

# ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA VIA TEORIA DE REDES COMPLEXAS

Jordana Madeira Alaggio Ribeiro<sup>1</sup>, Thomaz Felipe de Freitas Anchieta<sup>2</sup>,  
Gustavo Meirelles Lima<sup>3</sup>, Bruno Melo Brentan<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha,  
Belo Horizonte - MG, 31270-901

<sup>1</sup>*jordanaalaggio@gmail.com*

## RESUMO

Devido a importância de redes de distribuição de água na dinâmica urbana, faz-se necessário e fundamental que as mesmas funcionem adequadamente entregando água em quantidade e qualidade recomendada para o consumidor de forma confiável, porém redes de abastecimento estão sujeitas a sofrer com rupturas, que podem perturbar seu funcionamento. Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação quantitativa de risco de ruptura na rede, via teoria de redes complexas como alternativa às abordagens clássicas baseadas no uso de simulações hidráulicas de diversos cenários de ruptura. Como estudo de caso, apresenta-se a rede Modena, a qual é modelada como grafos de arestas direcionadas e ponderadas pela vazão, para melhor análise hidráulica do sistema via teoria de redes complexas. Para cada cenário de ruptura, um novo grafo é criado, retirando a aresta relacionada ao tubo rompido. Levando em consideração a localização dos reservatórios, foi aplicado o cálculo dos caminhos mais curtos entre nós de fonte e nós de demanda. Foi observado a desconexão de grupos de nós de suas respectivas fontes abastecedoras e ao comparar os resultados, houve uma significativa semelhança com os tubos indicados como críticos pela redução percentual de pressão ao simular as rupturas hidráulicas para validação.

## Palavras-Chave

Teoria de Redes Complexas, Mapeamento de Risco, Caminhos Mais Curtos.

## 1. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de água (RDA), responsáveis por abastecer os consumidores de uma localidade com água potável em quantidade e qualidade adequadas, são vulneráveis ao aparecimento de perdas d'água e ruptura dos tubos, que impactam a hidráulica e a qualidade da água distribuída [1]. Ao ocorrer uma falha mecânica, esta gera custos diretos (custos de reparo do tubo, reabilitação da rede e perda d'água) e indiretos como interrupção de tráfego, danos materiais causados, atraso de abastecimento para combater incêndio [2]. Estas consequências tornam a identificação de elementos críticos da rede que afetam

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

negativamente a sua performance, importantes para os tomadores de decisões envolvidos nas áreas de planejamento de gestão da rede [3].

Para realizar a análise do comportamento das RDAs frente à falha, é necessário que sejam considerados diversos cenários de rupturas de trechos para identificar o mais crítico. Isto pode ser feito por meio de simulações hidráulicas e da modelagem via Teoria de Redes Complexas (TRC). A utilização da TRC permite várias vantagens, entre elas está a maior eficiência computacional quando comparada com as simulações hidráulicas, que requerem maior esforço computacional e demandam mais tempo, apesar de que podem ser perdidas informações hidráulicas importantes. Ulusoy et al. [4] ao criar uma métrica de centralidade para analisar a criticidade de tubos, constatou que o tempo computacional necessário para aplicar TRC na rede foi de quase duas ordens menor que o necessário para realizar a modelagem hidráulica (30 horas versus 30 minutos).

Redes complexas são redes que possuem elementos que interagem entre si de forma complexa, com formato irregular e evolutivo e que possuem seu funcionamento explicado pela sua topologia [5]. Estas redes podem ser modeladas como grafos, que são abstrações matemáticas representadas por um conjunto de vértices conectados por arestas, que podem ter peso e/ou direção associados às arestas [6].

O estudo destas redes já foi aplicado em áreas da informação, sociologia e tecnologia, respectivamente, modelando a *World Wide Web*, rede social e RDA [7]. Para aplicar TRC em RDA, em geral, tem-se as tubulações e outras conexões representadas pelas arestas do grafo e as interseções de tubulações representadas pelos vértices. Porém, é preciso associar a hidráulica ao grafo para que ele possa efetivamente representar a rede. Yazdani e Jeffrey [8] sugerem a modelagem das RDA como grafos direcionados e ponderados a fim de estreitar a analogia de grafo e rede, para melhor auxiliar na compreensão da interação entre os componentes da rede. O formato das RDAs é influenciado pelo arruamento das cidades, formando anéis, o que limita a utilização de algumas métricas relacionadas a graus dos nós [9], além disso, sugere-se diferenciar nós de demanda e nós de reservatórios ao analisar a rede, já que a eficiência da rede é afetada pela conectividade e tubos conectados às fontes d'água são pontas iniciais extremas, e conexões mais distantes afetam negativamente esta propriedade [10].

A aplicação de TRC em RDAs já envolveu temáticas como detecção de vazamentos [1], otimização de dimensionamento, setorização ótima da rede, estudos sobre a resiliência, vulnerabilidade e eficiência da rede [11]. Nestes trabalhos são aplicadas diversas métricas de TRC, e em estudos de resiliência, vulnerabilidade ou risco da rede, geralmente, são aplicadas métricas relacionadas a robustez, conectividade e redundância da rede, especialmente métricas de centralidade.

