

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“MODELO MATEMÁTICO PARA IDENTIFICAR LOCAIS DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA”

Roberto Suse (1), Edevar Luvizotto Junior (2), Bruno Melo Brentan (3)

(1) Universidade Estadual de Campinas. Rua Alberto Cerqueira Lima, 206, ap. 03, Campinas, São Paulo, Brasil. Tel +55(19)983939795

(2) (3) Universidade Estadual de Campinas. Av. Albert Einstein, 951, Campinas, São Paulo, Brasil. Tel: +55(19)32512354

RESUMO

Para indicar locais ótimos para monitorar uma rede de distribuição de água potável, foi avaliado um modelo matemático-computacional que utiliza o conceito de cobertura de demanda e procedimentos baseados em algoritmo genético. O modelo proposto foi aplicado em um rede hipotética de distribuição de água considerando 4 condições de consumo de água. Verificou-se que há variação do conjunto ótimo de estações de monitoramento devido à variação do padrão de demanda ao longo do dia. Por fim, o horário do dia onde o padrão de consumo de água é o menor, não houve a cobertura de toda a demanda da rede.

Palavras chave: qualidade de água, monitoramento, redes de distribuição, modelagem matemática.

ABSTRACT

To indicate optimal locations to monitor a drinking water distribution network, it was evaluated a computer-mathematical model which uses the concept of demand coverage and procedures based on genetic algorithm. The proposed model was applied at a hypothetical water distribution network with 4 water demand pattern. It was found that there is change in the optimal set of monitoring stations due to variation in the demand pattern throughout the day. Finally, the time of day that the water consumption pattern is the lowest, there was no coverage total of the demand network.

Key words: water quality, monitoring, water network, mathematical modelling

SOBRE O AUTOR PRINCIPAL

Roberto Suse: Engenheiro Ambiental graduado na Universidade Federal do Paraná, UFPR. Mestrando em Engenharia Civil, na Área de Saneamento e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, FEC-UNICAMP.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a sobrevivência humana. É insumo para a produção de alimentos e está presente em diversos processos industriais. Assim é importante que haja quantidade e qualidade de água adequada para o atendimento das necessidades dos diversos consumidores. Um sistema de distribuição de água, composto por tubulações, bombas, válvulas, tanques de armazenamento entre outros dispositivos e acessórios, é a unidade responsável por transportar água com qualidade e pressões adequadas aos consumidores finais.

A qualidade da água é importante para assegurar que a população não seja exposta a doenças de veiculação hídrica e para que não ocorra interferência nos processos industriais ou na produção de alimentos. Embora a água seja injetada no sistema de distribuição com qualidade adequada para garantir o atendimento dos padrões de potabilidade estabelecidos, há a deterioração de sua qualidade nas redes de distribuição. Ocorre diminuição da qualidade da água devido a vazamentos que abrem caminho para o aporte de patógenos, devido ao decaimento do desinfetante residual nos reservatórios e ao longo das tubulações e devido ao recrescimento bacteriano.

(Rossman, et al. 1994) mencionam que na maioria das estações de tratamento de água há o uso do agente químico cloro no processo de desinfecção. Os operadores das estações de tratamento tentam manter um residual de cloro nos sistemas de distribuição, mas como há a ocorrência de reação entre o cloro residual e os materiais presentes na água e nas paredes das tubulações, como consequência ocorre a diminuição da concentração do cloro residual. Assim, diversos pesquisadores mencionam que o desinfetante residual, como o cloro, pode ser considerado um parâmetro para avaliar a qualidade de água nas redes de distribuição.

O monitoramento da qualidade de água em toda a rede de distribuição é oneroso e inviável, pois uma rede de médio porte pode conter milhares de quilômetros de tubulações (Mays, 2000). Assim, na prática, o monitoramento é feito em poucos pontos nem sempre críticos sobre os aspectos da qualidade e com frequência discreta, de maneira a atender às portarias referentes à potabilidade da água.

