

Metodologia para Otimização da Amostragem de Qualidade de Água em Redes de Distribuição

José G. Vasconcelos, Sergio Koide

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UNB

jvasconcelos@unb.br ; skoide@unb.br

Recebido: 10/10/06 - revisado: 06/10/08 - aceito: 09/10/09

RESUMO

Para assegurar a qualidade da água distribuída por sistemas de abastecimento de água – SAA – as companhias de saneamento baseiam-se na coleta de amostras em pontos pertencentes à rede de distribuição. Embora a norma brasileira determine o número e a frequência de coleta de amostras, é difícil definir-se uma diretriz geral no que tange à localização das estações de amostragem na rede, o que pode resultar em uma rede de amostragem parcialmente ineficiente. Apresenta-se aqui uma metodologia objetiva para a seleção de redes de amostragem de qualidade de água em SAA aplicável a companhias de saneamento com capacidade limitada de monitoramento em tempo real em redes de distribuição. Essa metodologia aperfeiçoa o critério de representatividade de amostragem apresentado em investigações anteriores, introduzindo como critério de seleção de pontos de amostragem a habilidade de identificação de fontes externas de contaminação. Tal propósito é alcançado por meio da simulação do teor de cloro na rede e do decaimento de bactérias devido à presença de agentes desinfetantes. A metodologia foi aplicada ao SAA da cidade de Santa Maria-DF, Brasil. Os resultados indicam o potencial desta metodologia como uma ferramenta para companhias de saneamento em países em desenvolvimento visando garantir a distribuição de água de qualidade compatível com os critérios de segurança.

Palavras-chave: Redes de Distribuição; Amostragem de Água; Contaminação; Monitoramento; Qualidade de Água; Otimização.

INTRODUÇÃO

O processo de rápida urbanização impôs vários problemas para as cidades, entre os quais se inclui a disponibilização de água para abastecimento humano em quantidade e qualidade adequadas. Em que pese as diversas melhorias implementadas nas tecnologias de tratamento de água nos últimos anos, a degradação da qualidade dentro das redes de distribuição pode ser uma ameaça real à saúde pública.

Essa degradação da qualidade de água em redes pode ocorrer em termos de parâmetros químicos, como por exemplo o decaimento do cloro residual (Kastl *et al.*, 1999; Lu *et al.*, 1999; Vasconcelos *et al.*, 1997), em termos da formação de subprodutos carcinogênicos (Clark *et al.* 1994, Zhang e DiGiano, 2002), ou em termos de parâmetros bacteriológicos. Nesse último caso, há diferentes mecanismos para a degradação da qualidade água em termos bacteriológicos, sendo um deles a liberação de placas de biofilme presas à face interna das tubulações, como exposto em Zacheus *et al.* (2001).

Um segundo mecanismo apontado por LeChevallier *et al.* (2003) é associado à ocorrência de transitórios hidráulicos em redes de distribuição, que podem causar sub-pressões e eventual sucção de elementos externos para dentro da rede de distribuição. Um terceiro mecanismo pode ser apontado ainda associado à deliberada contaminação de ponto(s) do sistema de distribuição de água, como no caso de um atentado terrorista ou ações de vandalismo.

Motivado por esses problemas, um procedimento importante é a amostragem nas redes de sistemas de abastecimento de água – SAA. A frequência e número de amostras são definidos no Brasil pela portaria do Ministério da Saúde 518/2004, em função do tipo do manancial explorado como fonte para o sistema distribuidor, da população atendida pelo sistema de distribuição e do parâmetro em análise. O cloro residual livre e os coliformes fecais são os parâmetros que necessitam de amostragens mais frequentes. Contudo, a portaria não apresenta critérios objetivos para a localização dos pontos que devem ser selecionados para

amostragem em SAA, requisitando que os pontos tenham representatividade na rede de distribuição, combinando critérios tais como:

- Abrangência espacial
- Pontos com grande circulação de pessoas
- Pontos com grupos populacionais de risco, como hospitais
- Trechos vulneráveis do sistema de distribuição, como, por exemplo, as pontas de rede ou locais com intermitência de abastecimento
- Locais com sistemáticas notificações de agravo à saúde devido a doenças de veiculação hídrica

Por outro lado, a variação da qualidade de água em uma rede de distribuição é um processo altamente dinâmico e complexo, que depende de parâmetros tais como a variação da demanda na rede, variações da qualidade de água suprida ao sistema e variações bruscas de pressão. Ferramentas computacionais tais como o programa EPANET2 (EPA, 2000) representam formas de simular a variação de parâmetros de qualidade em redes de distribuição, sendo possível, dessa forma, prever locais onde um dado parâmetro de qualidade de água apresenta valores considerados críticos, que poderiam se constituir candidatos a pontos de amostragem. Tais simulações numéricas são, contudo, dependentes da precisão das informações passadas ao programa, tais como taxas de decaimento do desinfetante na rede e monitoramento da demanda em tempo real na rede.

Muitas das companhias de saneamento localizadas em países em desenvolvimento não têm condições de fornecer dados precisos acerca da operação em tempo real das redes de distribuição de água. Graves problemas são frequentemente reportados, tais como redes com intermitência de abastecimento, condutos sub-dimensionados com excesso de perdas de carga, rupturas de redes não detectadas por onde contaminações externas podem ser admitidas. O decaimento de cloro residual requer medições experimentais o que frequentemente está além da capacidade das companhias, o que limita a aplicabilidade de modelos de simulação de qualidade de água em redes de distribuição.

