNF foi o nível máximo mais frequente, num período de 12 meses. Nesse mesmo período foi traçado o padrão de nível a partir de leituras horárias, resultando em 8640 leituras, que foram relacionadas com o volume mais frequente durante o ano, resultando em valores incrementais ao nível de água inicial adotado para o R5 (Eq. 1).

$$I = \frac{Nobs}{Vm} \quad (1)$$

onde, I - valor incremental (m^3/m^3), Nobs-nível de água observado (m) e Vm-volume modal (m^3).

A qualidade inicial de CRL adotada no R5 foi de 2,38 $mgCl_2/L$, obtido em estudo realizado no SAACG por Leal (2012).

O coeficiente de reação do cloro no escoamento (k_b) adotado para o R2 e para a rede foi de $2,73 d^{-1}$, de acordo com os resultados das análises do “teste da garrafa”, realizado com água transportada pela adutora de 700 mm, que alimenta o R5, reservatório responsável pelo abastecimento do R2, obtidos por Leal (2012). Esse valor descreve o decaimento do cloro na massa de água nas condições atuais da rede. O coeficiente de reação na parede (k_w) foi ajustado pelo método de tentativa e erro, comparando os valores de CRL encontrados na rede com os obtidos na simulação, sendo o valor adotado de $0,4 m/dia$.

A operação de controle do volume do R2 no ciclo diário foi introduzida através do editor de origem de qualidade, selecionando a opção “reforço de massa”, que serve para variar o volume com o tempo, de acordo com os fatores multiplicativos estabelecidos na curva de padrão temporal, desenvolvida a partir dos relatórios diários do CCO da CAGEPA.

O reservatório R5 é operado como um poço de sucção, que alimenta os reservatórios R4 e R2, bem como o bairro da Prata. A vazão fornecida ao bairro da Prata (Q_{Prata}) foi calculada subtraindo-se a soma das vazões de entrada no R4 (Q_{eR4}) e no R2 (Q_{eR2}) da vazão de saída do R5 (Q_{sR5}), conforme a Eq. 2.

$$Q_{Prata} = Q_{sR5} - (Q_{eR4} + Q_{eR2}) \quad (2)$$

A estimativa de consumo foi realizada a partir do balanço de vazão nos reservatórios R2, R4 e R5. Para o cálculo

dos volumes foram utilizadas as informações de controle de níveis horários dos reservatórios, resultando no perfil diário de variação da vazão.

A vazão total consumida em um ano, em cada reservatório, foi obtida através dos somatórios das variações das vazões mensais que, por sua vez, foram calculadas a partir dos somatórios das variações diárias. As seguintes equações descrevem o procedimento de cálculo para os R4 e R5, que são operados em regime contínuo, sendo:

$$Q_{(i)} - Q_{(j)} = \Delta Q_{k,i} \begin{cases} i = 1 \dots 23 \\ j = 2 \dots 24 \\ K = 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_{(i)} - Q_{(j)} = \Delta Q_{k,i} \begin{cases} i = 1 \dots 23 \\ j = 2 \dots 24 \\ K = 2 \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{(i)} - Q_{(j)} = \Delta Q_{k,i} \begin{cases} i = 1 \dots 23 \\ j = 2 \dots 24 \\ K = 365 \end{cases} \quad (5)$$

$$Qcd_k = \sum_{i=1}^{23} \Delta Q_{k,i} \quad (6)$$

$$Qtc = \sum_{k=1}^{365} [Vcd_k] \quad (7)$$

Q = vazão em m^3/h ;

ΔQ = diferença entre as vazões horárias;

i = iteração da vazão inicial horária;

j = iteração da vazão final horária;

k = índice do dia calculado;

Qcd = vazão diária consumida;

Qtc = vazão total consumida.

As mesmas equações foram utilizadas para obtenção da vazão total consumida no R2, no entanto como o mesmo é operado em regime de batelada os cálculos diferem na ordem de subtração das vazões, $Q_{(i)} - Q_{(j)}$ passando a ser $Q_{(j)} - Q_{(i)}$.

A vazão total consumida estimada para o bairro da Prata foi de $1502,3 m^3/dia$, e $1011,5 m^3/dia$ para o bairro do São José.

Após a obtenção dos volumes consumidos e com base na população, foi estimado o consumo per capita para cada bairro, como a razão entre a vazão e a população. O consumo per capita do bairro do São José foi de $126 L/hab.dia$ e o da Prata foi $176 L/hab.dia$.

O consumo estimado, em L/s , para cada nó, foi obtido a partir do produto da população representada pelo nó e o consumo per capita do bairro, sendo a população levantada através da contagem do número de lotes, a partir das plantas baixas dos bairros e das imagens de satélites fornecidas pelo software *Google Earth*, admitindo 3,3 habitantes por lote, conforme o Plano de Saneamento Básico da cidade de Campina Grande (PMSB, 2014).

Os padrões de consumo dos bairros simulados foram estimados com base nos relatórios diários do CCO, sendo calculadas todas as vazões horárias. Assim, no final do mês

considerado, foi calculada a moda para cada hora, por ser mais representativa do que o valor médio. Desse modo, foi obtida a curva de demanda para cada mês. Os resultados mensais foram utilizados para obtenção da curva que descreve o comportamento em um ano.

Os valores das curvas de demanda foram convertidos em fatores multiplicativos, porcentagens que representam as variações temporais da vazão mais frequente, estabelecendo um intervalo de tempo de 1 hora para cada fator, resultando em 24 fatores, com o objetivo de aproximar o padrão de consumo simulado do comportamento real dentro de um dia. A Figura 5 representa as curvas de consumo diário de água da Prata e do São José.

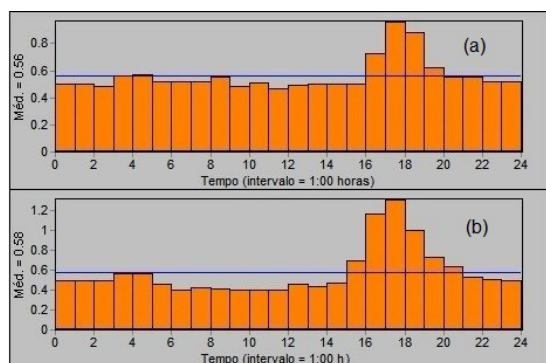


Figura 5 - Curvas de consumo diário de água nos bairros Prata (a) e São José (b)

Para a malha simulada a qualidade inicial de CRL da água nos nós foi admitido como nula, com o objetivo de avaliar o comportamento e a distribuição do cloro fornecido pelos reservatórios na rede estudada.

