

I-308 - USO DO OTIMIZADOR TEVA-SPOT PARA DETERMINAR OS PONTOS DE MONITORAMENTO DE CLORO RESIDUAL NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE PRADO FERREIRA-PR

Rebeca Silva Rocha⁽¹⁾

Engenheira Civil do Consórcio Municipal de Saneamento do Paraná (CISPAR) e Mestranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Estadual do Paraná.

Sandro Rogério Lautenschlager⁽²⁾

Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana.

Endereço⁽¹⁾: Rua Pioneiro Miguel Jordão Martinez, 677 – Parque Industrial Mário Bulhões da Fonseca - Maringá - Paraná - CEP: 87065-660 - Brasil - Tel: +55 (44) 3262-5121 - e-mail: engrebecarocha@gmail.com.

RESUMO

Neste estudo, um método de análise de rede, é usado para determinar locais ótimos para alocar os sensores inteligentes de cloro residual livre. Por meio do otimizador TEVA SPOT O algoritmo Heurístico GRASP foi utilizado para indicar a melhor localização de sensores de cloro para monitoramento de cloro residual livre. A função objetivo considerada neste estudo foi a menor parcela da população atingida por concentrações acima dos padrões previstos pela Portaria do Ministério da Saúde 2.914 de 2011, o fator limitante foi a disponibilidade reduzida de dois sensores para instalação na rede. Conclui-se que a maior parte dos incidentes resultou em menos de 1% da população sendo impactada, houve 75 incidentes que impactaram mais de 20 pessoas. Em todos os 138 incidentes, em média, 19 pessoas ficariam doentes, com uma mediana de 22 pessoas e um máximo de 31 pessoas, a contaminação com máximo de atingidos se deu a partir da injeção de contaminante no nó 81. O comprimento médio de tubo contaminado foi de 464 metros com uma mediana de 859 metros. A localização dos sensores que melhor minimiza a média da população exposta, em um tempo de resposta inferior a 1 minuto, são os nós 7 e 13.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de alerta de contaminação, otimização de locação de sensores, monitoramento da qualidade da água.

INTRODUÇÃO

O monitoramento dos padrões de qualidade da água para consumo humano é exigência legal e fator diretamente ligado à saúde da população. Segundo dados da Organização Mundial da Saúde - OMS (2011), milhões de pessoas morrem a cada ano de doenças transmitidas pela água, em sua maioria, crianças com idades inferiores a cinco anos. Estas doenças podem ser prevenidas melhorando a cobertura e a qualidade dos serviços de saneamento.

Os sistemas de distribuição de água, por sua característica de layout espalhada pela planta do município, são vulneráveis à contaminação acidental ocasionada por vazamentos em tubulações e mudanças de comportamento hidráulico da rede Yoo et al. (2015), ou intencional Hart e Murray (2010), uma forma de detecção de anomalias na qualidade da água da rede de distribuição é a instalação de pontos de controle de qualidade Berry et al. (2006a), estes pontos podem ser equipados com medidores de vazão, pressão e de parâmetros como concentração de cloro residual, pH, condutividade e também através de programas de amostragem de rotina.

Segundo Rathi e Gupta (2016), sensores em redes de distribuição de água servem principalmente para garantir a qualidade da água entregue aos consumidores e detectar precocemente eventos de contaminação de modo a minimizar suas consequências.

Um elemento chave no projeto de controle de qualidade é o posicionamento dos sensores (Hart & Murray, 2010). Evitar todos os incidentes de contaminação geralmente não é possível, conseqüentemente, o objetivo geral da colocação do sensor é minimizar os riscos de contaminação sobre a condição limitada de disponibilidade de sensores (Berry et al., 2006b). Para Hart e Murray (2010), a opinião de especialistas em sistemas de abastecimento de água,

métodos de classificação como disponibilidade de energia elétrica e informações espaciais e métodos de otimização são categorias que refletem diferenças importantes nas estratégias de decisão sobre a localização de instalação de sensores.

A colocação de sensores pode ser automatizada com métodos que buscam computacionalmente um projeto de rede de sensores que minimize riscos de contaminação. Os métodos atuais usam modelos hidráulico e de qualidade de água associado a um método de otimização.