Contudo, outras metodologias também podem ser aplicadas à seleção objetiva de pontos para redes de amostragem de qualidade de água e com requisitos de informação bem menores. Um dos critérios é o de representatividade da rede de amos-

tragem de água, apresentado por Lee et al. (1991). Essa metodologia assume como premissa fundamental que a qualidade de água piora à medida que a água percorre a rede de distribuição. Um conceito fundamental a essa metodologia é o conceito de cobertura de amostragem, definido da seguinte forma: dados dois pontos da rede A e B, posicionados em uma mesma trajetória de escoamento, sendo que A se encontra a montante de B. Se uma parcela significativa da vazão que chega ao ponto B (por exemplo, 50%) passou por A em seu caminhamento pela rede, e, considerando a piora da qualidade de água de montante para jusante na rede, com a verificação da qualidade da água no ponto B pode-se inferir a qualidade no ponto A.

Para ilustrar esse conceito, apresenta-se a rede de distribuição na Figura 1, que segue uma topologia similar àquela apresentada por Lee e Deininger (1992). Percebe-se que 80% da água que é consumida no nó 5 passou pelo nó 4. Caso essa fração seja considerada significativa, e dado que a qualidade de água piora à medida que a água escoou pela rede, a amostragem de água no nó 5 também pode inferir a qualidade de água no nó 4.

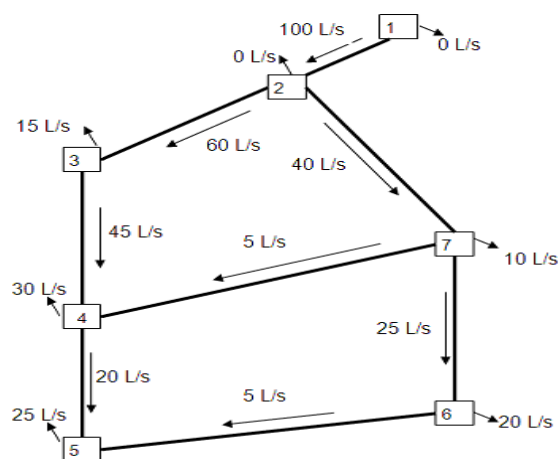


Figura 1 - Rede com topologia similar àquela apresentada por Lee e Deininger (1992) que ilustra o conceito da cobertura de amostragem.

Lee et al. (1991) formularam, dessa forma, o conceito de matriz de cobertura de amostragem baseado nas diversas trajetórias de escoamento pela rede de distribuição. A partir disso, Lee e Deininger (1992) apresentaram um algoritmo para a montagem da matriz de cobertura de amostragem e propuseram a solução matemática da otimização por meio de problema de programação inteira em que

se busca maximizar uma função-objetivo construída em termos da vazão distribuída que é efetivamente amostrada, direta ou indiretamente, por cobertura de amostragem. e implementada por Lee e Deininger (1992), da seguinte forma::

Maximizar

$$\sum_{i=1}^{Nn} d_i \cdot y_i \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{Nn} x_j \leq NE \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{Nn} [a_{ij}] \cdot x_j - y_{ik} \geq 0, k \in [1, K] \quad (3)$$

Em que:

$[a_{ij}]$ = Matriz de cobertura de demanda transposta
 x_j = Variável inteira que assume o valor um se o nó j é um ponto de amostragem, e caso contrário assume valor zero;

y_{ik} = Variável inteira que assume o valor um se a vazão que chega ao nó i é coberta pela amostragem feita em outro nó, assumindo no caso contrário o valor zero;

d_{ik} = Demanda de água em um nó de amostragem i

NE = Número de nós de amostragem a serem usados

Nn = Número de nós de distribuição na rede

Para levar em conta a variação temporal da demanda de água, a técnica utiliza cenários sequenciais de demanda de distribuição, em que as vazões são calculadas em regime permanente. Por apresentar uma demanda menor em termos de dados de entrada, a aplicabilidade desse tipo de alternativa para seleção de pontos de amostragem para países em desenvolvimento é mais imediata.

Essa metodologia foi aperfeiçoada subsequentemente por Koide et al. (1994) por meio da introdução de um termo na função-objetivo que permite determinar o número mínimo de pontos de amostragem que leva a uma cobertura de amostragem de 100%. Wanderley (1997) introduziu outra modificação à metodologia que permite a pré-fixação de pontos de amostragem de qualidade de água. Kumar et al. (1997) apresentou um procedimento alternativo para a solução do problema de

otimização que não depende da solução de um problema de programação inteira mas utiliza um algoritmo heurístico baseado na trajetória de escoamento e na renumeração dos nós.

Apesar das vantagens da metodologia proposta por Lee et al. (1991), há alguns pontos fracos tal como não considerar a possibilidade de detecção direta de contaminações externas (Kessler et al., 1998). Além disso, como exposto por Vasconcelos (2000), é possível que o critério de piora de qualidade de água de montante para jusante nem sempre seja válido. A própria variação de demanda de água pode não ser apropriadamente representada por uma seqüência de cenários de demanda em que o escoamento é resolvido em regime permanente, o que, por sua vez, pode comprometer o critério de cobertura de amostragem.