Os diâmetros dos trechos variaram entre 50 e 600 mm, sendo admitido, para fins de simulação, estado sempre aberto para toda a rede. Os coeficientes de rugosidade foram estabelecidos a partir dos materiais das canalizações, identificados na planta, e os valores escolhidos, com base na fórmula de Hazen - Williams, com 105 para ferro fundido, 120 para cimento amianto e 135 para PVC.

No R5 foi adotado o modelo de mistura completa (MIXED) e no R2 o modelo de mistura de dois compartimentos (2COMP). A concentração de tolerância de qualidade da água foi de $0,2 \text{ mgCl}_2/\text{l}$, o mínimo admitido pela Portaria 2914/2011, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

Descrição dos Cenários

O cenário 1 (C1), que descreve a situação atual, foi elaborado com base no traçado da rede simulada no Software EPANET 2.0, nas pesquisas desenvolvidas no SAACG com foco na qualidade da água, entre 2008 e 2014, nos levantamentos das informações junto à CAGEPA e no estudo de análise de risco, que permitiram uma visão mais consolidada do panorama atual do SAACG.

A calibração do C1 foi realizada com base nas concen-

trações de CRL na rede e na ETA, obtidas de dados coletados pelo Grupo de Pesquisa Saúde Ambiental, da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). O comportamento do CRL na zona de pressão B foi analisado em quatro campanhas de coletas, nos anos de 2009, 2010, 2011 e 2014.

A análise das concentrações do cloro residual livre nas campanhas indicou a existência de setores nos quais a qualidade da água apresentava níveis de degradação consideravelmente críticos.

A operação dos reservatórios é um fator que deve ser levado em consideração na avaliação da degradação da qualidade da água. Enquanto o R5 funciona como poço de sucção, permitindo grande renovação da água, o R2, operado em regime de batelada com apenas um ciclo de enchimento/esvaziamento, favorece a estagnação e, conseqüentemente, a maior degradação da qualidade da água e uma maior demanda de CRL.

A manutenção do SAACG não segue protocolos que estabeleçam rotinas para frequências de limpeza e reparos nas unidades da ETA e da rede de distribuição, a exemplo dos tanques dos floculadores e decantadores, filtros, reservatórios e tubulações.

A ETA, como dito anteriormente, é do tipo convencional. Estudos com o objetivo de avaliar a qualidade da água tratada, desenvolvidos por Leal(2012), indicaram que a estação de tratamento precisa melhorar o desempenho das operações unitárias, considerando que elevadas concentrações de materiais orgânicos e redutores inorgânicos passam inertes pelo tratamento e representam considerável demanda de CRL ao longo da distribuição da água.

A concentração de CRL na saída da estação se aproxima do valor máximo permitido (VMP) pela Portaria 2914/2011, variando entre 4 e 5 mgCl_2/L , faixa adotada pela CAGEPA na intenção de garantir que os pontos mais distantes da rede atendam ao padrão de potabilidade. No entanto, cerca de 40% dessa concentração são consumidos na adutora até a chegada no R5, sendo $2,38 \text{ mgCl}_2/\text{L}$ o valor adotado para a qualidade inicial no RNF.

O cenário 2 (C2) propõe alterações na ETA para que a água tratada venha a ter, em toda a extensão da rede, características físicas, químicas e microbiológicas que atendam aos padrões de potabilidade, estabelecidos pela Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011).

Dependendo da origem e qualidade da água bruta, o tratamento convencional nem sempre consegue livrar a água de contaminantes químicos, orgânicos e inorgânicos, e biológicos, sendo necessária o acréscimo de mais operações unitárias para a remoção de contaminantes específicos.

Este cenário (C2) tem o propósito de compensar as limitações da atual configuração propondo melhoria na infraestrutura da ETA, com a reabilitação e expansão das unidades de tratamento instaladas, acrescentando novas etapas com a finalidade de aprimorar a eficiência total e das unidades do processo, como também reduzir o potencial de produção de subprodutos da desinfecção.

Além das mudanças estruturais, este cenário também contempla a implementação de um sistema de automação em todas as unidades da ETA, a preparação de um manual para

estabelecer protocolos de manutenção e operação das unidades da estação e um programa contínuo de capacitação e treinamento do corpo de técnicos e operadores. Assim o gestor responsável contará com uma equipe que poderá desempenhar melhor e com mais eficiência suas funções.

Vários estudos já foram desenvolvidos (GIBERT et al., 2013; LYON et al., 2012; YAPSAKLI; ÇECEN, 2010; CHEN et al., 2007; DANTAS et al., 2011; LIU et al., 2013; ZHAN et al., 2010) para avaliar a eficiência de remoção de compostos orgânicos, particularmente os responsáveis por sabor e odor desagradáveis, em diferentes combinações de processos de tratamento de água. Unidades de pré-tratamento e de tratamentos avançados, como unidades de adsorção, adicionados à configuração convencional, mostraram eficiências variando entre 50 e 60 %, na remoção de materiais orgânicos e inorgânicos.

Visando obter uma simulação compatível com os objetivos do C2, as alterações propostas para a ETA, simuladas no software EPANET, podem ser representadas pela redução dos valores de K_b e K_w , resultante da melhoria da qualidade da água tratada, em termos de baixa concentração de carbono orgânico total (COT) e de redutores inorgânicos, levando ao menor consumo de CRL em todo o SAACG. A melhoria na ETA deve resultar em valores de K_b e K_w , que favoreçam concentrações acima do mínimo de 0,2 mgCl₂/L, recomendado em todos os pontos da rede.