Problemas de otimização que envolvam finitas alternativas surgem frequentemente na indústria, governo e ciência. Exemplos comuns incluem a criação de redes de telecomunicações eficientes, a programação de operações em uma fábrica, o planejamento de um zoneamento escolar eficaz, a localização de reservas estratégicas de energia, o encaminhamento de veículos de entrega, a implantação de tropas, Em todos estes exemplos, teoricamente é possível enumerar todas as combinações de soluções e avaliar cada uma em relação a um objetivo (Feo e Resende, 1995).

A limitação dos estudos de localização de sensores é a concentração na injeção planejada dos contaminantes, o que difere dos meios de ocorrência de contaminação encontrados em campo. Os incidentes de contaminação geralmente ocorrem por mudanças hidráulicas, mau funcionamento de válvulas ou mudanças aleatórias de demanda. Outro fator limitante é a utilização do método de simulação em período estendido, este método considera os padrões de demanda de água passados como referencia, como cada padrão é usado para um dia ou uma semana de cada vez de uma ocorrência futura, as combinações e incertezas das grandes mudanças na demanda não são incluídas Yoo et al. (2015).

A utilização de modelos de rede simplificados nos métodos de otimização, apesar de deixar de capturar importantes dinâmicas transitórias, se dá pelo fato de quão dispendioso seria aplicar métodos de otimização genéricos, como algoritmos evolutivos. A simplificação dos modelos de rede é uma estratégia para gerenciar dados de simulação que podem assim ser usados por diversos métodos de otimização. O software TEVA-SPOT integra otimizadores que empregam esta abordagem (Berry et al., 2008, Berry et al., 2007, Berry et al. 2006a, Berry et al. 2006b, Hart et al., 2008, Murray et al., 2006, Watson et al., 2005).

O software dispõe de seis objetivos de desempenho: população exposta (PE), extensão da contaminação (EC), volume consumido (VC), massa consumida (MC), número de detecções fracassadas (NFD), tempo de detecção (TD) e população doseada (PD). O TEVA-SPOT funciona simulando incidentes de contaminação em um conjunto de nós na rede especificada pelo usuário. Na prática o otimizador calcula o objetivo de desempenho para cada incidente e, em seguida, encontra um único sensor que melhor minimizará a média do objetivo de desempenho em todos os incidentes (Murray et al., 2010).

Neste estudo, um método de análise de rede, é usado para determinar locais ótimos para alocar os sensores. Por meio do otimizador TEVA SPOT O algoritmo Heurístico GRASP foi utilizado para indicar a melhor localização de sensores de cloro para monitoramento de cloro residual livre. A função objetivo considerada neste estudo foi a menor parcela da população atingida por concentrações acima dos padrões previstos pela Portaria do Ministério da Saúde 2.914 de 2011, o fator limitante foi a disponibilidade reduzida de dois sensores para instalação na rede.

O OTIMIZADOR TEVA-SPOT

A análise de risco tem sido utilizada por áreas distintas de gestão como, por exemplo, militar, projetos, equipamentos e gestão de infraestruturas para verificação dos pontos críticos que possam vir a apresentar não conformidades. Dentro da análise de risco, a análise da vulnerabilidade do Sistema de Abastecimento de Água consiste na determinação da probabilidade da ocorrência de ataque ou contaminação. Trata-se de analisar as capacidades de segurança, contramedidas e estratégias de mitigação e sua eficácia na redução da probabilidade de uma contaminação acidental ou provocada.

Países vítimas de ataque terrorista, como os Estados Unidos da América, para auxiliar na determinação da vulnerabilidade dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), principalmente após os ataques terroristas de 11 de Setembro, desenvolveram ferramentas e metodologias que incluem Auto Avaliação de Vulnerabilidade e Sistema de Emergência em Segurança (AWWARF et al, 2002; AMSA, 2003; NRW, 2003).

As ferramentas de avaliação de vulnerabilidade baseiam-se em seis funções objetivo, quais sejam:

- Caracterização do SAA abordando missão, objetivos, instalações e operações.
- Identificação de consequências adversas potenciais e priorização da qualidade da água, saúde pública e impactos econômicos.
- Determinação de ativos críticos.
- Avaliação da probabilidade de atentados em parceria com a aplicação da lei.
- Avaliação das contramedidas existentes.
- Análise de risco e desenvolvimento de um plano de redução de risco (US EPA 2002b).