Devido a estes fatos a modelagem matemática associada ao uso de programas computacionais tem sido empregada para simular os processos de transporte que descrevem a qualidade de água com a

finalidade de indicar os locais ideais para realizar o monitoramento de parâmetros hidráulicos e de qualidade de água nas redes de distribuição. A modelagem devidamente aplicada auxilia na tomada de decisões sobre estratégias operacionais e de monitoramento garantindo o transporte de água com qualidade adequada.

Portanto, este trabalho propõe avaliar um modelo matemático/computacional cuja finalidade é determinar locais ótimos para realizar o monitoramento da qualidade de água nas redes de distribuição de água potável.

O modelo proposto engloba o conceito de cobertura de demanda e procedimentos baseados em algoritmos genéticos que serão explanados a seguir.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há diversos modelos matemáticos com capacidade para realizar análises e simulações de sistemas de distribuição de água. (Lee e Deininger, 1992) mencionaram o termo "cobertura" para transmitir a noção de que locando uma estação de monitoramento em um ponto de consumo, é possível saber a qualidade de água e a demanda coberta por esta estação. Assim, tem-se a necessidade em conhecer a trajetória do fluxo de água, a vazão em cada trecho e a demanda dos pontos de consumo (nós da rede de distribuição).

Desta forma pode-se determinar a representatividade (em termos de porcentagem de cobertura) que um determinado nó possui sobre toda a rede de distribuição de água. Os autores citam que a partir da análise da qualidade de água de um nó amostrado, é possível inferir a qualidade de água dos nós a montante. "Se a qualidade de água do nó amostrado é boa, então pode-se afirmar que a qualidade de água dos nós a montante é boa".

Mas é extremamente importante que qualquer fração de água consumida em uma rede de distribuição seja "coberta" pelas estações de monitoramento. Por esta razão, para compreender o conceito cobertura de demanda é necessário seguir os seguintes procedimentos:

1. Definição da topologia do sistema a ser analisado;
2. Determinação da matriz de fração de água;
3. Determinação da matriz de cobertura;

Inicialmente é necessário definir a topologia rede de distribuição com demandas locais e determinar as vazões e o sentido do escoamento da água nas tubulações que constituem esta rede.

Por exemplo, os autores (Lee e Deininger, 1992) utilizaram a rede simples, ilustrada pela figura 1 para explicar o conceito de cobertura de demanda.

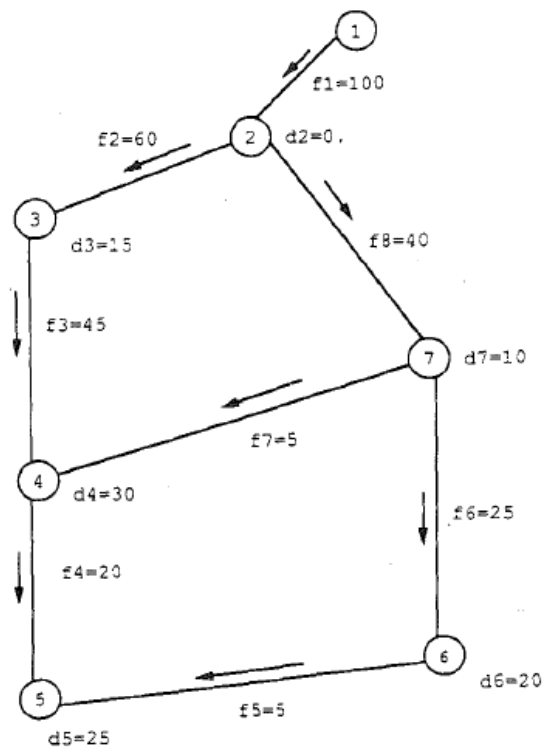


Figura 1. Exemplo de rede de distribuição de água.

Fonte: LEE e DEININGER, 1992.