Vários modelos matemáticos já foram desenvolvidos com o objetivo de descrever o decaimento do cloro na massa líquida (KASTL; FISHER; JEGATHEESAN, 1999; MUNA-VALLI; KUMAR, 2004; FISHER; KASTL; SATHASIVAN, 2011; FISHER; KASTL; SATHASIVAN, 2012). Fisher, Kastl e Sathasivan (2011) avaliaram 21 diferentes modelos de decaimento de CRL na massa líquida, com o propósito de propor um conceito geral mais adequado que possa auxiliar no planejamento e gestão da qualidade da água do SAA. Eles concluíram que o mais simples e potencialmente adequado era o modelo desenvolvido por Kastl, Fisher e Jegatheesan (1999), que envolve dois grupos de agentes redutores que, respectivamente, reagem rapidamente e lentamente com o cloro, em um SAA, conforme as equações a seguir:

$$\frac{dc_f}{dt} = -k_f * C_{cl} * C_f \quad (8)$$

$$\frac{dc_s}{dt} = -k_s * C_{cl} * C_s \quad (9)$$

$$\frac{dc_{cl}}{dt} = \frac{dc_f}{dt} + \frac{dc_s}{dt} \quad (10)$$

onde, C_{cl} - concentração de cloro livre (mgCl₂/L); C_f e C_s - concentrações de agentes de redução rápida e lenta (mg Cl₂-equiv/L), respectivamente; k_s e k_f - coeficientes da taxa de reação rápida e lenta (L/mgCl₂/h), respectivamente.

O cálculo do K_b para C2 foi baseado no modelo de Kastl, Fisher e Jegatheesan (1999), sendo admitido, que seu valor decorre da adição das taxas de reação de compostos que reagem mais rapidamente com as taxas de reação dos que são mais lentamente oxidados pelo cloro, ideia consolidada por

Debord e Gunther (2008) que realizaram uma revisão crítica com o propósito de avaliar diferentes mecanismos e velocidades de reação de compostos orgânicos e inorgânicos com o cloro.

Durante todo o período da simulação, o valor do K_b foi admitido constante. Para o cenário atual foi adotado o valor estimado por Leal (2012) no SAACG, 2,73d⁻¹ com a concentração de COT da água tratada de 2,2 mg/L.

A partir da relação entre matéria orgânica e temperatura proposta por Kiéné, Lue e Lévi (1998), Eq. (11), foi possível estimar a porcentagem do valor de K_b associado a reações envolvendo compostos orgânicos presentes na água bruta, a qual foi de 5% do K_b total. Logo, este valor reforça que há uma predominância de compostos inorgânicos na água bruta e boa parte do cloro destinado para desinfecção é consumida para oxidar material inorgânico.

$$K_b = \frac{1,8 \times 10^6}{3600} (COT) \exp \left(\frac{-6050}{T-273} \right) \quad (11)$$

onde: K_b - coeficiente de reação do cloro no escoamento (s⁻¹); COT - carbono orgânico total (mg/L); T - temperatura (°C)

Admitindo a proporção do K_b associada ao COT como 5%, foram feitos vários testes com combinações de K_b e K_w , com base no modelo de Kiéné, Lu e Lévi (1998), visando simular as condições para atingir o máximo de conformidade de CRL com o padrão mínimo estabelecido pela Portaria 2914/2011. O valor que apresentou resultados mais compatíveis com o proposto foi o K_b de 0,5 dia⁻¹, que corresponde a 83% de remoção de COT. Por tentativa e erro, o valor de K_w foi de 0,2 m/dia. A concentração inicial no R5 foi, na simulação, reduzida para 2mgCl₂/L, visando atender ao valor máximo recomendado pela Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011).

Avaliação de Risco

A avaliação de risco, com foco na saúde dos usuários do SAACG, foi realizada com aplicação do método Failure Mode and Effect Analysis - FMEA, uma técnica indutiva que consiste em estudar processos complexos, analisando sistematicamente todos os modos de falha, isto é, buscando o que poderá falhar e identificando os efeitos resultantes das falhas (SNOOKE; PRICE, 2012).

A quantificação do risco, de um evento perigoso, é feita através da multiplicação dos escores atribuídos aos aspectos severidade (que indica o quão problemático pode ser aquele perigo caso ele ocorra), ocorrência (a frequência de acontecimentos no cenário estudado), detecção (o grau de dificuldade em detectar o perigo) e abrangência (refere-se à distribuição espacial do perigo).

A finalidade da aplicação desta avaliação ao SAACG foi a estimativa do risco à saúde dos usuários, no cenário atual e em um outro que prevê alterações na infraestrutura, na capacitação dos recursos humanos e nas rotinas de operação e manutenção da ETA.

A estimativa foi realizada com base em eventos perigosos, que envolvem problemas estruturais, operacionais e de manutenção na ETA que podem comprometer a qualidade da

água e, conseqüentemente, aspectos de saúde do usuário.

As principais falhas potenciais avaliadas foram especificadas com base no manual do PSA (BRASIL, 2012), nos levantamentos realizados em visitas à ETA e em resultados experimentais obtidos em trabalhos anteriores, resultando nos seguintes eventos perigosos: não conformidade de CRL na rede (P1), o potencial de formação de subprodutos da desinfecção (P2), processos unitários de tratamento inadequados na ETA e equipamento deficiente (P3), incapacidades no controle de processos de tratamento (P4), utilização de reagentes de qualidade inadequada (P5), deficiências na dosagem de produtos químicos (P6) e falhas na monitoração na ETA (P7).

Um grupo de seis especialistas contribuiu no estabelecimento de escores para os aspectos severidade, ocorrência, detecção e abrangência, com base no seu conhecimento sobre a qualidade da água e atividades de operação e de manutenção do SAACG. Para cada aspecto foram associados uma categorização e um valor: alto (3 pontos), médio (2 pontos) e baixo (1 ponto). Na reunião de avaliação dos eventos perigosos a equipe entrou em consenso sobre quais escores eram mais representativos.