Um estudo sobre o emprego das metodologias de avaliação da vulnerabilidade (AV) do SAA, em cidades que atendem menos de 3.000 ligações, foi conduzido por Staudinger et al. (2006) por meio de comparativo entre a ferramenta em questão e a AV da Environmental Protection Agency (EPA) utilizando para tanto o Sistema de Modelagem Gráfica Expendida, capaz de ajudar na identificação de riscos a partir de gráficos que compilam informações. Os resultados mostraram que nenhuma das ferramentas avaliadas estava em total acordo com as diretrizes de avaliação de vulnerabilidade da EPA.

Com objetivo de desenvolver um método que atendesse as diretrizes do EPA e abordasse a infraestrutura de maneira ampla e geral, foi desenvolvido o Modelo de Avaliação de Risco para Proteção de Ativo Crítico constituído de caracterização e triagem de ativos, caracterização de ameaças, análise de consequências, análise de vulnerabilidade, avaliação da ameaça, avaliação de risco e gestão de risco (ASME-ITI 2005). Entretanto, a EPA concluiu que nem suas próprias metodologias nem as diferentes metodologias de AV enfatizaram adequadamente as ameaças do SAA (US EPA, 2003).

Os sistemas de distribuição podem ser contaminados durante o curso de operações normais por metais, contaminantes orgânicos e materiais de tubulação e pode penetrar no sistema (U.S. EPA 2002a). Além disso, a perda de pressão persistente ou transitória pode resultar na entrada de produtos químicos, provenientes do solo contaminado, através de rupturas de tubos ou vazamento de juntas (MURRAY et al, 2010).

Uma forma de detecção de anomalias na qualidade da água da rede de distribuição é a instalação de pontos de controle de qualidade Berry et al. (2006a), estes pontos podem ser equipados com medidores de vazão, pressão e de parâmetros como concentração de cloro residual, pH, condutividade e também através de programas de amostragem de rotina.

Segundo Rath e Gupta (2016), sensores em redes de distribuição de água servem principalmente para garantir a qualidade da água entregue aos consumidores e detectar precocemente eventos de contaminação de modo a minimizar suas consequências.

Um elemento chave no projeto de controle é o posicionamento dos sensores (Hart & Murray, 2010). Evitar todos os incidentes de contaminação geralmente não é possível, conseqüentemente, o objetivo geral da colocação do sensor é minimizar os riscos de contaminação sobre a condição limitada de disponibilidade de sensores (Berry et al., 2006b).

Para Hart e Murray (2010), a opinião de especialistas em sistemas de abastecimento de água, métodos de classificação como disponibilidade de energia elétrica e informações espaciais e métodos de otimização são categorias que refletem diferenças importantes nas estratégias de decisão sobre a localização de instalação de sensores. A colocação de sensores pode ser automatizada com métodos de otimização que buscam um projeto de rede de sensores que minimize riscos de contaminação. Os métodos atuais usam modelos hidráulico e de qualidade de água associado a um método de otimização.

Neste sentido, em Murray et al (2010), para atender a uma modelagem dinâmica, que permita uma visão integrada da vulnerabilidade de um sistema, para uma combinação de ameaças de contaminação e o potencial para diminuir essa vulnerabilidade por meio de um conjunto de estratégias de mitigação, a EPA e seus colaboradores desenvolveram um quadro probabilístico para analisar a vulnerabilidade dos sistemas de distribuição de água potável chamado Threat Ensemble Vulnerability Assessment (TEVA).

A Tabela 1 mostra a correspondência entre os elementos básicos da Avaliação de Vulnerabilidade do EPA e os elementos do TEVA.

Tabela 1 – Elementos correspondentes entre os seis elementos básicos da Avaliação de Vulnerabilidade e o TEVA

Elementos básicos da VA	Elementos do TEVA
Caracterização do SAA	Simulação de Incidentes (desenvolvimento do modelo de rede EPANET)
Identificar e priorizar impactos adversos	Simulação da Avaliação de Consequências de Incidentes
Identificar ativos críticos	Avaliação de consequências
Avaliar a probabilidade de impactos adversos	Simulação de Incidentes
Avaliação de contramedidas existentes	Análise de Mitigação de Ameaças
Desenvolver plano ou ações de redução de risco	Análise de Mitigação de Ameaças

FONTE: Murray et al (2010)

O software TEVA SPOT foi desenvolvido com o objetivo de otimizar a escolha da locação de sensores on-line que monitoram a qualidade da água em redes de abastecimento de água. A decisão de onde se instalar os sensores é um problema multi-objetivo que leva em consideração, por exemplo, minimizar a exposição pública aos contaminantes, a extensão espacial da contaminação, o tempo de detecção ou os custos (Murray et al., 2006).

