



## Ótimo Posicionamento de Sensores em uma Rede de Distribuição de Água com Uso de Programação Linear.

**Lázaro Robert da Silva Cunha**

Universidade Federal de São Paulo

São Paulo, São José dos Campos, Av. Cesare Monsueto Giulio Lattes, 1201

robert.silva10@unifesp.br

### 1. Revisão Bibliográfica

Os primeiros esforços sistemáticos para definir metodologias de posicionamento ótimo de sensores em redes de distribuição de água remontam ao trabalho de [Kessler et al. [1998]]. Os autores formularam uma metodologia baseada na definição de um nível de serviço, medido pelo volume máximo de água contaminada consumida antes da detecção. A proposta consistia em transformar a rede hidráulica em uma rede auxiliar representando direções de fluxo médias de um ciclo típico de demanda, aplicar algoritmos de caminhos mínimos para identificar os domínios de propagação da contaminação e, por fim, resolver um problema de cobertura de conjuntos para selecionar a configuração mínima de estações de monitoramento. Os resultados mostraram que, mesmo em redes de médio porte, era possível reduzir significativamente o número de sensores sem comprometer o nível de serviço, além de incorporar critérios de invulnerabilidade para aumentar a resiliência do sistema frente a falhas em estações específicas.

Na sequência, [Berry et al. [2004]] introduziram um arcabouço de programação inteira mista para tratar a alocação de sensores em redes municipais com o objetivo de minimizar a exposição populacional em cenários de contaminação. O modelo integrava simulações hidráulicas e de qualidade de água com o EPANET e considerava distribuições probabilísticas de ataques em diferentes nós e períodos. Os testes realizados em redes de benchmark e em uma rede real evidenciaram que a formulação era eficiente do ponto de vista computacional, permitindo obter soluções em minutos, e robusta sob incertezas de dados populacionais e de risco. Os resultados mostraram que a abordagem era capaz de proteger grandes parcelas da população com um número relativamente reduzido de sensores, consolidando a programação inteira mista como uma ferramenta poderosa para apoiar decisões estratégicas nesse campo.

Ampliando essa linha, [Berry et al. [2005]] evoluíram o modelo anterior ao incorporar custos de instalação e restrições orçamentárias na formulação. A metodologia combinou programação inteira dinâmica com simulações de cenários de contaminação, permitindo comparar soluções ótimas com estratégias manuais de alocação. Os experimentos em uma grande rede de distribuição nos Estados Unidos demonstraram que a abordagem de otimização superava significativamente a seleção manual: mesmo com um número menor de sensores, as soluções otimizadas obtinham menor volume esperado de consumo de contaminantes. Os autores ressaltaram que, embora a modelagem matemática seja central para orientar o processo decisório, a experiência prática e considerações políticas permanecem fundamentais na definição final das estratégias de monitoramento.

Outro avanço relevante foi apresentado por [Ostfeld e Salomons [2004]], que propuseram uma estrutura para projetar sistemas de detecção precoce (EWDS) com o objetivo de minimizar o volume de água contaminada consumida acima de níveis perigosos. A metodologia utilizou o conceito de matriz de poluição randomizada, que representava múltiplos cenários possíveis de injeção de contaminantes, em conjunto com simulações hidráulicas não estacionárias no EPANET. Para otimização da localização de sensores, aplicou-se um algoritmo genético, permitindo explorar soluções em diferentes níveis de cobertura e redundância. Os resultados, testados em redes-padrão,



mostraram que poucas estações já eram suficientes para garantir elevada probabilidade de detecção, ainda que com aumento de redundância entre sensores. Além disso, análises de sensibilidade confirmaram a robustez da metodologia frente a variações nas probabilidades de injeção e nos parâmetros de operação do sistema.

### Referências

- Berry, J., Fleischer, L., Hart, W., Phillips, C., e Watson, J. (2004). A general integer-programming-based framework for sensor placement in municipal water networks. *Research Gate*.
- Berry, J., Hart, W., C., P., Uber, J., e Walski, T. (2005). Water quality sensor placement in water networks with budget constraints. *ASCE Library*.
- Kessler, A., Ostfeld, A., e Sinai, G. (1998). Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *ASCE Library*.
- Ostfeld, A. e Salomons, E. (2004). Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *ASCE Library*.