A avaliação de cada perigo para os cenários C1 e C2 foi baseada em informações, sobre a operação e manutenção, levantadas junto à concessionária CAGEPA, sobre a vigilância da qualidade da água, junto à Secretaria Municipal de Saúde, e sobre a qualidade da água e sua adequação ao uso hospitalar, junto aos hospitais. Também foram considerados dados de qualidade da água no sistema e informações da simulação da qualidade para cada cenário, a qual se mostrou uma ferramenta importante na tarefa de estimar e categorizar os riscos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação

Para a apresentação dos resultados da simulação foram escolhidos pontos estratégicos. No bairro da Prata será apresentado o comportamento do CRL na Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Elpídio de Almeida - Prata (nó 27), na Feira da Prata (nó 33), no Hospital João XXIII (nó 44), na Igreja do Rosário (nó 67) e no Mosteiro das Clarissas (nó 58). No bairro do São José os pontos foram: Hospital Universitário Alcides Carneiro (nó 109), Estádio Presidente Vargas - Campo do Treze (nó 102), Hospital Municipal Pedro I (nó 18), Casa da Criança Dr. João Moura (nó 117) e Escola Estadual de Ensino Fundamental Clementino Procópio (nó 136).

No C1 todos os nós da malha de distribuição do bairro da Prata apresentaram concentração de CRL em conformidade, por todo o período da simulação, mesmo com k_b de $2,73 \text{ dia}^{-1}$, sendo isso atribuído à proximidade com o R5. O nó mais próximo do R5 avaliado foi o nó 27, que apresentou um valor máximo de $1,58 \text{ mgCl}_2/\text{L}$, indicando 33,6% de consumo do CRL em relação à qualidade inicial adotada no R5, em um percurso de aproximadamente 475m, o que atesta a alta taxa de reação do cloro com a massa líquida.

A Figura 6 mostra o comportamento do CRL no período de 168 horas, no bairro da Prata, no qual foi simulada

a situação em que a água entra pela primeira vez na rede. Pode ser observado que, na primeira hora, a água já chega ao nó mais próximo avaliado (nó 27) com concentrações elevadas, as quais variam ao longo do dia, obedecendo a um padrão de repetição, que coincide com o ciclo diário de consumo. Essas variações simuladas do CRL ao longo do dia sofrem a influência de diversos fatores, tais como a curva de demanda nos nós, o padrão de nível no reservatório, o consumo base específico de cada nó e o K_b . No bairro da Prata a curva de consumo nos nós terá maior impacto nas concentrações de CRL do que os demais fatores, devido ao curto intervalo de permanência da água na malha, promovendo a renovação da massa líquida continuamente, sendo assim, mesmo com um alto K_b , são observados valores de CRL em conformidade com o padrão de potabilidade.

Foi também constatado que, a medida que aumenta a distância entre o nó observado e o reservatório que o alimenta, a concentração de CRL diminui proporcionalmente; os pontos mais distantes do reservatório sofrem maior efeito dos coeficientes de reação, resultando numa maior degradação da qualidade da água. As curvas que representam os nós 33 e 58 apresentam concentrações próximas de CRL, apesar de espacialmente distantes um do outro, no entanto a água percorre distâncias semelhantes do R5 até o ponto de consumo. De um modo geral, as magnitudes das concentrações de CRL nos nós analisados são influenciadas diretamente pela passagem da água por pontos da rede com diferentes consumos base e inversamente pelas distâncias percorridas pela água desde o reservatório R5. Mesmo com diferenças mínimas os nós 44 e 58 possuem curvas com variações de CRL um pouco mais brandas, enquanto os nós 27, 33 e 67 apresentam variações de CRL mais bruscas ao longo do ciclo diário de simulação. Por se tratar de um sistema, tipicamente em malha, de um bairro planejado e com características homogêneas (idade e material das canalizações) as curvas têm um comportamento mais sincronizado, todas tendendo a um mesmo padrão de distribuição temporal das concentrações de CRL.

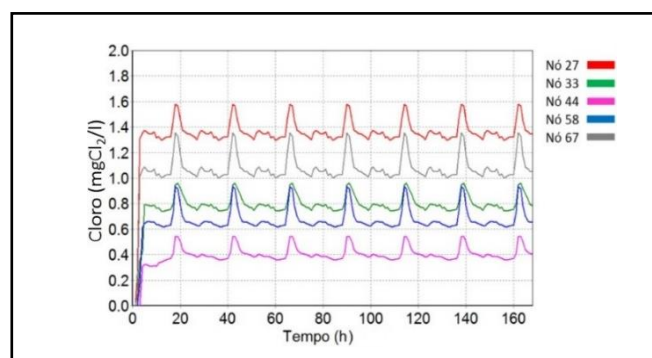


Figura 6 – Simulação da variação temporal de CRL nos nós distribuídos no bairro da Prata no cenário C1.

A mudança do padrão de comportamento das curvas de variação de CRL do bairro da Prata para as do São José decorre principalmente do regime de operação. O bairro do São José é abastecido pelo R2 que é operado em regime de batelada, sendo alimentado pelo R5. Na Figura 7 pode ser observado que a água chega no nó mais próximo do R2 (nó 117) após a metade do

primeiro dia de simulação, apenas no segundo dia é que a água atinge os nós mais extremos da rede.

No C1 todos os nós do bairro do São José apresentaram, por todo o período da simulação, concentração de CRL abaixo do mínimo recomendado. Na Figura 7 é possível observar que o nó 117 foi o que apresentou maiores concentrações, no entanto o máximo valor observado foi de 0,14 mgCl₂/L. Nesse cenário, dos 142 nós, 93 apresentaram, por todo o período simulado, concentração de CRL abaixo de 0,2 mgCl₂/L, correspondendo a 66% de não conformidade com esse padrão mínimo.

Esta degradação da qualidade da água reflete claramente as conseqüências da operação em batelada, da precária manutenção do R2, do fato da rede do bairro ser confinada e da própria característica da água desde a ETA, que apresenta um elevado valor de K_b, decorrente da presença, na água tratada, de compostos orgânicos e predominantemente de inorgânicos que passam inertes pela ETA. Sobre a manutenção do R2, há relatos dos operadores que faz mais de 10 anos que foi limpo. Os sedimentos armazenados intensificam o consumo do CRL, sendo liberada para a rede a concentração de apenas 0,2 mgCl₂/L, o que motivou a CAGEPA a adotar a recloração, para elevar a concentração de CRL e assim atender a rede do São José, mas, no entanto, a demanda necessária não é satisfeita. Além disso, na adutora que alimenta o R2 há um decaimento de 60% de CRL, motivado principalmente pela operação em batelada que favorece a estagnação da água na adutora e no reservatório.