Outra metodologia alternativa foi proposta por Kessler et al. (1998) em que os pontos de amostragem são escolhidos de forma a detectar-se tão rapidamente quanto desejado alguma contaminação externa. A metodologia define um volume de água contaminada tolerável na rede de distribuição, definido como "nível de serviço", acima do qual a rede de amostragem poderia detectar a contaminação. A partir do ponto de entrada da contaminação, a metodologia assume que qualquer ponto a jusante das trajetórias de escoamento poderia detectar a contaminação, dessa forma desprezando a diluição e o decaimento do contaminante. O processo então é o da escolha do menor número de pontos de amostragem que permitam a detecção dentro de um "nível de serviço" predeterminado através de um problema de programação inteira.

Depois dos ataques terroristas em setembro de 2001, várias investigações foram desenvolvidas no sentido de se reduzir a vulnerabilidade das redes às contaminações externas. Berry et al. (2004) apresentou uma metodologia para detecção de contaminações externas que visa minimizar a quantidade de água contaminada que é efetivamente consumida. Essa metodologia assume que a contaminação dá-se na forma de uma ou mais injeções de contaminantes em pontos da rede que podem ocorrer em diferentes períodos de tempo.

Ostfeld e Salomons (2004) apresentaram uma metodologia similar àquela proposta por Kessler et al. (1998), mas que aplica a técnica de algoritmos genéticos para a seleção dos pontos de amostragem e que permite detectar a contaminação para um dado "nível de serviço".

Watson et al. (2004) apresentaram uma metodologia em que se comparam diferentes indicadores de desempenho sobre contaminação, tais como

número de pessoas expostas à contaminação, tempo para detecção da contaminação, número de ataques à rede de distribuição não detectados, volume de água contaminada consumida e tempo de permanência da contaminação na rede. As vantagens comparativas sobre cada um desses indicadores foram estudadas por esses autores para duas redes de distribuição, e verificou-se a não-correlação das soluções de amostragem advindas desses diferentes critérios, e que o aumento do número de pontos de amostragem não melhora a correlação entre os critérios. Tal feito ilustra claramente a complexidade inerente na definição dos critérios que uma rede amostragem de qualidade de água deve atender de forma a aferir a qualidade da água distribuída à população.

Mais recentemente, o trabalho de quinze diferentes grupos de pesquisa na área de detecção de contaminação em redes de distribuição foi comparado num evento denominado *Battle of Water Sensor Networks* (Ostfeld et al. 2008). Esse trabalho aponta para várias interessantes conclusões acerca do problema de otimização de redes de amostragem de água. Primeiramente, trata-se de um problema multiobjetivo para o qual é possível a definição antecipada de recomendações gerais. Na etapa da definição da rede, métodos quantitativos devem ser usados em conjunção com julgamento com critérios de engenharia e com processos intuitivos pelos operadores da rede. Várias linhas de pesquisa futura são recomendadas, como, por exemplo, a avaliação de sistemas de alerta de contaminação e o aperfeiçoamento de métodos multiobjetivos para a análise desse tipo de problema.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma metodologia para otimizar a seleção de redes de amostragem de água em SAA que necessite de dados simples o suficiente para viabilizar a sua aplicação pelas companhias de saneamento de países em desenvolvimento. Essa metodologia busca aperfeiçoar o algoritmo apresentado por Lee e Deininger (1992) por meio da capacidade de combinar os critérios de maximização da cobertura de amostragem com um critério de otimização da capacidade da rede de detectar contaminações bacterianas externas à rede. É também incluída a capacidade de simular o decaimento de desinfetante na rede de distribuição, abrindo a possibilidade de usar como critério de seleção de pontos de amostra-

gem pontos com teor de desinfetante abaixo de uma concentração mínima. Para as exigências em termos dos dados de entrada, a metodologia proposta assume que a variação de demanda pode ser representada em uma seqüência de cenários em que o escoamento é resolvido em regime permanente e resulta em um problema de otimização baseado em programação inteira. A metodologia foi implementada através de um programa de computador denominado ORAQUA¹.

METODOLOGIA PROPOSTA

Os passos envolvidos no processo de otimização dos pontos de amostragem podem ser assim descritos:

- 1) Para um dado cenário de demanda de água, promover o cálculo hidráulico da rede de distribuição. Considerar constante para o cenário a ser analisado o teor de cloro residual inicial, o nível limite de detecção de coliformes e o critério de cobertura de amostragem (Lee et al, 1991);
- 2) Determinar as trajetórias da água na rede de distribuição de forma a calcular-se a percentagem de vazão com que nós a montante contribuem para a vazão afluyente a nós de jusante;
- 3) Obter a matriz de cobertura de amostragem, tal como descrito por Lee e Deininger (1992) e Koide et al. (1994);
- 4) Calcular o decaimento de cloro na rede de distribuição assumindo condições permanentes de escoamento;
- 5) Para um nó A qualquer da rede de distribuição:
 - a. Assumir a existência de uma contaminação bacteriana, mensurável em termos de concentração de coliformes totais;
 - b. Simular o espalhamento da contaminação bacteriana a partir desse nó, considerando o decaimento da concentração dada a presença do cloro residual e a diluição da contaminação para jusante em cada um dos nós da rede de distribuição;

¹ O Programa ORAQUA pode ser obtido gratuitamente com o primeiro autor

- c. Determinar a lista de nós em que seria possível detectar essa contaminação;
- 6) Repetir o passo 5 para os demais nós da rede de distribuição com o objetivo de criar a Matriz de Contaminação, análoga à matriz de cobertura de amostragem proposta por Lee e Deininger (1992). Se em um nó B, à jusante da rede de distribuição, é possível detectar a contaminação originada no ponto A, então se estabelece que a célula (A, B) da Matriz de Contaminação assume o valor um, e o valor zero em caso contrário.
- 7) A função objetivo, que combina as variáveis inteiras advindas da matriz cobertura de amostragem com aquelas advindas da matriz de contaminação, é maximizada observando as restrições advindas de ambos os critérios. Dentro do processo de otimização, nós com baixos teores de desinfetantes ou de importância na rede de distribuição (hospitais, escolas, etc.) podem ser pré-selecionados como pontos de amostragem.

