

XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

SETORIZAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA BASEADA NA TEORIA DOS GRAFOS

*Sabrina da Silva Corrêa¹; Saulo de Tarso Marques Bezerra²; Pedro Henrique Leite de Lima³;
Jonathan Simões Roque³ & Laura Aurora de Melo Santana³*

RESUMO – Nos últimos anos, a gestão sustentável dos recursos hídricos tornou-se um desafio no setor de saneamento. A divisão de redes de distribuição de água em Distritos de Medição e Controle (DMCs) pode ser uma técnica eficaz para a melhoria do gerenciamento e da segurança dos sistemas, sendo possível o controle de perdas de água. Dessa forma, essa pesquisa tem por objetivo o desenvolvimento de um método para o projeto de setorização de redes. A metodologia proposta é baseada na teoria dos grafos, com aplicação do algoritmo *Depth-first Search* (DFS) em combinação com o algoritmo *Dijkstra shortest path* (DSP). A eficiência do procedimento é demonstrada através de sua aplicação na rede Apulian. Os resultados demonstram que os DMCs implementados podem reduzir as perdas de água em sistemas com pressões elevadas.

ABSTRACT – In recent years, sustainable management of water resources has become a challenge in the sanitation sector. The division of water distribution networks into district metering areas (DMAs) can be an effective technique for managing and securing systems, being possible to control water losses. This paper proposes the development of a method for the network sectorization project. The proposed methodology is based on graph theory, using the *Depth-first Search* algorithm in combination with *Dijkstra* algorithm. The effectiveness of the procedure is demonstrated using the Apulian network. Results shows that DMA implementation can allow leakage reduction in systems with high pressures.

Palavras-chave – distrito de medição e controle, perdas de água, eficiência hídrica.

¹ Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Agreste. Caruaru-PE. E-mail: sabrinna_s.c@hotmail.com.

² Professor do Núcleo de Tecnologia da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Agreste. Caruaru-PE. E-mail: s.bezerra@yahoo.com.br.

³ Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco, Campus Agreste. Caruaru-PE. E-mail: p_henriqueleitima@hotmail.com, jonathansimoes1@hotmail.com, aurora-laura@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água para todos os indivíduos é um dos objetivos da Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, e o Brasil apresenta condições, dados e projeções que indicam grandes dificuldades para alcançar tal fim. No setor de saneamento, a expansão acelerada das áreas urbanas implicou no aumento da complexidade da gestão dos sistemas de distribuição de água (SDAs).

Diante disso, diversos estudos propõem a setorização desses sistemas, ou seja, dividir os sistemas de distribuição de água em Distritos de Medição e Controle (DMCs), uma vez que estes proporcionam melhoria no gerenciamento e na segurança (DI NARDO *et al.*, 2014; FERRARI *et al.*, 2014; LAUCELLI *et al.*, 2017). Os DMCs são setores criados através do fechamento de registro(s) ou até mesmo desconexão de trechos de tubulações de modo que a vazão que entra na rede possa ser medida e controlada. Esta técnica vem sendo aceita e aplicada com sucesso, pois permite controlar pressões, demandas, detectar vazamentos e reduzir as obras de reabilitação, simplificando a análise do sistema (LAUCELLI *et al.*, 2017).

As perdas de água, que ocorrem no processo de distribuição de água por vazamentos, são elevadas no Brasil, 38% em 2018 (SNIS, 2019). Uma das alternativas mais eficazes para o controle de tais perdas, perdas físicas de água, é o controle de pressão nos sistemas de distribuição de água. Desse modo, a setorização da rede pode ser uma medida viável no combate das perdas de água, visto que a sua implantação implica na redução da pressão. Além disso, o DMC permite que o cálculo do balanço hídrico seja mais eficiente, fornecendo a base para a implementação das técnicas *bottom up* (de baixo para cima) de avaliação de perdas reais.

Os princípios da teoria dos grafos podem ser utilizados no agrupamento dos nós para a formação de setores (DI NARDO *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2018). A topologia da rede de distribuição de água pode ser representada através de estruturas de grafos, onde os vértices representam os nós e as arestas representam os trechos. Diante do exposto, esta pesquisa objetivou a criação de um método de setorização para redes de distribuição de água baseada na teoria dos grafos. A abordagem proposta permite a utilização do algoritmo *Depth-First Search* (DFS), em combinação com o algoritmo *Dijkstra Shortest Path* (DSP) para a determinação dos caminhos mais curtos dos fluxos, em combinação com o algoritmo para mesclar os setores.