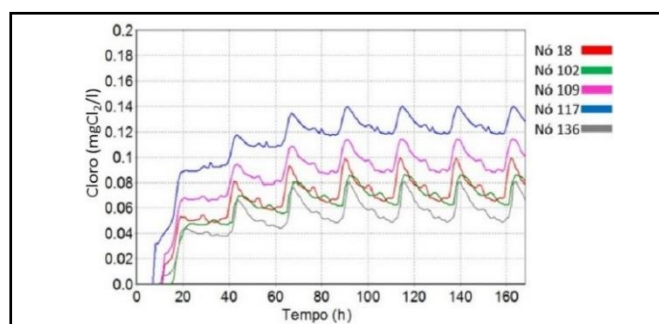


Figura 7 – Simulação da variação temporal de CRL nos nós distribuídos no bairro do São José no cenário C1.

Os picos de CRL observados no São José são associados à operação do R2, pois coincidem com o horário de alimentação, que é realizada a partir das 19 horas, diariamente, com duração de duas horas. Estes picos podem ser interpretados como a renovação da água, elevando as concentrações de CRL, diferindo do comportamento na Prata, onde esse aumento é associado aos horários de maior consumo. Após o valor máximo observado ocorre um decaimento das concentrações, com variações ao longo do ciclo diário, decorrentes do padrão temporal de consumo na rede, do padrão de nível do R2 e do K_b.

O comportamento de CRL em relação à distância da fonte de alimentação também divergiu do observado na Prata. Os nós 136 e 102 apresentaram comportamentos similares, no entanto o nó 136, que representa a Escola Estadual Clementino Procópio é o mais próximo do R2 e apresentou a pior qualidade de água dos pontos escolhidos, sendo isto atribuído à heterogeneidade da rede no São José, com traçado mais desordenado e

constituído por canalizações de materiais e idades diferentes. O nó 136 fica em um setor com canalizações mais antigas, a água no percurso passa somente por canalizações de ferro fundido e cimento amianto. O nó 102, localizado no ponto mais distante em relação ao reservatório, apresenta decaimento compatível com o percurso da água até o nó, apesar de estar em uma parte mais nova do bairro e a água passar por canalizações predominantemente de PVC.

O efeito da rede confinada favorece ainda mais a formação de biofilmes, pois há períodos do dia que a água fica estagnada na rede, sendo presumível que nos setores mais antigos da rede do São José esse efeito seja mais acentuado.

No C2, as alterações na ETA refletiram positivamente na variação do CRL na rede, tanto na Prata como no São José. Nas Figuras 8 e 9 pode ser observado que as curvas apresentam comportamentos similares ao C1, diferindo na magnitude das concentrações.

A simulação, com o K_b de 0,5 dia⁻¹ e de K_w 0,2 m/dia, resultou numa melhoria significativa na conformidade com o padrão mínimo de CRL; de 142 nós analisados 106 nós apresentaram concentrações superiores a 0,2 mgCl₂/L.

A Figura 8 mostra o comportamento simulado para o C2 na Prata, que não tinha problemas com relação à concentração de CRL no C1; mesmo assim apresentou um aumento nas concentrações e, em alguns pontos, foram observadas concentrações acima do máximo recomendado de 2mgCl₂/L. Nos nós (27 e 33) que estão mais próximos do R5, as curvas apresentaram variações de CRL menores que no C1, porque a influência do K_b foi reduzida em relação aos outros fatores, o que é claramente observado em todos os nós da Prata.

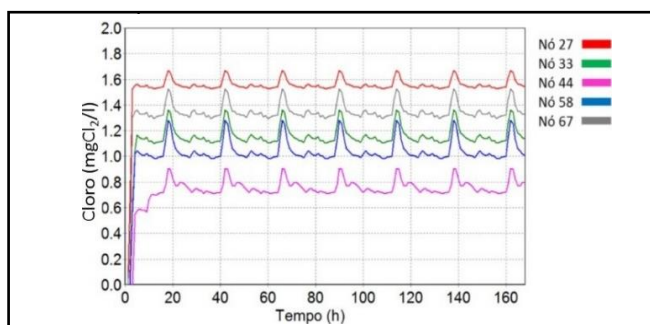


Figura 8– Simulação da variação temporal de CRL nos nós distribuídos na Prata no cenário C2.

A Figura 9 ilustra o comportamento do CRL no C2, no São José, sendo observado o aumento da concentração de cloro na rede; dos 90 nós do bairro, 54 apresentaram concentrações de CRL acima ou igual a 0,2 mgCl₂/L, resultando em uma melhoria na conformidade com o padrão de potabilidade que passou de 0%, no C1, para 60%, no C2.

Portanto, foi constatado que mesmo melhorando a qualidade da água na ETA, não é possível garantir concentrações de CRL acima de 0,2 mgCl₂/L, em toda a rede de distribuição. Embora tenha ocorrido melhoria na água, promover apenas alterações na ETA não é suficiente para atingir o atendimento do padrão mínimo recomendado. Isso seria possível com valores de

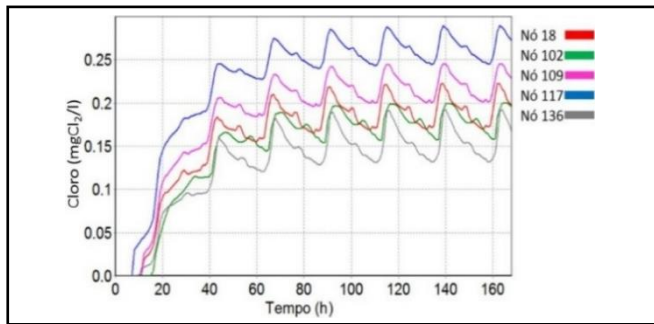


Figura 9 – Simulação da variação temporal de CRL nos nós distribuídos no São José no cenário C2.

K_b menores do que o simulado os quais seriam atingidos somente com a implementação de processos avançados de tratamento (RIZZO, 2011; YANG et al., 2011a, YANG; YUAN; WENG, 2010), que exigem elevados investimentos.