O cálculo hidráulico da rede de distribuição é feito no programa pelo método nodal, tal como proposto em Shamir (1973). Com os valores de pressão nos trechos é necessária a determinação das trajetórias dentro da rede de distribuição, passo necessário para a obtenção da matriz de cobertura de amostragem, do decaimento de cloro e do espalhamento das contaminações bacterianas. As trajetórias são calculadas por meio de um algoritmo de grafo desenvolvido por Vasconcelos (2000). Nesse sentido é importante ressaltar que, em problemas reais, é fundamental a etapa de calibração de parâmetros de escoamento, de forma a se garantir que o sentido e velocidade do escoamentos no conduto seja representativa do sistema.

Reconhece-se a dificuldade de levantamento de dados para a simulação do cloro residual em redes, uma vez que esse decaimento depende grandemente das características da água e do sistema, o que frequentemente não é disponível para companhias de saneamento. Embora o modelo ORAQUA possibilite a entrada dos parâmetros e calcule o decaimento de cloro residual tal como no modelo EPANET2 (EPA, 2000), na eventualidade de que os parâmetros necessários não estejam disponíveis, é possível pelo modelo proposto fazer essa simulação usando uma alternativa simplificada. Nesse caso, calcula-se o decaimento do cloro residual pela Equação 4, obtido por regressão numérica a partir de dados apresentados por Piriou et al. (1997). Nesse

estudo, as constantes foram obtidas a partir do levantamento do decaimento de cloro em vários sistemas de distribuição reais e em sistemas piloto. Assume-se conhecer a concentração de cloro no ponto inicial da rede (por exemplo, um reservatório de distribuição) e que essa concentração decai ao longo do tempo, à medida que a água percorre a rede de distribuição.

$$c(t) = c_0 \cdot \exp\left\{-\left(0.00631 \cdot c_0^{-1.2063}\right) \cdot t\right\} \quad (4)$$

Em que: $c(t)$ é a concentração de cloro residual em um dado instante t , c_0 é a concentração de cloro residual inicial, e t é o tempo de permanência da água dentro da rede de distribuição em minutos.

O programa realiza o cálculo do espalhamento e do decaimento da contaminação bacteriana considerando o efeito do agente desinfetante, no caso o cloro, na concentração bacteriana. Como relatado por Koide et al. (1994), dados experimentais indicam uma queda drástica de concentração de coliformes nos primeiros minutos de reação com um agente desinfetante, concomitantemente com a redução da concentração do desinfetante. Dessa forma, é de se esperar que, para um dado cenário de demanda de água em uma rede, uma contaminação bacteriana persistente pode resultar em uma pluma de contaminação com dimensões definidas, que pode não ser detectada na rede caso não haja amostragem em local apropriado. Para expressar o decaimento bacteriano com o tempo, em termos de coliformes, em função da concentração de desinfetante, optou-se por usar a equação apresentada por Selleck et al. (1978), expressa da seguinte forma:

$$S(t) = S_0 \left(\frac{c \cdot t}{b}\right)^{-n} \quad (5)$$

Em que: $S(t)$ é a concentração de coliformes no instante t (em min), S_0 é a concentração inicial de coliformes, t é o tempo de reação, c é a concentração de desinfetante (em mg/L), b e n são constantes de reação. Os valores adotados nas simulações para as constantes foram $b=0,099$ min.mg/L, e $n=1,240$

Dessa forma, dadas as trajetórias na rede de distribuição, o tempo de permanência da água e a concentração de cloro, é possível calcular a pluma de contaminação bacteriana gerada por uma injeção persistente de contaminante em qualquer um dos nós. Quanto maior é o potencial, em um determinado nó, de se detectar contaminação advinda de

vários outros nós a montante tanto melhor é esse ponto para amostragem no que tange ao aspecto de contaminações externas.

ε = Constante igual a $1/(Nn+1)^2$, que é um valor pequeno, mas suficiente para garantir a cobertura completa da amostragem

Formulação matemática do modelo proposto

O modelo aqui proposto busca o seguinte problema:

Maximizar

$$\left(\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{Nn} d_{ik} \cdot y_{ik} + RC \cdot Q \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{Nn} z_{ik} - \sum_{i=1}^{Nn} \varepsilon \cdot x_i \right) \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{Nn} x_j \leq NE \quad (7)$$

$$x_p = 1, \forall p = 1, 2, \dots, P \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{Nn} [a_{ij}] \cdot x_j - y_{ik} \geq 0, k \in [1, K] \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{Nn} [b_{ij}] \cdot x_j - z_{ik} \geq 0, k \in [1, K] \quad (10)$$