Para a determinação da matriz de fração de água considera-se o número de nós (pontos de demanda local), as vazões nos trechos e as demandas. Assim, para o exemplo da figura 1 tomando o nó 5 uma estação de monitoramento e $P(i,j)$ a posição na matriz, a determinação da matriz de fração de água é realizada da seguinte forma:

$P(5,5) = 1$; $P(5,4) = 20/(20 + 5) = 0,8$; $P(5,6) = 0,2$;
 $P(5,3) = 0,8 \times 45/(45+5) = 0,72$; $P(5,7) = 0,8 \times 5/(45 + 5) + 0,2 = 0,28$; $P(5,2) = P(5,3) + P(5,7) = 1$;
 $P(5,1) = P(5,2) = 1$;

onde:

i = nó de amostragem (estação de monitoramento);

j = nó de montante (origem do escoamento da água);

Após a realização do cálculo para os outros nó de amostragem, os autores obtiveram a matriz de fração de água (Tabela 1).

Tabela 1. Matriz de fração de água do exemplo.

Nó de amostragem	Fração de água - nó de montante						
	nó1	nó2	nó3	nó4	nó5	nó6	nó7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	0,9	1	0	0	0,1
5	1	1	0,72	0,8	1	0,2	0,28
6	1	1	0	0	0	1	1
7	1	1	0	0	0	0	1

Fonte: LEE e DEININGER, 1992.

Supondo que o nó 5 seja a estação de monitoramento, a posição $P(5,3) = 0,72$ na tabela 1 significa que 72% da demanda do nó 3 é coberta pelo nó 5.

Para determinar qual nó de amostragem possui maior representatividade em uma rede, obtém-se a matriz de cobertura de demanda a partir da matriz de fração de água. Assim, é necessário a proposição de um critério relacionado à fração de água. (Lee e Deininger, 1992) adotaram a fração de água igual ou maior que 50% como critério para a determinação dessa matriz. Assim, as frações de água menores que 0,5 são convertidas para 0, e as frações de água iguais ou superiores a 0,5 são convertidas para 1. Desta forma, para o exemplo utilizado pelos autores, a matriz de cobertura de demanda obtida é a seguinte:

Tabela 2. Matriz de cobertura de demanda do exemplo.

Nó de Amostragem	Nós coberto sob critério 50%						
	nó1	nó2	nó3	nó4	nó5	nó6	nó7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	0	0
6	1	1	0	0	0	1	1
7	1	1	0	0	0	0	1

Fonte: LEE e DEININGER, 1992

Normalmente uma estação de monitoramento não é capaz de efetuar a cobertura de toda uma rede de distribuição de água. Por esta razão, é necessário

definir um conjunto de estações de monitoramento para obter 100% de cobertura da demanda de água de uma rede.

(Al-Zahrani e Moied, 2003) mencionam que o número de soluções possíveis para definir um conjunto de estações de monitoramento depende do número de estações e da quantidade de pontos de consumo (nós) existentes em rede de distribuição.

Por exemplo, para uma rede de distribuição contendo 100 nós e visando a alocação de 4 estações, o número de soluções possíveis para o conjunto de estações é igual a 100^4 ou 100 milhões.

Por esta razão, os autores recomendam a utilização de procedimentos baseados em algoritmo genético através das seguintes etapas:

1. População inicial;
2. Seleção dos pais;
 - 2.1 Ajuste inicial;
 - 2.2 Matriz de cobertura e demanda nodal;
3. Cruzamento;
4. Mutação;
5. Seleção das melhores características;
6. Seleção da solução ótima;

(Meier e Barkdoll, 2000) mencionam que o algoritmo genético pode ser considerado uma ferramenta com elevado potencial para otimizar a solução de problemas complexos que podem existir em redes de distribuição de água. Os autores dizem que não há garantia na obtenção da ótima resposta, mas, para a maioria dos problemas reais, pode se prover 95% de soluções melhores do que a utilização de métodos tradicionais.

A implementação do algoritmo genético inicia com a geração aleatória de soluções iniciais denominadas população inicial. Em seguida realiza-se a avaliação desta população pela aplicação da função objetivo mecanismos de solução permite a manutenção dos indivíduos mais aptos para as próximas gerações.