No entanto, a simulação indica que se forem realizadas alterações na forma de operação do R2, passando-o para alimentação contínua e executada uma interligação da rede confinada do São José, em conjunto com menores alterações na ETA, isso resultaria em uma melhoria considerável na qualidade da água da rede. Essas alterações na ETA seriam em operações de pré - tratamento, a exemplo de pré - oxidação, que tem efeitos positivos nos processos de clarificação, auxiliando na remoção de 50 a 60% dos compostos orgânicos e inorgânicos (LIU et al., 2013; CHEN et al., 2007).

Avaliação de Risco

A avaliação de risco pelo método FMEA, no cenário atual (C1), revelou que a degradação da qualidade da água no SAACG expõe a saúde dos usuários a riscos. O valor do produto dos escores atribuídos pelos especialistas, aos aspectos severidade, ocorrência, detecção e abrangência, resulta num valor de risco associado a cada perigo no C1 e C2, conforme ilustrado na Figura 10.

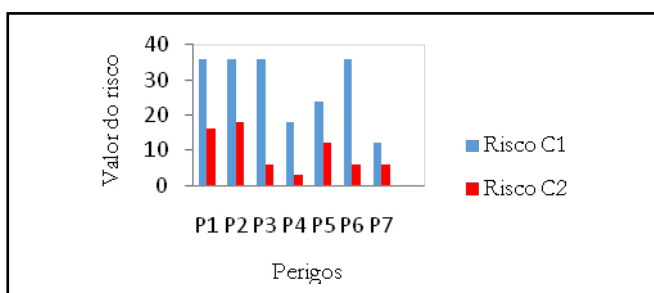


Figura 10 – Valor absoluto do risco para C1 e C2 em relação a cada perigo

Diante dos perigos avaliados na rede, a não conformidade do residual de cloro e o potencial de formação de subprodutos da desinfecção apresentaram o mesmo valor de risco (Figura 10), tendo estes dois perigos uma relação direta com a exposição da população ao risco dos efeitos do contato, particularmente da ingestão, de água com contaminantes. No caso particular do SAACG, este risco é real, pois a análise das

concentrações do cloro residual livre nas campanhas realizadas (ALVES, 2014; SANTOS, 2011) indicaram a existência de setores nos quais a qualidade da água apresenta níveis de degradação consideravelmente críticos. De fato, todo o bairro do São José, setor confinado da rede de distribuição, apresentou 100% de não conformidade com o padrão mínimo de CRL, tanto nos valores observados como nos simulados, embora aqueles autores tenham verificado total conformidade com o parâmetro de turbidez. Amostras de água coletadas nesse setor apresentaram 100% de frequência de presença de coliformes totais.

No cenário atual pode ser afirmado que a população do bairro do São José está exposta a uma situação de risco ao consumir água fornecida pelo sistema de abastecimento. Considerando que nessa região encontram-se dois grandes hospitais públicos, essa situação se agrava, pois, além dos residentes da área, há os pacientes em tratamento que são mais suscetíveis ao perigo.

Outro aspecto importante avaliado foi a idade da rede estudada, pois boa parte foi construída na década de 1950 e constituída de materiais suscetíveis a rupturas (7 reparos por km em um ano), além da inadequada operação e manutenção das canalizações e reservatórios, que não possuem rotinas estabelecidas de limpeza e reparos.

A reação do cloro com matéria orgânica naturalmente presente na água pode produzir subprodutos da desinfecção, tais como trihalometanos (TAMs) e ácidos haloacéticos (Haas), que podem ter efeitos adversos sobre a saúde humana (HUA; VASYUKOVA; UHL, 2015; SUMMERHAYES et al., 2011; CHARISIADIS et al., 2015; LYON et al., 2012). Na avaliação do SAACG o perigo dessa produção foi considerado relevante porque a ETA não tem capacidade para remover o COT da água bruta, sendo as concentrações afluentes e efluentes praticamente iguais, um pouco superiores a 2mg/L.

Os especialistas, ao avaliarem os perigos inerentes à ETA, consideraram as operações unitárias de tratamento inadequadas e deficiências na dosagem de produtos químicos como os mais importantes, pois a operação da ETA ainda é marcada pelo empirismo e pela tomada de decisões baseada somente em critérios práticos, a exemplo do não uso de coagulantes durante o período de estiagem, quando os valores de turbidez da água bruta são muito baixos, sem considerar outros indicadores de sua qualidade.

Na sequência, o perigo considerado relevante foi a utilização de reagentes de qualidade inadequada, pois o grau de pureza destes pode, além de comprometer a qualidade da água, comprometer a eficiência da operação de diferentes unidades da estação (YANG et al., 2010; YANG et al., 2011b). A avaliação do perigo pelos especialistas levou em conta a falta de especificações técnicas, por parte da empresa concessionária, para a aquisição de produtos químicos.

Os avaliadores consideraram que apenas o responsável técnico pela ETA já possui habilitação suficiente para a tomada de decisões técnicas relativas às várias operações unitárias que afetam a qualidade da água, enquanto que o pessoal de nível técnico ainda requer programa contínuo de treinamento.

Finalmente, para os avaliadores, o perigo que oferece o menor risco são as falhas na monitoração da ETA, pois apesar

de todas as dificuldades de operação na estação, há uma rotina de monitoração de controle da água tratada e, recentemente, foram instalados os sensores que otimizam a monitoração do cloro residual livre e da turbidez na saída da ETA.

A avaliação de risco para o C2 demonstrou que as alterações na ETA, no geral, proporcionarão melhorias na qualidade da água, com uma redução de cerca de 66% do risco observados no C1.

Para o perigo de não conformidade do residual de cloro livre na rede foi estimada uma redução de aproximadamente 44% no risco a ele associado, o que aparentemente é pouco, mas deve ser considerado que os residuais de cloro livre na rede não dependem somente das alterações na ETA, mas de outros fatores do SAA, particularmente aqueles referentes à operação e manutenção do sistema de abastecimento como um todo. De fato, a ETA representa apenas uma das muitas barreiras de segurança no controle da qualidade da água (WHO, 2011; BRASIL, 2012).