Em que:

y_{ik} = Variável inteira que assume o valor um se a vazão que chega ao nó i é coberta pela amostragem feita em outro nó (em um dado cenário de demanda k) caso contrário assumindo valor zero;

z_{ik} = Variável inteira que assume o valor um se a contaminação originada em um nó i pode ser detectada pela amostragem em algum outro nó em um dado cenário de demanda k), caso contrário assumindo valor zero;

d_{ik} = Demanda de água em um nó de amostragem i em um cenário de demanda k

$[b_{ij}]$ = Matriz de contaminação transposta

K = Número de cenários de demanda considerados

P = Número de estações de amostragem pré-determinadas;

p = Número de um nó específico na rede onde uma estação de amostragem será posicionada;

Q = Demanda média de água na rede, ou $\Sigma(d_{ik})/Nn$;

RC = Constante que expressa a importância relativa entre os critérios de representatividade da água amostrada e da capacidade de detecção de contaminação bacteriana externa

A definição da matriz $[a_{ij}]$ da variável x_j , e das constantes NE e Nn é a mesma adotada pela formulação de Lee e Deininger (1992). A forma de atribuir valores para as variáveis inteiras x e y é explicada em Koide et al. (1994), e é resumidamente apresentada aqui. Ao se seleccionar como ponto de amostragem um determinado nó da rede i , tem-se sua água amostrada e o valor da variável x_i é assumido como um (zero em caso contrário). Adicionalmente, se em qualquer nó da rede a vazão consumida no nó é "coberta" pela amostragem em algum nó a jusante, assume-se o valor um para a variável y_j (zero em caso contrário).

A variável z tem função análoga àquela da variável y . Caso uma contaminação tenha sido admitida através do nó i e se a amostragem de água feita em algum nó a jusante é capaz de detectar essa contaminação, então atribuímos à variável z_i valor um, e zero em caso contrário. O valor de z_i igual a zero indica que não há nenhuma estação de amostragem em uma trajetória a jusante do ponto de entrada de contaminação, ou então que a contaminação que chega às estações de amostragem para jusante foi inativada e/ou diluída abaixo do nível de detecção. Por fim, o valor da constante RC deve ser entendido como a "importância relativa" que o critério de detecção de contaminação tem sobre o critério de representatividade. Por exemplo, o valor $RC=1$ indica que ambos os critérios teriam a mesma importância na análise.

O último termo na equação 6 foi concebido por Koide et al. (1994) como uma forma de gerar soluções que tenham o mínimo possível de nós de amostragem que permitam a cobertura de amostragem completa para rede de distribuição. A restrição expressa pela equação 7 determina o número máximo de estações de amostragem que se deseja utilizar. As restrições impostas pela equação 8 são as que determinam a pré-seleção de pontos de amostragem considerados de importância estratégica para o programa de amostragem, tal como um hospital, colégio, pontos com histórico de problemas, etc. E, por fim, são as restrições impostas pela equação 10 que garantem que um nó com baixa sensibilidade na detecção de contaminações externas seja preterido como ponto de amostragem de água.

O problema de otimização foi resolvido neste estudo com o suporte do programa LINDO 6.1 (Lindo Systems, 1999), utilizando um algoritmo

“branch-and-bound” (Kaufmann e Henry-Laborde, 1977; Taha, 1975).

ESTUDO DE CASO – SANTA MARIA, DF

A cidade de Santa Maria é localizada na área metropolitana de Brasília, com uma população acima de 94.823 habitantes (CAESB, 2000). O sistema de distribuição, projetado para uma população de saturação de 180.000 habitantes (CEP, 1992) foi discretizado em 182 nós de distribuição, com uma vazão final de $0,786 \text{ m}^3/\text{s}$ no dia de maior consumo. A rede é dividida em duas regiões principais, cada uma composta por vários anéis de distribuição. Da região situada mais a norte parte uma adutora que conecta cada um dos anéis de distribuição, e que segue predominantemente em sentido sudoeste. A companhia de saneamento local, CAESB, opera na região que compõe o projeto hidráulico original, uma rede de 21 pontos de amostragem, em que amostras são coletadas com frequência semanal. Por ser um sistema relativamente novo, o principal critério utilizado pela CAESB na localização das estações de amostragem foi o de uniformidade espacial.

Dada a grande dimensão do sistema de distribuição, foi decidido considerar para a otimização apenas um cenário de demanda correspondente ao dia de maior consumo de água. Não foi considerado, assim, uma curva de consumo de 24 horas de duração. Considerando que a população de projeto da cidade ainda não chegou ao valor máximo, as demandas de água foram reduzidas proporcionalmente em cada um dos nós, e, dessa forma, a demanda considerada caiu para $0,414 \text{ m}^3/\text{s}$.

O valor de cloro residual no reservatório de distribuição desse sistema, que também é variável com o tempo, foi assumido como sendo $2,0 \text{ mg/L}$ para a simulação promovida pelo programa ORAQUA (Vasconcelos, 2000) O resultado é apresentado na Figura 2, em que as concentrações de cloro para os pontos entre nós foram interpoladas utilizando um algoritmo de *Krigging* utilizando o programa SURFER (Golden Software, 1997).

Para avaliação da representatividade da vazão amostrada e da capacidade de detecção de contaminações externas, utilizou-se um cenário em que todos os 21 nós de coleta foram pré-selecionados de acordo com o programa de amostragem utilizado pela CAESB. Em seguida, foram promovidas três diferentes simulações: uma para cada um dos dois

critérios de seleção de pontos de amostragem aplicados isoladamente (representatividade e detecção de contaminação externa), e uma simulação em que se atribuiu para ambos os critérios o mesmo peso ($RC=1$). O resultado dessa comparação é apresentado na Tabela 1.