O software consiste de três módulos principais, o primeiro módulo simula o conjunto de incidentes no conjunto de ameaças, o segundo módulo de calcula as consequências potenciais dos incidentes de contaminação contidos no conjunto de ameaça e o terceiro módulo otimiza a locação do sensor.

As funções objetivo que podem ter os impactos minimizados através da modelagem e simulação são:

- O número de pessoas que ficam doentes por exposição a um contaminante
- A percentagem de incidentes detectados
- O tempo de detecção
- O comprimento do tubo contaminado (Murray et al., 2010)

Para Murray et al., 2010, um problema p-mediano no TEVA-SPOT tem três otimizadores capazes de solucioná-lo: a programação de inteiros mistos (MIP), a heurística do procedimento de busca adaptável aleatória (GRASP) e um método de relaxamento lagrangiano. Os métodos diferem em tempo de execução, memória do computador necessária e a garantia fornecida para a qualidade da solução. O problema das p-medianas é um problema clássico de localização de facilidades e consistem em localizar facilidades (medianas) em uma rede de modo a minimizar a soma total das distâncias de cada nó de demanda à sua mediana mais próxima (Lorena et al., 1999).

Segundo Santos et al., 2011, os problemas de localização consistem em selecionar, de um conjunto finito de dados, o melhor subconjunto que satisfaça determinados critérios, o que os caracteriza como de natureza combinatória. Muitos problemas de otimização combinatória são considerados altamente complexos e de custo elevado do ponto de vista computacional.

Para tanto, o GRASP, produz soluções que são globalmente ótimas. Resultados demonstram de forma conclusiva a aplicação prática desta heurística para resolver problemas de colocação de sensores em redes de até 12.000 nós (Watson et al., 2005).

Segundo Feo e Resende (1995), GRASP é uma heurística de múltiplas partidas, na qual cada iteração consiste de duas fases: construção e busca local. Na fase construtiva cria-se uma solução viável utilizando-se um algoritmo guloso aleatorizado, cuja vizinhança é explorada até um ótimo local ser encontrado na etapa de busca local. A melhor entre todas as soluções é retornada como resultado. A figura 1 apresenta um pseudocódigo para heurística GRASP.

```
Procedimento GRASP ( Num_inter)
MelhorFinal ← ∞
Para t ← até Num_int faça
    SolucaoIncial ← ConstrutivoAleatorioGuloso;
    MelhorSolucao ← AplicaBuscaLocal (SolucaoIncial);
    Se MelhorSolucao < MelhorFinal então
        MelhorFinal ← MelhorSolucao;
    fim-se;
fim-para;
Retona MelhorFinal;
```

Figura 1: Pseudocódigo GRASP
FONTE: Feo e Resende (1995)

O código representa como parâmetro de entrada o número de iterações GRASP a serem executadas. Durante todas as iterações, uma solução inicial é construída por um método guloso aleatorizado, ao qual é refinada por um método de busca local na linha. É verificado se a solução encontrada é a melhor solução até o momento. Sendo retornada a melhor solução encontrada (Santos et al., 2011).

OBJETIVO

Indicar localização ótima para instalação de dois sensores de cloro para monitorar o cloro residual livre por meio do software TEVA-SPOT minimizando a menor parcela da população atingida por concentrações acima dos padrões previstos pela Portaria do Ministério da Saúde 2.914 de 2011.

Objetivos Específicos

- Modelar a rede de abastecimento de água do município de Prado Ferreira-PR no software EPANET
- Modelar a rede de abastecimento de água do município de Prado Ferreira-PR no software otimizador TEVA-SPOT
- Indicar a localização ótima para instalação de sensores para monitoramento de cloro residual livre

METODOLOGIA

O sistema de abastecimento simulado é composto por um reservatório elevado com capacidade de 100m³, a rede de distribuição tem extensão de aproximadamente 25750 m e 138 nós, os diâmetros das tubulações variam de 50 mm a 150 mm. O sistema abastece a cidade de Prado Ferreira-PR, a população total atendida é 3.157, correspondendo a 1.257 ligações ativas de água segundo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (2014), o volume de água micromedido em 2014 foi 205.690 m³, o que corresponde ao consumo per capta de 271,4 litros por habitante por dia.