2 METODOLOGIA

O modelo proposto foi desenvolvido na linguagem Python através do IDE livre PyCharm Community 2019.3.1, com o auxílio da biblioteca Epanettools, pacote que permite ao usuário utilizar todas as funções do kit de ferramentas do *software* EPANET 2.00.12 nos *scripts* Python.

De modo geral, os DMCs são definidos por meio da inserção de válvulas e medidores de vazão de modo que a rede seja dividida em setores. Localizar quais trechos devem receber tais dispositivos é o objetivo principal da pesquisa. As válvulas devem ser inseridas para seccionamento de trechos, a fim de interromper o fluxo e limitar a entrada nos setores. Os medidores de vazão devem ser instalados na entrada de cada setor, a fim de possibilitar o controle dos sistemas.

Com vista à obtenção da solução para o problema proposto, a metodologia foi constituída fundamentalmente por: (1) Transformação da topologia da rede de distribuição de água em estrutura de grafos, (2) definição da tubulação principal, (3) agrupamento dos nós com o auxílio do algoritmo DSP (DIJKSTRA, 1959), e (4) formação de DMCs.

2.1 Grafos

A topologia da rede de distribuição de água deve ser representada através de estruturas de grafos não dirigidos, sem sentido definido, onde os vértices representam os nós e as arestas representam os trechos. Especificamente, a partir do modelo hidráulico da rede de distribuição, são definidos os n nós, e m trechos. Para essa representação, foram determinadas uma matriz de adjacência quadrada A para relacionar as conexões existentes entre os nós, e uma matriz ponderada B conforme as Eq. (1) e (2), respectivamente:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se houver trechos entre os nós } i \text{ e } j \text{ (} i \neq j \text{)} \\ 0, & \text{se não} \end{cases} \quad (1)$$

$$B_{ij} = \begin{cases} \text{"peso"}, & \text{se houver trechos entre os nós } i \text{ e } j \text{ (} i \neq j \text{)} \\ \infty, & \text{se não} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 Tubulação principal

A tubulação principal é composta pelos trechos caracterizados por possuírem grandes diâmetros e conseqüentemente transportarem grandes vazões, sua origem é o reservatório e deve alimentar os DMCs formados posteriormente. A tubulação principal foi definida por meio do algoritmo DFS no grafo definido:

1. Definição do nó inicial (N_i);
2. Escolha do nó adjacente (N_j), que apresenta tubulação (T_j) com maior vazão, e registro na lista de trechos pertencentes à tubulação principal. Este nó será o novo nó inicial (N_i);
3. Repita o processo até atingir o nó objetivo, ou seja, até $demanda(N_j) > vazão(T_j)$.

Uma vez definida a tubulação principal, é possível definir as tubulações que serão variáveis de decisão, isto é, tubulações que podem receber válvulas ou medidores de vazão. Essas tubulações (variáveis de decisão) estão conectadas diretamente com a tubulação principal.

2.3 Algoritmo *Dijkstra Shortest Path*

Nessa etapa, foi utilizado o algoritmo DSP (DIJKSTRA, 1959) para o cálculo do caminho mais curto, com o propósito de representar o caminho ótimo da água entre o ponto inicial k (reservatório) e o nó i . Em combinação da matriz ponderada, com valores dos pesos das tubulações, é possível obter o menor caminho a partir da Eq. (3):

$$distância_{ki} = \sum w_l \quad l \in \{caminho_{ki}\} \quad (3)$$

Onde: w_l é o peso do trecho l ; $\{caminho_{ki}\}$ é o conjunto de trechos que correspondem ao caminho mais curto entre o nó inicial k (reservatório) e o nó i .

O modelo proposto utiliza o coeficiente de resistência do tubo (ROSSMAN, 2000) como o valor para o peso da tubulação, conforme a Eq. (4):

$$w_l = 10.67 \cdot C_l^{-1.852} \cdot d_l^{-4.871} L_l \cdot l = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

Onde: C_1 é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams da tubulação do trecho l , d_1 é o diâmetro da tubulação do trecho l , e L_1 é o comprimento do trecho l .

Com os pesos definidos na matriz ponderada, é possível fazer a busca e obter o conjunto de caminhos ótimos por meio do algoritmo DSP no grafo definido:

1. Marque todos os nós como não visitados (*false*) e armazene-os;
2. Defina a distância 0 para o nó inicial (reservatório);
3. Selecione o nó com menor peso, este será o nó atual;
4. Marque o nó atual como visitado (*true*);
5. Repita o processo até encontrar o nó i .