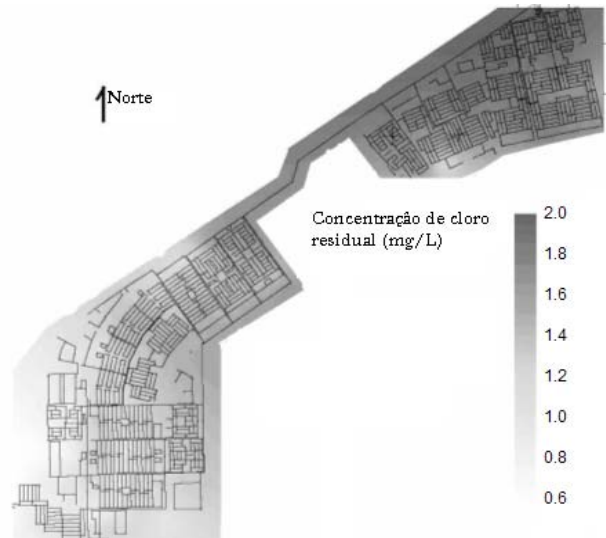


Figura 2 - Resultados da simulação de cloro residual na rede da cidade de Santa Maria, DF

Dentro das hipóteses utilizadas pela metodologia, é possível perceber-se que a otimização melhorou significativamente a efetividade da rede de amostragem tanto no critério de representatividade quanto no de detecção de contaminações externas, sendo que o primeiro critério teve aumentos mais expressivos.

Em termos de distribuição espacial dos pontos de amostragem, a rede que foi otimizada considerando ambos os critérios é comparada com a rede de amostragem utilizada pela CAESB. O critério de uniformidade adotado pela CAESB resultou em uma divisão uniforme de pontos de amostragem entre as duas regiões principais, sendo que a região ao norte tem 10 pontos e a região mais ao sul tem 11 pontos de amostragem. Essa distribuição foi alterada pela otimização com a combinação dos critérios para 8 e 13 pontos respectivamente. A tendência dos resultados após a otimização é pela escolha dos pontos mais a jusante do sistema de distribuição, como pode ser observado na Figura 3.

Tabela 1 – Comparação entre os resultados obtidos com a rede de amostragem da CAESB e as redes de amostragem obtidas após a aplicação dos critérios de otimização, isoladamente e combinados.

Rede de amostragem	Cobertura da vazão amostrada (%)	Detecção de contaminação externa (% dos nós cobertos)
Rede de amostragem atual (CAESB)	35,3%	25,8%
Rede de amostragem otimizando representatividade isoladamente	62,0%	28,6%
Rede de amostragem otimizando detecção de contaminação isoladamente	42,4%	38,5%
Rede de amostragem otimizando ambos os critérios acima	59,1%	36,7%

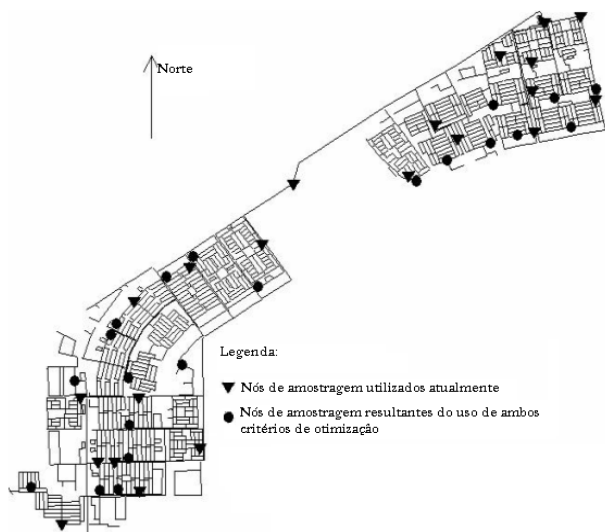


Figura 3 - Comparação da rede de amostragem utilizada pela CAESB com o resultado da otimização dos critérios de representatividade de amostragem e detecção de contaminação externa pela metodologia proposta.

Outra análise foi promovida na qual o número de pontos de amostragem foi gradualmente aumentado com o uso de ambos os critérios de otimização, e foi observado o efeito na representatividade de amostragem e na capacidade de detecção

de contaminação (sempre usando $RC=1$). O resultado, apresentado na Figura 4, indica que o aumento da capacidade de detecção de contaminação aumentou gradativamente para um número de estações de amostragem até 60, quando a rede de amostragem seria capaz de detectar a contaminação proveniente de 90% dos nós da rede. A partir desse número de pontos de amostragem, o aumento da capacidade de detecção aumenta de forma mais lenta. Por outro lado, a representatividade de amostragem cresce mais rapidamente com o número de pontos de amostragem, chegando a 90% da vazão de água distribuída com 45 pontos de amostragem. A cobertura total de detecção de amostragem para ambos os critérios foi atingida com 83 pontos de amostragem.

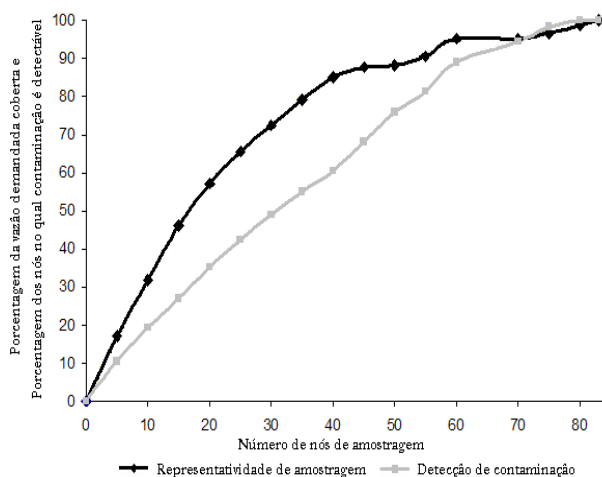


Figura 4 - Variação da efetividade de amostragem na rede de Santa Maria à medida que aumentam o número de pontos de amostragem.