Para o cálculo do consumo base a ser inserido no EPANET, considerou-se o número de lotes de cada quadra. Para cada residência considerou-se 3,29 moradores, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), e o consumo foi distribuídos entre os nós multiplicando-se o número de lotes de cada quadra pelo número médio de moradores de cada residência e pelo consumo de cada habitante, o resultado obtido foi dividido igualmente entre os nós da quadra respectiva. Observou-se a existência de uma igreja, uma escola e um nó com consumo concentrado que abastece um loteamento com aproximadamente 500 unidades habitacionais.

Processo de modelagem no TEVA-SPOT

Foi simulado que uma quantidade de cloro é injetado durante um período de 1 hora começando ao meio dia com uma taxa de 480 mg/min. A localização do ataque não é conhecida, portanto, cada local no modelo é considerado uma possível fonte. Assim, 138 nós foram considerados pontos de entrada potenciais, resultando em um total de 138 incidentes de contaminação na ameaça de base de projeto.

Os impactos na saúde pública que podem resultar de um incidente de contaminação são a maior prioridade e, portanto, a medida de desempenho selecionada é o número de pessoas que ficam doentes por exposição a um contaminante.

Presume-se que levaria 24 horas para a utilidade responder eficazmente a uma detecção positiva. A função objetiva escolhida foi o impacto em termos do número de pessoas atingidas por concentrações de cloro acima ou abaixo do estipulado pela Portaria do Ministério da Saúde número 2.940. Os resultados desta análise foram armazenados em um arquivo de saída para análise posterior. A quantidade de sensores considerada disponível para utilização foram dois sensores.

RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Uma variedade de medidas de impacto é usada para comparar e contrastar projetos de redes de sensores, na Figura 1 mostra-se a distribuição de pessoas atendidas por nó.

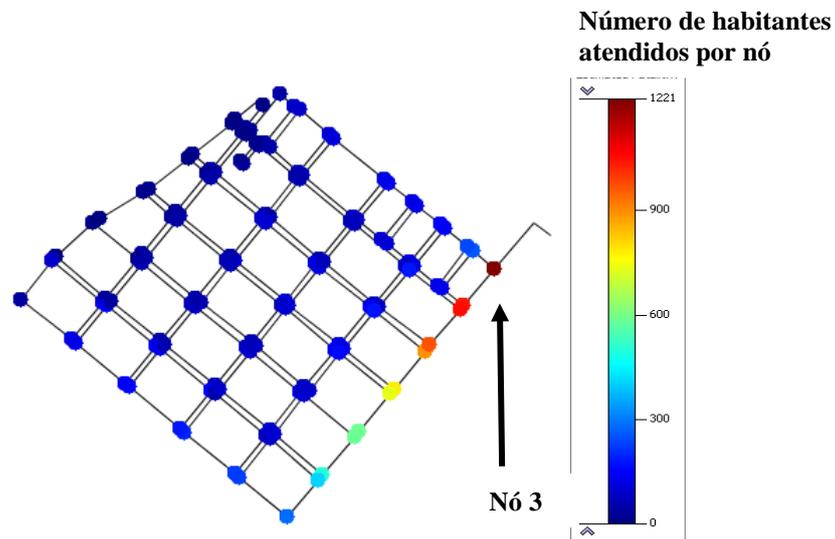


Figura 1 – Distribuição do número de pessoas atendidas por nó

O nó 3 atende aproximadamente 1200 pessoas, para cada um dos 138 incidentes que foram simulados, os impactos na saúde pública foram calculados considerando a concentração de cloro residual na rede. Na Figura 2 apresenta-se a fonte por meio da qual um maior número de pessoas está susceptível a ingerir dose acima do padrão por local de injeção do contaminante.