Já com relação à possibilidade de formação de subprodutos da desinfecção a avaliação de risco estimou uma redução de 50%, o que descreve, razoavelmente, o impacto significativo que as alterações propostas para a ETA podem causar sobre esse perigo. Com essas alterações pode ser prevista uma redução significativa (até 85 %) do COT e, conseqüentemente, dos precursores de trihalometanos, mas os escores atribuídos a cada um dos aspectos da avaliação de risco (severidade, ocorrência, detecção e abrangência) não dependem somente da concentração de precursores, mas de um conjunto maior de fatores.

As alterações propostas para o controle de processos unitários de tratamento inadequados na ETA e equipamento deficiente (P3), incapacidades no controle de processos de tratamento (P4) e deficiências na dosagem de produtos químicos (P6), associados exclusivamente à operação da ETA, têm, do ponto de vista da avaliação de risco, capacidade de promover redução acentuada (83%) do risco.

Os outros dois perigos (P5 - utilização de reagentes de qualidade inadequada e P7 - falhas na monitoração na ETA) apresentaram redução de 50% do risco em relação ao C1. No cenário C2, a possibilidade de utilização de reagentes de qualidade inadequada na ETA será reduzida com a utilização de protocolos de operação. Quanto às falhas na monitoração, o risco será menor após adoção de automação em todas as unidades da ETA, assegurando o controle sistemático das vazões e da qualidade da água.

CONCLUSÕES

A utilização do simulador EPANET e a avaliação de risco da qualidade da água são ferramentas úteis na gestão do desempenho de SAA, especialmente num contexto de exigência de adoção do Plano de Segurança da Água, por parte de agências e autoridades de saúde. A aplicação dessas ferramentas representa uma significativa contribuição para o controle e a vigilância da qualidade da água por possibilitar a compreensão dos impactos positivos causados na qualidade da água por alterações propostas no âmbito da ETA.

Neste trabalho, essa aplicação permitiu a análise de mudanças estruturais, de operação e manutenção propostas para a ETA, convencional, do sistema de abastecimento de água de Campina Grande, cidade de porte médio do nordeste do Brasil, sobre a qualidade da água, com base na distribuição espacial do CRL e sua conformidade com o padrão mínimo da Portaria 2914/2011, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

Os resultados da simulação indicam que as alterações propostas para a ETA podem conferir melhorias na água tratada, mas não são suficientes para garantir o atendimento do padrão mínimo (0,2 mg Cl₂/L) na totalidade dos pontos de monitoração, a não ser que seja considerada também a combinação de técnicas e tecnologias avançadas de tratamento. Isto pode ser inviável, técnica e economicamente, no contexto gerencial da empresa concessionária, requerendo minimização de outros fatores de degradação da qualidade da água, particularmente aqueles referentes à operação e manutenção do sistema de abastecimento como um todo.

REFERÊNCIAS

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

ALVES, L. S. *Análise da degradação da qualidade da água de abastecimento distribuída por rede antiga de cimento amianto*. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2.914: Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 14 dez. 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. *Plano de segurança da água: garantindo a qualidade e promovendo a saúde: um olhar do SUS / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador*. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2012.

CHEN, C.; ZHANG, X.; HE, W.; LU, W.; HAN, H. Comparison of seven kinds of drinking water treatment processes to enhance organic material removal: a pilot test. *Science of the total environment*, v.382, n. 1, p.93-102, Aug. 2007.

CRAUN, G. F.; BRUNKARD, J. M.; YODER, J. S.; ROBERTS, V. A.; CARPENTER, J.; WADE, T.; CALDERON, R. L.; ROBERTS, J. M.; BEACH, M. J.; ROY, S. L. Causes of outbreaks associated with drinking water in the united states from 1971 to 2006. *Clinical Microbiology Reviews*, v. 23, n. 3, p. 507-528, July 2010.

CHARISIADIS, P.; ANDRA, S. S.; MAKRIS, C. K.; CHRISTOPHI, C. A.; SKARLATOS, D.; VAMVAKOUSIS, V.; KARGAKI, S.; STEPHANOU, G. E. Spatial and seasonal variability of tap