CONCLUSÕES

A necessidade de prover à população água potável de qualidade adequada ao consumo humano é de grande importância, e, apesar dos esforços empenhados no sentido de se preservar mananciais de água bruta e aprimorar as tecnologias de tratamento, há sempre a degradação da qualidade de água quando eLa é transportada no sistema de distribuição. Programas de amostragem de água nas redes de distribuição tornam-se necessários de forma que seja possível diagnosticar a qualidade da água distribuída que chega ao consumidor final. Contudo, apesar da portaria MS 518/2004 fixar o

número e frequência de pontos de amostragem, não existe uma indicação objetiva sobre como esses pontos de amostragem devem ser identificados. Há na portaria referências sobre a necessidade de que haja representatividade dos pontos de coleta no sistema de distribuição, considerando a vulnerabilidade de setores da rede. Como resultado, alguns pontos devem ser pré-selecionados para o atendimento desses requerimentos. Na eventualidade de haver mais estações de amostragem que pontos pré-selecionados, a aplicação de alguma metodologia objetiva pode resultar em um programa de amostragem mais efetivo, como discutido por Ostfeld et al. (2008). Contudo, a escolha dos pontos de amostragem é mais difícil de ser solucionada para a maioria das companhias de saneamento em países em desenvolvimento que dispõem de recursos limitados no que tange à caracterização hidráulica e da qualidade da água em redes em tempo real.

A metodologia proposta resultou em um modelo baseado em programação inteira que incorpora o conceito de representatividade de amostragem proposto por Lee et al. (1991) com a análise da capacidade de detectar em um determinado nó contaminações originadas em outros pontos da rede. O modelo calcula hidráulicamente a rede em condições permanentes, determina as trajetórias de escoamento e é capaz de simular o decaimento de cloro e o espalhamento de plumas de contaminação bacteriana na rede. O baixo requisito em termos de dados permite que tal ferramenta seja usada pela maioria das companhias de saneamento. Entende-se ainda que, com a disponibilização ampla desta ferramenta, a análise de pontos de amostragem deva ser promovida quando da etapa de projeto das redes de distribuição, de forma que pontos apropriados para a amostragem de água possam ser previstos desde a concepção do sistema, embora haja necessidade de sua atualização periódica.

O estudo de caso do modelo ilustra o potencial desta ferramenta na escolha dos pontos de amostragem. Quando a otimização é promovida usando ambos os critérios de representatividade de amostragem e de detecção de contaminações externas, é observado um aumento da representatividade de 26.7% e um aumento do número de nós em que contaminações externas são detectadas de 12.7%. Esses resultados foram atingidos sem que com isso haja aumento no número de nós de amostragem, portanto sem que haja aumento nos gastos da companhia. Mais que isso, a desempenho da rede de amostragem pode ser objetivamente avaliado, permitindo que uma análise de risco possa ser promovida e assim determinar níveis de amostragem que

possam ser desejados a um sistema acima do requerimento da portaria MS 518/2004.

Melhorias futuras na metodologia podem ser incluídas, particularmente em relação aos modelos de decaimento de desinfetante e de coliformes. O modelo aqui utilizado não considera a redução na concentração de desinfetante causado pela inativação de bactérias. Estudos que investiguem parâmetros para a equação 5 de maneira a considerar diversos tipos de desinfetantes e bactérias também se fazem necessários. Finalmente, a aplicação de uma modelagem de qualidade de água dinâmica, em substituição ao uso de cenários de demanda, provavelmente ampliaria a capacidade de precisão do modelo, apesar de um aumento significativo nas informações a serem monitoradas na rede para a sua aplicação.

REFERÊNCIAS

- Berry J., Hart W. E., Phillips C. A. e Uber J. (2004) "A general integer-programming-based framework for sensor placement in municipal water networks". Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress, EWRI/ASCE, Salt Lake City, USA
- CEP – Consultoria, Engenharia e Projetos (1992). Projeto do Sistema de Distribuição de Água de Santa Maria – DF. Brasília
- Clark, R. M., Smalley, G., Goodrich, J. A., Tull, R., Rossman, L. A., Vasconcelos, J. J. e Boulos, F. P. (1994) "Managing water quality in distribution systems: simulating TTHM and chlorine residual propagation" *Aqua*, 43(4), 182-191.
- CAESB – Companhia de Saneamento do Distrito Federal - Diretoria do Sistema de Esgotos (2000) Sinopse do Sistema de Esgotamento Sanitário – Versão Digital. Brasília
- EPA-United States Environmental Protection Agency (2000). "EPANET 2 Users Manual.", 200p.
- Kastl, G. J., Fisher I. H e Jegatheesan. (1999)- "Evaluation of chlorine decay kinetics expressions for drinking water distribution systems modeling." *Aqua*, 48(6), 219-226.
- Kessler, A., Ostfeld, A. e Sinai, G. (1998). "Detecting accidental contamination in municipal water networks." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, ASCE, 124(4), 192-198.
- Kaufmann, A. e Henry-Labordere, A. (1977). *Integer and Mixed Programming: Theory and Applications*. Academic Press, USA, 379p.
- Koide, S., Brandão, C. C. S., Caixeta, D. M. e Rocha, A. C. (1994). "Modelo hidráulico para seleção de pontos