Por consequência, os nós serão agrupados de modo a compartilharem o mesmo trecho de derivação. Os setores formados representam o conjunto de caminhos (trechos) que possuem menores resistências. A quantidade de setores aqui gerados, representa o número máximo de setores que a rede analisada comportaria, implicando no alto custo e na sua inviabilidade, logo se torna necessária a utilização de mais uma etapa a fim de mesclar os setores para obtenção da solução final.

2.4 Formação de DMCs

Para a realização dessa etapa, é necessário definir o tamanho mínimo e máximo dos setores, essa definição depende do porte da rede analisada. O tamanho dos setores foi fixado de acordo com o número de setores desejado para a divisão. Zhang *et al.* (2018) afirmam que, geralmente, o tamanho mais comum deve apresentar conexões entre 500 e 5.000 clientes, para cidades de baixa densidade populacional.

O modelo foi desenvolvido para definir uma solução inicial. Desse modo, os setores que não apresentam a quantidade mínima de nós preestabelecidas, foram mesclados com os setores vizinhos maiores. É importante salientar que para redes de grande porte, essa etapa deve ser analisada com um algoritmo de otimização, uma vez que pode apresentar muitas opções de combinação.

Após a formação dos setores, a redução de perdas de água foi estimada por meio da redução de pressão, através da Eq. (5), sugerida por May (1994):

$$\frac{Q_{v1}}{Q_{v2}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{N_1} \quad (5)$$

Onde: Q_v é a vazão do vazamento; P é a pressão no sistema; e N_1 é o expoente que depende do tipo de material.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o método proposto, utilizou-se a rede fictícia Apulian (GIUSTOLISI *et al.*, 2008), caracterizada por possuir um reservatório fornecendo água por gravidade para 23 nós através de 34 trechos, cujo traçado é apresentado na Figura 1. Adicionalmente, considerou-se um índice de perdas de 30%.

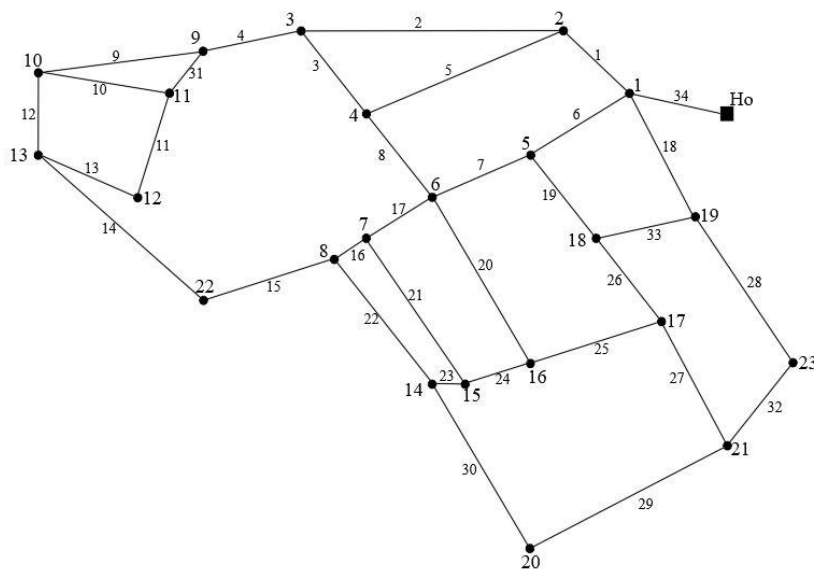


Figura 1 – Rede de distribuição de água Apulian (GIUSTOLISI *et al.*, 2008).

Visto que a rede apresentava pressões baixas, inclusive abaixo da mínima estabelecida pela NBR 12218 (ABNT, 2017), de 10 mca, foi necessário elevar a altura do reservatório para a cota de 100 m. Dessa forma, foi possível analisar o modelo de setorização proposto nessa pesquisa.

Após a aplicação das etapas descritas nos itens 2.1 e 2.2, foi determinado o trecho principal. O algoritmo *Depth-First Search* selecionou os trechos 34, 6, 7, 17, 16, 22 e 30 como pertencentes a tubulação principal, visto que as mesmas possuem maiores diâmetros e iniciam a partir do reservatório.

Por meio do algoritmo *Dijkstra Shortest Path*, foi definido seis setores, conforme se observa na Figura 2. Para essa setorização, seriam necessários sete medidores de vazão e nove válvulas para que os setores se mantenham isolados e abastecidos através de um único trecho de entrada.