Os autores afirmam que as soluções iniciais selecionadas raramente contêm a solução ótima. Por esta razão prossegue com o uso do operador cruzamento que realiza combinações entre as soluções com a finalidade de garantir que as gerações futuras possuam o maior grau de ajuste contido na população selecionada. Como o cruzamento é uma simples recombinação que pode não incluir informações desejáveis da população inicial, utiliza-se em conjunto o operador mutação o

qual efetua ocasionalmente alterações aleatórias para incluir novas informações ou recuperar desejáveis características que serão propagadas para as gerações posteriores. Como essa propagação ocorre exponencialmente de geração para geração seguinte tem-se a seleção da melhor solução possível após um número n de iterações (definida pelo usuário).

Os autores afirmam que a melhor solução pode não conter o ótimo ajuste mas pode ser considerada melhor do que as soluções iniciais ou soluções obtidas por métodos menos robustos.

METODOLOGIA

Para avaliar a aplicabilidade do modelo matemático-computacional com o objetivo de indicar ótimos locais para monitorar a qualidade de água nas redes de distribuição de água potável, foi utilizado uma rede hipotética de distribuição de água (figura 2).

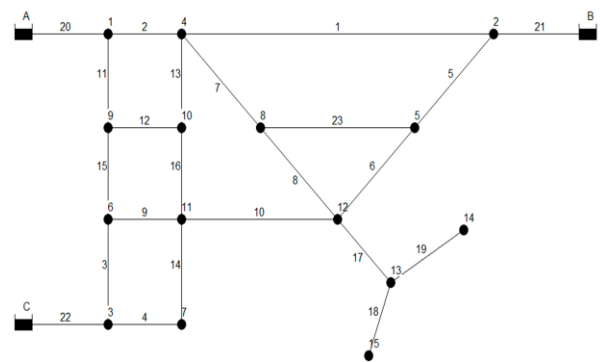


Figura 2. Rede hipotética de distribuição de água.

Fonte: AL-ZAHRANI e MOIED, 2003.

Esta rede possui três reservatórios de abastecimento, 15 pontos de consumo e 23 tubulações. Foi realizada a simulação hidráulica da rede através do software EPANET 2.0 considerando a variação do consumo de água em um período igual a 24 horas (Figura 3).

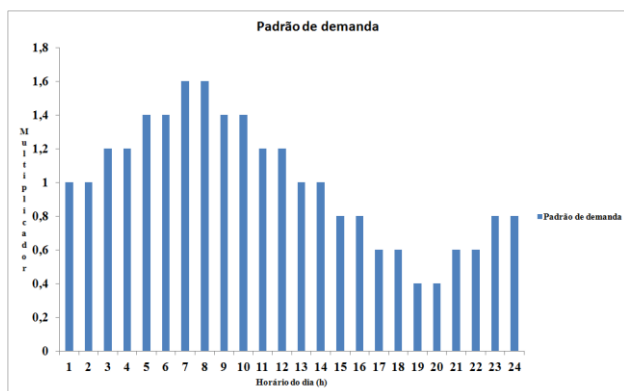


FIGURA 3. Variação da demanda na rede hipotética de distribuição de água.

Foi realizada a simulação hidráulica da rede hipotética para 4 cenários que se diferenciam pelo seguinte padrão de demanda:

cenário 1 = demanda média x 1,6(7 e 8 horas);

cenário 2 = demanda média x 1,2(3,4,11 e 12 horas);

cenário 3 = demanda média x 0,8(15 e 16 horas);

cenário 4 = demanda média x 0,4(19 e 20 horas);

Para determinar o conjunto ótimo de estações de monitoramento através da aplicação dos procedimentos baseados em algoritmo genético, foi utilizado o software MATLAB R2013a. A função objetivo utilizada foi a soma das demanda dos nós coberto pelo conjunto de 4 estações de monitoramento. Além disso, foi utilizado os seguintes parâmetros no algoritmo genético:

número de gerações = 45;

número de nós de monitoramento = 4;

número de indivíduos da população = 20;

probabilidade de ocorre mutação = 0,07;

critério para a obtenção da matriz de cobertura = 50%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cenário 1

Quando a demanda média é multiplicada por 1,6, o conjunto de estações de monitoramento com maior cobertura de demanda da rede foi composto pelos nós 7, 8 11 e 15 (conjunto 1). A demanda total da rede foi de 664 Litros/s e a demanda coberta pelo conjunto 1 foi de 568 Litros/s.