- de amostragem em redes de distribuição de água”. Anais do VI Congresso Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 179-188.
- Kumar, A., Kansal, M. L. e Arora, G. (1997). - “Identification of monitoring stations in water distribution system”. J. Environ. Engrg, ASCE, 123(8), 746-752.
- LeChevallier, M. W., Gullick, R. W., Karim, M. R., Friedman M. e Funk, J. E. (2003). “The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients” Journal of Water and Health, 1(1):3-14.
- Lee, B. H. e Deininger, R. A. (1992). - “Optimal locations of monitoring stations in water distribution system”. J. Environ. Engrg, ASCE, 118(1), 4-16.
- Lee, B. H., Deininger, R. A. e Clark, R. M. (1991). “Locating Monitoring Stations in Water Distribution Systems.” J. American Water Works Assoc., AWWA, 83(7), 60-66.
- Lindo Systems (1999). Lindo 6.1 software. USA
- Lu, W., Kiené, L. e Lévi, Y. (1999). “Chlorine demand of biofilm in water distribution systems.” Water Research, 33(3), 827-835.
- Ministério da Saúde (2004) – “Portaria 518/04 – Normas e o Padrão de Potabilidade da Água destinada ao Consumo Humano”. Diário Oficial da União, 25 de março de 2004.
- Ostfeld A., Salomons E. (2004) “Optimal Layout of Early Warning Detection Stations for Water Distribution Systems Security” J. Water Resour. Plan. Manage., ASCE, 130(5), 377-385.
- Ostfeld A., Uber J.G., Salomons E. ; Berry J. W., Hart W. E. , Phillips C. A., Watson J. P. ; Dorini G., Jonkergouw P., Kapelan Z., di Pierro F., Khu S.T. , Savic D.; Eliades D., Polycarpou M.; Ghimire S. R., Barkdoll B. D. ; Gueli R. ; Huang J. J., McBean E. A., Jamês W.; Krause A., Leskovec J., Isovitsch S., Xu J., Guestrin C., VanBriesen J., Small M., Fischbeck P.; Preis A.; Propato M., Piller O.; Trachtman G. B. ; Wu Z. Y., Walski T., “The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms” – J. Water Res. Plan. Mngmt. Special Edition, acesso online em 30/09/2008 em <https://cfwebprod.sandia.gov/cfdocs/CCIM/docs/BW SN.pdf>
- Piriou, P., Lévi, Y., Heraud, J. e Kiené, L. (1997) - “New tools and applications in modeling and monitoring water quality in drinking water distribution systems”. Water Supply, 15(2), 119-135.
- Seleck R. E, Saunier, B. M. e Collins, H. F. (1978). “Kinetics of bacterial deactivation with chlorine.” J. Environ. Engrg Div., ASCE, 104(EE6), 1197-1211.
- Shamir U. (1973). Water Distribution System Analysis. IBM Research, Yorktown Heights, USA.
- Taha H. A. (1975). Integer Programming – Theory, Applications and Computations. Academic Press, USA, 380p.
- Vasconcelos J.G. (2000) “Otimização da Efetividade de Amostragem em Redes de Distribuição de Água em Termos de Detecção de Contaminação por Coliformes e Representatividade das Vazões Distribuídas” Dissertação de Mestrado, Dept. de Engenharia Civil e Ambiental Universidade de Brasília.
- Wanderley, R. M. (1997). Localização Ótima de Pontos de Amostragem em Redes de Distribuição de Água. Projeto Final de Graduação, Dept. Civil Engrg, University of Brasília, Brasil, 62p.
- Watson, J. P., Greenberg, H. J. e Hart W. E. (2004) “A multiple-objective analysis of sensor placement optimization in water networks”. Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress, EWRI/ASCE, Salt Lake City, USA
- Zacheus O. M., Lehtola M. J., Korhonen L. K., Martikainen, P. J. (2001) “Soft deposits, the key site for microbial growth in drinking water distribution networks”. Water Res. 35(7):1757-65
- Zhang W., DiGiano F. A. (2002) “Comparison of bacterial regrowth in distribution systems using free chlorine and chloramine: a statistical study of causative factors”. Water Res. 36(6):1469-82

Methodology to Optimize Water Quality Sampling in Distribution Systems

ABSTRACT

In order to ensure the quality of water distributed by water supply systems –WSS – sanitation companies use samples collected at points in the distribution system. Although the Brazilian standard determines the number and frequency of sampling, it is difficult to define a general guideline for the location of sampling stations in the system, which may lead to a partly inefficient sampling network. Here an objective methodology is presented to select water quality sampling networks in WSS applicable to sanitation companies with a limited capacity for real-time monitoring in distribution networks. This methodology improves the criterion of representativity sampled presented in previous investigations, introducing the ability to identify external sources of contamination as a criterion to select sampling points. This purpose is achieved by simulating the chlorine content in the system and the decay of bacteria due to the presence of disinfectants. The methodology was applied to the WSS in the city of Santa Maria – DF, Brazil. The results indicate the potential of this methodology as a tool for sanitation companies in developing countries,

aiming at distributing water of a quality compatible with safety criteria.

Keywords: Distribution systems; water sampling; contamination; monitoring; water quality; optimization