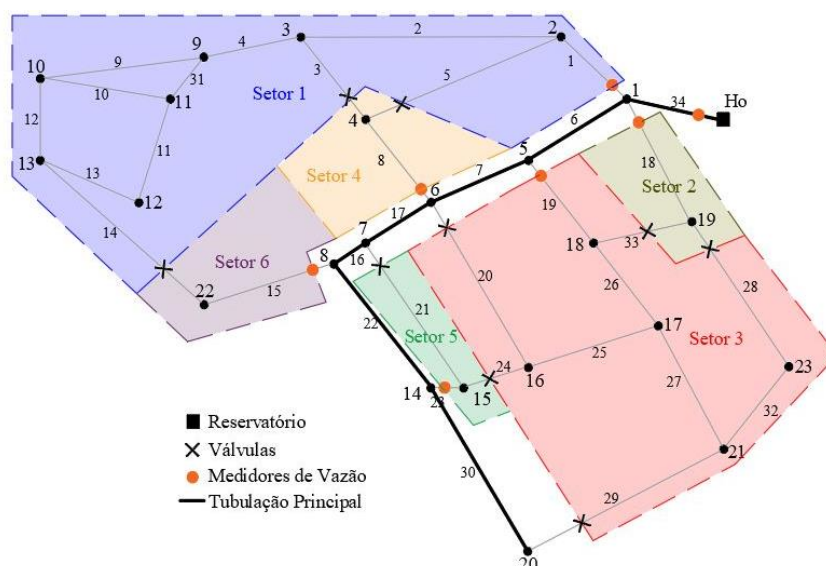


Figura 2 – Solução inicial: setorização por meio do algoritmo *Dijkstra shortest path*.

É perceptível que a solução apresentada na Figura 2 não é a solução ideal em termos de custos e viabilidade de implantação do projeto, tornando-se essencial a aplicação da etapa descrita no item 2.4, que considera um tamanho mínimo para cada setor. Por fim, o modelo indicou a solução apresentada na Figura 3. A solução possui 2 setores, com única entrada nos trechos 1 e 19 para cada setor, indicando o local de instalação dos medidores de vazão. Também será necessário a instalação de válvulas nos trechos 8, 15, 18, 20, 21, 23 e 29.

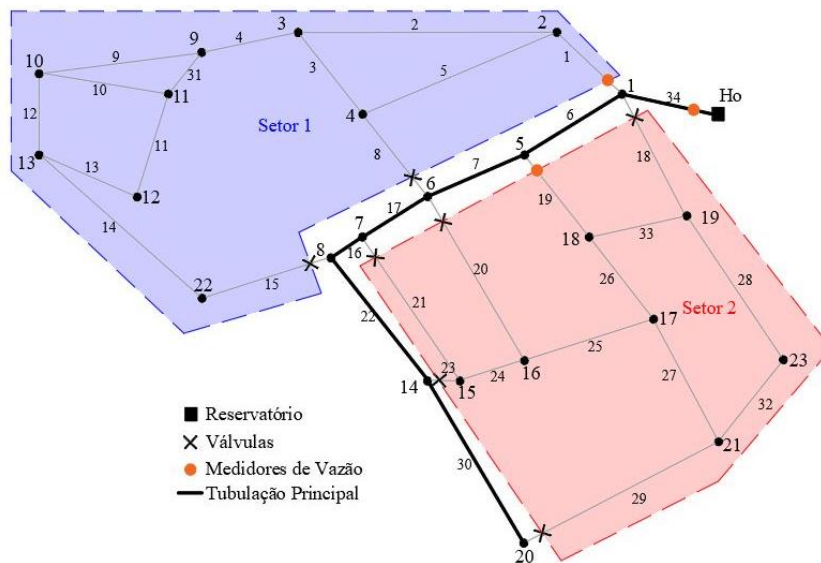


Figura 3 – Setorização final da rede Apulian.

Conseqüentemente, após a setorização houve redução de pressão. A Figura 4 apresenta os mapas de pressão da rede Apulian antes e depois da setorização, respectivamente. A pressão média da rede reduziu 17,7% após o processo de setorização, esse efeito ocorre devido à diminuição do número de possíveis caminhos que a água pode percorrer. A pressão do nó mais desfavorecido ficou acima da pressão mínima, estabelecida pela NBR 12218/2017, de 10 mca, portanto não é necessária a aplicação de técnicas de reabilitação da rede. A partir da Eq. (5), foi possível estimar uma redução de 32,33% no índice de perdas de água.