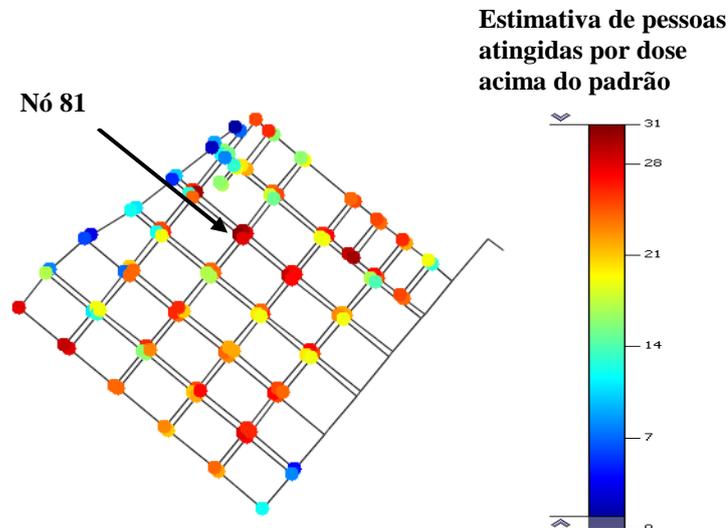


Figura 2 – Estimativa da população atingida por dose acima do padrão por local de injeção do contaminante

A maioria dos incidentes de concentração de cloro residual livre acima do padrão resultou em menos de 1% da população sendo impactada, mas houve 75 incidentes que impactaram mais de 20 pessoas. Em todos os 138 incidentes, em média, 19 pessoas ficariam doentes, com uma mediana de 22 pessoas e um máximo de 31 pessoas, a contaminação com máximo de atingidos se deu a partir do nó 81. Da mesma forma, o comprimento médio de tubo contaminado foi de 464 metros com uma mediana de 859 metros. Conhecer o comprimento dos tubos que ficam contaminados durante um incidente é essencial para efetivamente descontaminar o sistema e devolvê-lo ao serviço.

Os valores médios podem ser interpretados da seguinte maneira: aleatoriamente um local a partir do qual para introduzir o contaminante químico, pode-se esperar que 19 pessoas ficariam doentes e 464 metros de tubulação seria contaminada, em um universo de 3.157 habitantes atendidos por fornecimento de água.

A indicação de local para instalação de sensores, com o objetivo de detectar doses acima do padrão para cloro residual livre, com o objetivo de diminuir o número de pessoas atingidas com tempo de resposta inferior a um minuto pode ser observado na Figura 3.

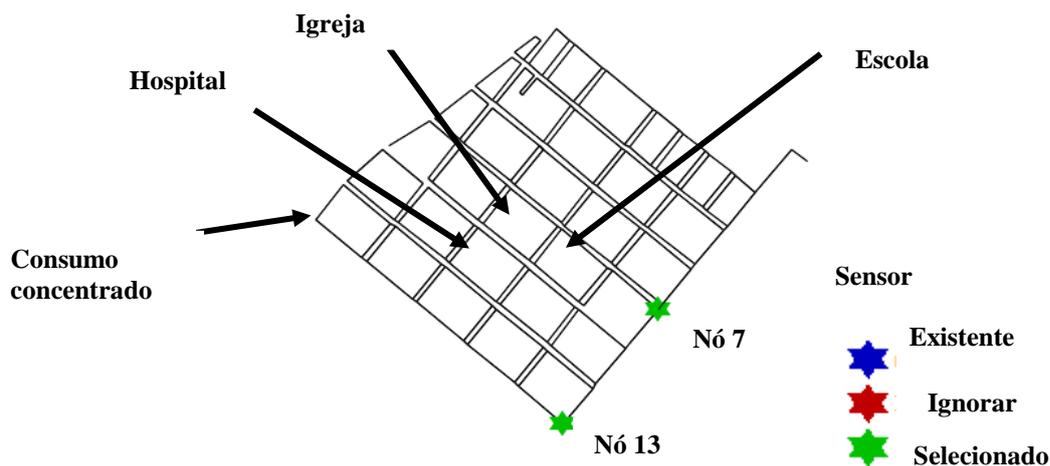


Figura 3 – Localização do sensor para minimizar a média de população exposta a doses acima de 2,00mg

Ao selecionar a localização dos sensores com o objetivo de minimizar a população exposta (PE) a um contaminante, os locais provavelmente serão selecionados em áreas da rede que detectem incidentes que afetam o maior número de pessoas. Neste caso, a localização dos sensores que melhor minimiza PE, em um tempo de resposta inferior a 1 minuto, são os nós 7 e 13. São nós a montante dos nós com a maior demanda pelos usuários. Assim, estes sensores detectam todos os incidentes que estão ao longo do caminho de fluxo para o maior nó de demanda.