Cenário 2

Para demanda média multiplicada por 1,2, o conjunto de estações de monitoramento com maior cobertura de demanda foi composto pelos nós 6, 7, 11 e 15 (conjunto 2). A demanda total da rede foi de 498 Litros/s e a demanda coberta pelo conjunto 2 foi de 378 Litros/s.

Cenário 3

Já no horário em que a demanda média é multiplicada por 0,8, o conjunto de estações de monitoramento com maior cobertura de demanda era composto pelos nós 3, 5, 11 e 15 (conjunto 3). A demanda total da rede foi de 332 Litros/s e a demanda coberta pelo conjunto 3 foi de 284 Litros/s.

Cenário 4

E no horário com o menor padrão de demanda (0,8), que representa o período em que há o menor consumo de água em um dia, o conjunto de estações de monitoramento com maior cobertura foi composto pelos nós 3, 6, 11 e 15 (conjunto 4). A demanda total da rede foi de 166 Litros/s e a demanda coberta pelo conjunto 4 foi de 132 Litros/s.

A tabela 3 é a síntese dos resultados obtidos após a simulação hidráulica da rede hipotética de distribuição de água (figura 2.) e a aplicação dos procedimentos baseados em algoritmo genético para a obtenção do conjunto de estações de monitoramento com maior cobertura da rede.

TABELA 3. Demanda coberta pelo conjunto de estações de monitoramento.

Conjunto de estações de monitoramento	Padrão de demanda	Demanda total rede (Litros/s)	Demanda coberta pelo conjunto (Litro/s)
1	1,6	664	568
2	1,2	498	378
3	0,8	332	284
4	0,4	166	132

Considerando as colunas 3 e 4 da tabela 3, é possível determinar a porcentagem de cobertura da rede que cada conjunto de estações de monitoramento realiza. Assim, o conjunto 1 realiza a cobertura de 85,54%, o

conjunto 2 realiza a cobertura de 75,90%, o conjunto 3 realiza a cobertura de 85,54% e o conjunto 4 realiza a cobertura de 79,52% da rede hipotética de distribuição de água.

Verifica-se que ocorre variação da composição do conjunto ótimo de estações de monitoramento de acordo com a variação da demanda existente ao longo do dia. A variação da demanda ao longo do dia pode influenciar na mudança do sentido do escoamento da água nas redes de distribuição. Por esta razão, o modelo matemático-computacional indicou outros conjunto ótimos de estações de monitoramento.

Percebe-se que as estações 11 e 15 podem ser consideradas ótimos locais para a realização do monitoramento da qualidade de água. Estas estações são independente da variação da demanda. Como o ponto de consumo nó 15 é considerada ponta de rede e possui demanda local diferente de zero, comprova-se a hipótese de que as pontas de rede são comumente ótimos locais para a realização do monitoramento da qualidade de água.

Além disso, observa-se que todos os conjuntos de estações de monitoramento não realizam a cobertura de 100% da rede hipotética de distribuição de água.

Então, foi realizada a aplicação do modelo matemático-computacional para um conjunto composto por 6 estações de monitoramento. Para o cenário 1, o conjunto ótimo determinado foi composto pelas estações 6, 7, 8, 9, 11 e 15. Para o cenário 2, o conjunto ótimo foi composto pelas estações 5, 6, 7, 8, 11 e 15. Já para o cenário 3, as estações 3, 5, 7, 9, 11 e 15 formavam o conjunto ótimo para monitorar a rede hipotética. Por fim, no cenário 4, o conjunto ótimo determinado foi composto pelas estações 3, 5, 6, 7, 11 e 15. Para os cenários 1, 2 e 3, os conjuntos ótimo compostos por 6 estações de monitoramento faziam 100% da cobertura da rede. Somente para o cenário 4, o qual representa a hora do dia em que há o menor consumo de água, o conjunto ótimo determinado realizava a cobertura de 93,98% da rede.

Após a aplicação do modelo matemático-computacional para todos os cenários construídos, observou-se a convergência das soluções para um número de gerações igual a 45 e critério de cobertura de demanda igual a 50%. Essa convergência pode ser confirmada através das figuras 4 e 5.