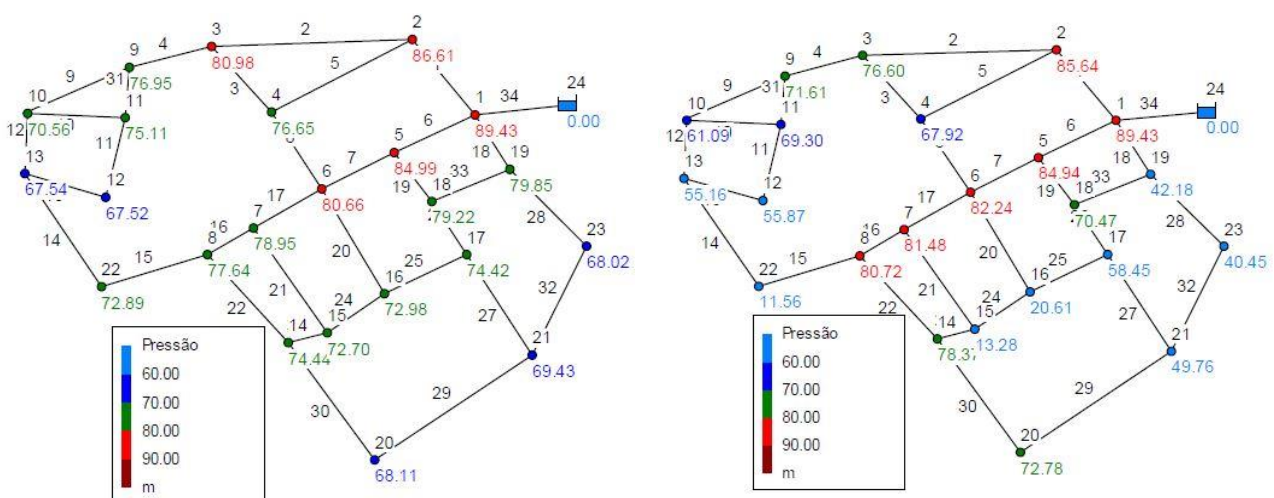


Figura 4 – Mapa de pressão da rede Apulian: (a) antes da setorização, e (b) depois da setorização.

4 CONCLUSÃO

A técnica de setorização, divisão da rede de distribuição de água em distritos de medição e controle, representa um procedimento eficaz para melhorar o gerenciamento dos sistemas, além de facilitar o controle das perdas de água. De fato, a teoria dos grafos representou uma ferramenta útil para o projeto dos DMCs, reduzindo significativamente a complexidade do problema.

Esse trabalho apresenta um modelo de setorização da rede baseado na teoria dos grafos. Os resultados encontrados demonstraram a eficiência do método proposto aplicado em redes de pequeno porte. É importante ressaltar que a metodologia aqui apresentada deve ser utilizada para determinar soluções iniciais para o processo de setorização de redes de grande porte, sendo recomendada a aplicação de um algoritmo de otimização para avaliar a melhor combinação de agrupamento de setores.

O modelo desenvolvido possibilitou o projeto de DMCs com controle satisfatório da pressão e conseqüentemente redução significativa de perdas de água. Em alguns casos, é necessária a aplicação de técnicas de reabilitação na rede setorizada, de modo a garantir a confiabilidade dos sistemas.

AGRADECIMENTOS

Os autores Sabrina da Silva Corrêa e Jonathan Simões Roque agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela concessão de bolsas de mestrado e iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). “NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento”. pp. 13.
- DIJKSTRA, E. W. (1959). “A Note on Two Problems in Connexion with Graphs”. *Numerische Mathematik*, 1 (1), pp. 269–271.
- DI NARDO, A.; DI NATALE, M.; SANTONASTASO, G.F.; TZATCHKOV, V.G.; ALCOCER-YAMANAKA, V.H. (2014). “Water Network Sectorization Based on Graph Theory and Energy Performance Indices”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140 (5), pp. 620–629.

- FERRARI, G.; SAVIC, D.; BECCIU, G. (2014). “*Graph-Theoretic Approach and Sound Engineering Principles for Design of District Metered Areas*”. Journal of Water Resources Planning and Management, 140 (12), pp. 04014036.
- GIUSTOLISI, O.; SAVIC, D.; KAPELAN, Z. (2008). “*Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks*”. Journal of Hydraulic Engineering 134 (5), pp. 626-635.
- LAUCELLI, D.B.; SIMONE, A.; BERARDI, L.; GIUSTOLISI, O. (2017). “*Optimal Design of District Metering Areas for the Reduction of Leakages*”. Journal of Water Resources Planning and Management, 143 (6), pp. 04017017.
- MAY, J. (1994). “*Pressure Dependent Leakage*”. World water and environmental engineering, 17 (8), pp. 10.
- SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2018* (2019). Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Brasília.
- ZHANG, K.; YAN, H.; ZENG, H.; XIN, K.; TAO, T. (2018). “*A Practical Multi-Objective Optimization Sectorization Method for Water Distribution Network*”. Science of The Total Environment, pp. 1401-1412.