CONCLUSÕES

A maior parte dos incidentes onde houve ingestão de cloro acima de 2mg resultou em menos de 1% da população sendo impactada, houve 75 incidentes que impactaram mais de 20 pessoas. Em todos os 138 incidentes, em média, 19 pessoas ficariam doentes, com uma mediana de 22 pessoas e um máximo de 31 pessoas, a contaminação com máximo de atingidos se deu a partir da injeção de contaminante no nó 81. O comprimento médio de tubo contaminado foi de 464 metros com uma mediana de 859 metros. Conhecer o comprimento dos tubos que ficam contaminados durante um incidente é essencial para descontaminar o sistema e devolvê-lo ao serviço. A localização dos sensores que melhor minimiza a média da população exposta, em um tempo de resposta inferior a 1 minuto, são os nós 7 e 13.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 20^a ed. United States of América. American Public Health Association, 2005.
2. Berry, J., Boman, E., Phillips, C. A., & Riesen, L. (2008). Low-memory Lagrangian relaxation methods for sensor placement in municipal water networks. In Proc. World Water Environ. Resources Congress, Honolulu, May (pp. 12-16).
3. Berry, J. W., Carr, R. D., Hart, W. E., & Phillips, C. A. (2007). Scalable water network sensor placement via aggregation. In Proc. World Water and Environmental Resources Conference.
4. Berry, J., Carr, R. D., Hart, W. E., Leung, V. J., Phillips, C. A., & Watson, J. P. (2006a). On the placement of imperfect sensors in municipal water networks. In Proc. World Water and Environment Resources Conference, Cincinnati, Ohio.
5. Berry, J., Hart, W. E., Phillips, C. A., Uber, J. G., & Watson, J. P. (2006b). Sensor placement in municipal water networks with temporal integer programming models. *Journal of water resources planning and management*, 132(4), 218-224.
6. Feo, T.A. AND Resende, M.G.C. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, v.6, p.109-133.
7. Hart, W. E., & Murray, R. (2010). Review of sensor placement strategies for contamination warning systems in drinking water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(6), 611-619.
8. Hart, W. E., Berry, J. W., Boman, E., Phillips, C. A., Riesen, L. A., and Watson, J-P. (2008). Limited-memory techniques for sensor placement in water distribution networks. *Learning and Intelligent Optimization. Second International Conference, LION 2007 II. Selected Papers*, 5313, 125–137.
9. Lorena, L. A. N., Senne, E. L. F., Paiva, J. D. C., & Marcondes, S. P. B. (1999). Integração de um Modelo de p-Mediana a Sistemas de Informações Geográficas. In 31^o Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Juiz de Fora, MG. Anais. Rio de Janeiro, RJ: SOBRAPO, 635-647.
10. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria MS nº 2914, de 12/12/2011.: Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2011.
11. Murray, R., Haxton, T., Janke, R., Hart, W. E., Berry, J., & Phillips, C. (2010). Sensor network design for drinking water contamination warning systems: A compendium of research results and case studies using the TEVA-SPOT software. National Homeland Security Research Center, US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, CINCINNATI, OH, USA
12. Murray, R., Hart, W., and Berry, J. (2006). Sensor network design for contamination warning systems: tool and applications. Proc., AWWA Water Security Conference, AWWA, Denver, CO.
13. Rathi, S., & Gupta, R. (2016). A simple sensor placement approach for regular monitoring and contamination detection in water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(2), 597-608.
14. Rossman, L. A. (2000). EPANET 2: User's Manual.
15. Yoo, D. G., Chung, G., Sadollah, A., & Kim, J. H. (2015). Applications of network analysis and multi-objective genetic algorithm for selecting optimal water quality sensor locations in water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(7), 2333-2344.
16. Watson, J-P., Hart, W. E., and Berry, J. (2005). Scalable high-performance heuristic for sensor placement in water distribution networks. Proc., World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, Reston, VA.
17. Santos, T. de A.; Vianna, D. S.; Vianna M. de F. D.(2011). Heurística GRASP para o problema de p-mediana aplicado à localização de concentradores. *VÉRTICES*, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 13, n. 3, p. 31-40, set./dez.
18. Senne, E.L.F.; Lorena, L.A.N.(1999). Lagrangean/Surrogate Heuristics for p-Median Problems. Submetido para publicação no 7th ICS Conference Volume, Cancun, México, 1999. (disponível em <http://www.lac.inpe.br/~lorena/pmed99.pdf>).