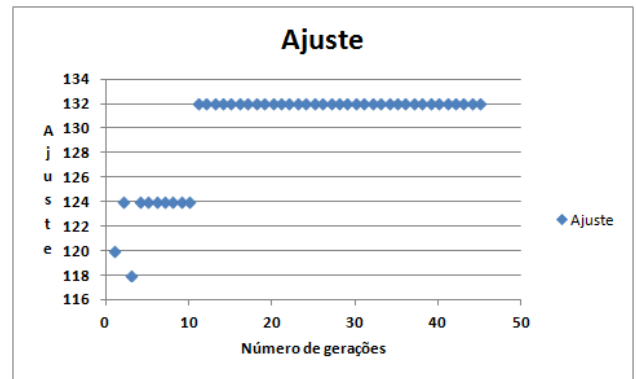


FIGURA 4. Função de ajuste obtida para o cenário 4.

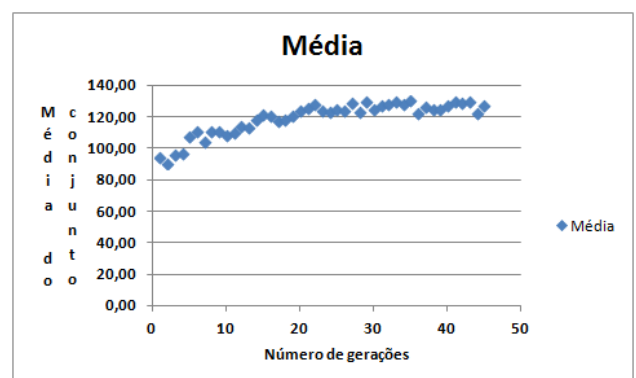


FIGURA 5. Média da função objetivo para o cenário 4.

CONCLUSÃO

O modelo matemático-computacional que considera o conceito de cobertura de demanda e utiliza procedimentos baseados em algoritmo genético foi capaz de indicar os ótimos locais para realizar o monitoramento da qualidade de água em uma rede de distribuição de água potável.

Foi observado que um conjunto composto por 6 estações de monitoramento realizava 100% da cobertura da rede hipotética de distribuição de água, exceto para o horário em que o consumo de água foi menor (0,4). Por esta razão, o horário do dia em que o consumo de água é o menor pode ser considerado como um momento crítico para realizar o monitoramento da qualidade.

Cabe observar que não foi necessário realizar uma quantidade elevada de iterações para obter a convergência das soluções obtidas.

Portanto, conclui-se que o modelo matemático-computacional avaliado pode ser considerado uma

ferramenta útil para auxiliar no monitoramento de redes de distribuição de água potável.

RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizada a simulação hidráulica de uma rede hipotética simples sendo necessário verificar a viabilidade do modelo matemático-computacional proposto a redes.

BIBLIOGRAFIA

- Al-Zahrani, M. A. e Moied, K. (2003). "Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms". The Arabian Journal for Science and Engineering, 28, 1B, pp. 57-75.
- Hirose, H. (2010). Localização ótima de estações de monitoramento de qualidade da água em redes de distribuição baseada em algoritmo genético. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Kumar, K.; Kansal, M. L.; Arora, G. (1997). "Identification of monitoring stations in water distribution system". Journal of Environmental Engineering, 123, pp. 746-752.
- Lee, B. H. e Deininger, R. A. (1992). "Optimal locations of monitoring stations in water distribution system". Journal of Environmental Engineering, 118, pp. 4-16.
- Mays, L. W. (2000). Water distribution system handbook. New York: McGraw-Hill.
- Meier, R. W.; Barkdoll, B. D. (2000). "Sampling design for network model calibration using genetic algorithms". Journal of Water Research, Planning and Management, 126, pp. 245-250.
- Rossman, L. A.; Clark, R. M., Grayman, W. M. (1994). "Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems". Journal of Environmental Engineering, 120, pp.803-820.
- Trimboli, M. J. (2006). Aplicação e análise de um modelo de qualidade de água para a determinação da concentração de cloro livre residual em um setor de abastecimento de água. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.