- water disinfection by-products with in distribution pipe networks. *Science of the Total Environment*, v.506-507, p. 26-35, Feb. 2015.
- DANTAS, A. B.; PASCHOALATO, C. F. P. R.; FIGUEIREDO, J. O.; RAMOS, M. H. C. Remoção de cor, de ferro e de manganês em água com matéria orgânica dissolvida por meio de pré-oxidação, coagulação, filtração e adsorção em carvão ativado granular. *DAE*, n. 186, p. 46-55, mai. 2011.
- DEBORDE, M.; GUNTEN, U. Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment—Kinetics and mechanisms: A critical review. *Water Research*, v.42, n. 1-2, p13-51, Jan.2008.
- FISHER, I.; KASTL, G.; SATHASIVAN, A. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water Research*, v.45, n. 16, p. 4896-4908, Oct. 2011.
- FISHER, I.; KASTL, G.; SATHASIVAN, A. A suitable model of combined effects of temperature and initial condition on chlorine bulk decay in water distribution systems. *Water Research*, v.46, n. 10, p. 3293-3303, June 2012.
- GIBERT, O.; LEFÈVRE, B.; FERNÁNDEZ, M.; BERNAT, X.; PARAIRA, M.; PONS, M. Fractionation and removal of dissolved organic carbon in a full-scale granular activated carbon filter used for drinking water production. *Water Research*, v. 47, n. 8, p. 2821–2829, May 2013.
- HRUDEY, S. E.; HRUDEY, E. J.; POLLARD, S. J.T. Risk management for assuring safe drinking water. *Environment International*, v. 32, n. 8, p. 948-957, Dec. 2007.
- HUA, P.; VASYUKOVA, E.; UHL, W. A Variable reaction rate model for chlorine decay in drinking water due to the reaction with dissolved organic matter. *Water Research*, v.75, p. 109-122, May 2015.
- HUSBAND, P. S.; BOXALL, J.B. Asset deterioration and discolouration in water distribution systems. *Water Research*, v. 45, n. 1, p. 113-124, Jan. 2011.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 10 out. 2015.
- JALBA, D. I.; CROMAR, N. J.; POLLARD, S. J. T.; CHARROIS, J. W.; BRADSHAW, R.; HRUDEY, S. E. Safe drinking water: Critical components of effective inter-agency relationships. *Environment International*, v.36, n. 1, p. 51-59, Jan. 2010.
- KASTL, G.; FISHER, I.; JEGATHEESAN, V. Evaluation of chlorine kinetics expressions for drinking water distribution modelling. *Journal of Water Supply: Research and Technology e Aqua*, v.48, n.6, p. 219-226. 1999.
- KIÉNÉ, L.; LU, W.; LÉVI, Y. Relative importance of phenomena responsible for chlorine decay in drinking water systems. *Water Science and Technology*, v.38, n.6, p. 219-227, 1998.
- KHAN, S.; SHAHNAZ, M.; JEHA, N.; REHMAN, S.; SHAH, M. T.; DIN, I. Drinking water quality and human health risk in Charsadda district, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, v. 60, p.93-101, Dec. 2013.
- LEAL, E. S. *Modelagem da degradação de cloro residual livre em sistemas de adução de água de abastecimento de porte médio*. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- LIU, R.; SUN, L.; JU, R.; LIU, H.; GU, J.; LI, G. Treatment of low-turbidity source water by permanganate pre-oxidation: In situ formed hydrous manganese dioxide as filter aid. *Separation and Purification Technology*, v.117, p. 69-74, Sept. 2013.
- LYON, B. A.; DOTSONA, D.; LINDENK, G.; WEINBERGH, S. The effect of inorganic precursors on disinfection byproduct formation during UV-chlorine/chloramine drinking water treatment. *Water Research*, v.46, n. 15, p. 4653-4664, Oct. 2012.
- MENESES, R. A. *Diagnóstico Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água: o caso de Campina Grande*. 2011. 161 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental) -Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
- MUNAVALLI, G. R.; KUMAR, M. M.S. Dynamic simulation of multi-component reaction transport in water distribution systems. *Water Research*, v.38, p. 1971-1988, Jan. 2004.
- PMSB - Plano Municipal de Saneamento Básico. Secretaria de Planejamento. Diagnóstico da Situação dos Serviços de Saneamento Básico. In: CONFERÊNCIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO DE CAMPINA GRANDE, 1., 2014, Campina Grande. *Anais...*Campina Grande: UFCG, 2014.
- RIZZO, L. Bioassays as a tool for evaluating advanced oxidation processes in water and wastewater treatment. *Water Research*, v.45, n. 15, p.4311-4340, Oct. 2011.
- ROSSMAN, L. A. EPANET 2 User's Manual. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency, 2000.
- SANTOS, S. G. *Distribuição espacial de bactérias heterotróficas na rede de distribuição de água de Campina Grande – PB*. 2011.120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
- SNOOKE, N.; PRICE, C. Automated FMEA based diagnostic symptom generation. *Advanced Engineering Informatics*, v.26, n.4, p.870-888, Oct. 2012.
- SUMMERILL, C.; POLLARD, S. J.T.; SMITH, J. A. The role of organizational culture and leadership in water safety plan implementation for improved risk management. *Science of the Total Environment*, v. 408, n. 20, p. 4319-4327, Sept. 2010.

SUMMERHAYES, R. J.; MORGAN, G. G.; LINCOLN, D.; EDWARDS, H. P.; EARNEST, A.; RAHMAN, M. D. B.; BYLEVELD, P.; COWIE, C. T.; BEARD, J. R. Spatio-temporal variation in trihalo methanes in New South Wales. *Water Research*, v.45, n. 17, p.5715- 5726, Nov. 2011.

WHO -World Health Organization. *Guidelines for Drinking-water Quality Policies and Procedures used in updating the WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. 4th ed. Geneva: World Health Organization. 2011.

YAPSAKLI, K.; ÇEÇEN, F. Effect of type of granular activated carbon on DOC biodegradation in biological activated carbon filters. *Process Biochemistry*, v. 45, n. 3, p. 355-362, Mar. 2010.

YANG, B. M.; LIU, J. K.; CHIEN, C.C.; SURAMPALLI, R.Y.; KAO, C.M. Variations in AOC and microbial diversity in an advanced water treatment plant. *Journal of Hydrology*, v. 409, n. 1-2, p. 225-235, Oct. 2011a.

YANG, J. S.; YUAN, D. X.; WENG, T. P. Pilot study of drinking water treatment with GAC, O₃/BAC and membrane processes in Kinmen Island, Taiwan. *Desalination*, v. 263, n. 1-2, p.271-278, Nov. 2010.

YANG, Z. L.; GAO, B. Y.; YUE, Q. Y.; WANG, Y. Effect of pH on the coagulation performance of al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water. *Journal of Hazardous Materials*, v. 178, n. 1-3, p. 596-603, June. 2010.

YANG, Z.L.; GAO, B. Y.; YUE, Q.Y.; WANG, Y. Aluminum fractions in surface water from reservoirs by coagulation treatment with poly aluminum chloride (PAC): influence of initial pH and OH⁻/Al³⁺ ratio. *Chemical Engineering Journal*, v. 170, n.1, p. 107-113, May 2011b.

ZECHMAN, E. M. Agent-Based Modeling to Simulate Contamination Events and Evaluate Threat Management Strategies in Water Distribution Systems. *Risk Analysis*, v. 31, n. 5, Jan. 2011.

ZHAN, X.; GAO, B.; YUE, Q.; LIU, B.; XU, X.; LI, Q. Removal natural organic matter by coagulation-adsorption and evaluating the serial effect through a chlorine decay model. *Journal of Hazardous Materials*, v.183, n. 1-3, p. 279-286, Nov. 2010.

Contribuição dos autores

Ruth Silveira do Nascimento – Coleta e organização de dados. Interpretação de resultados. Estruturação, redação e fechamento do texto.

Rosires Catão Curi – Elaboração da metodologia e fechamento do texto.

Wilson Fadlo Curi - Elaboração da metodologia e interpretação de resultados.

Rui de Oliveira- Seleção de indicadores, elaboração da metodologia, interpretação de resultados. Estruturação, redação e fechamento do texto.

Cícero Fellipe Diniz Santana – Montagem e execução de simulações. Elaboração da metodologia e interpretação de resultados.

Celeide Maria Belmont Sabino Meira - Coleta e organização de dados e fechamento do texto.