Centralidade é uma área de estudo de TRC tipicamente usada para quantificar a importância de vértices ou arestas de uma rede por diferentes cenários, aplicada, em geral, para avaliar a confiabilidade e vulnerabilidade de uma rede [9]. A métrica Centralidade de Intermediação das Arestas (CIA) é diretamente proporcional à relevância de um tubo na rede, um alto valor desta métrica representa a presença de um tubo que se removido pode afetar a comunicação entre quaisquer pares de nós, no cálculo dos caminhos mais curtos [12]. O caminho mais curto é a soma dos pesos do menor caminho geodésico entre dois nós de uma rede [13], podendo ter mais de um caminho mais curto entre dois nós [14]. Esta propriedade pode ser

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

calculada por diversos algoritmos, sendo neste trabalho utilizado o de Floyd-Warshall devido a sua aplicabilidade em grafos direcionados e ponderados. Uma variação da métrica explicada é a Centralidade de Intermediação de Fonte-Aresta que inclui somente os caminhos mais curtos entre fontes e nós de demanda e não entre todos os pares de nós [11].

Este trabalho objetiva investigar a aplicação de métricas de TRC, como caminhos mais curtos e centralidade de intermediação de trechos normalizada, em RDA para desenvolver um mapa de risco quantitativo, utilizando grafos com peso e direção, a fim de avaliar a vulnerabilidade da rede em relação a rupturas. Será utilizado como validação o resultado de simulações hidráulicas aplicadas a uma rede de referência na literatura.

**2. METODOLOGIA**

Serão realizadas simulações hidráulicas dirigidas pela pressão de ruptura na rede Modena, em seguida, serão construídos grafos direcionados e ponderados análogos aos cenários de ruptura nesta rede, com pesos e direções associados a vazão de somente uma simulação, da simulação original da rede sem ruptura. Por fim, serão aplicadas métricas de TRC para observar se indicam os mesmos tubos críticos indicados pelas simulações do EPANET. Como base do estudo será utilizada a rede de referência Modena que consiste em 268 nós, 317 tubos e é abastecida por 4 reservatórios, apresentada na Figura 1 [15].

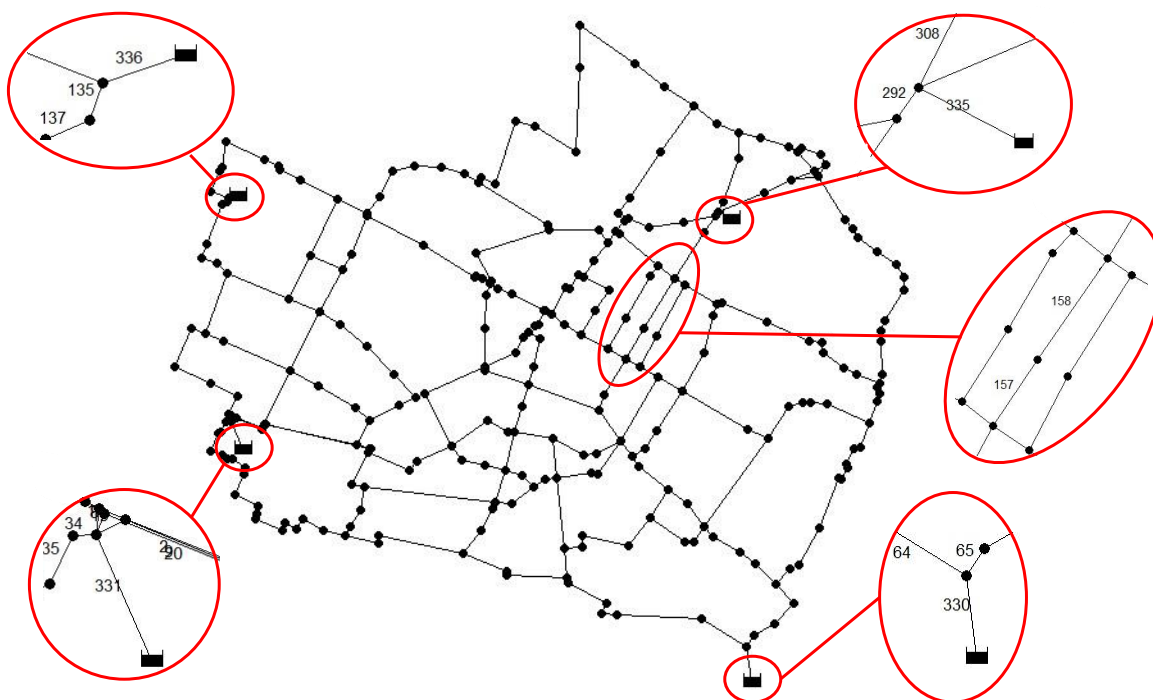


Figura 1. Rede Modena com zoom aplicado nos reservatórios para melhor identificação dos tubos conectados a eles.

Inicialmente, é exportado o modelo hidráulico de RDA do software EPANET 2.2 [16] para o ambiente de programação da linguagem *Python*, por meio da biblioteca *Water Network for Resilience* (WNTR). Foi realizada uma simulação hidráulica com a rede em funcionamento pleno, sem nenhuma ruptura e, em seguida, foi simulado individualmente a ruptura dos tubos, alterando o *status* do tubo no documento de entrada em formato “.INP”, fechando-o e

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

executando a simulação. Utilizou-se o simulador do EPANET 2.2 pela biblioteca citada, realizando uma simulação guiada pela pressão, sendo estabelecida a pressão requerida de 20 m.c.a, que é a pressão de funcionamento da rede. Uma análise guiada pela demanda assume que o consumidor é sempre atendido independente da pressão disponível. Desta forma, não é possível replicar o comportamento das RDA sob condições de pressões baixas. A análise guiada pela pressão consegue simular estas condições críticas e indicar possíveis interrupções de abastecimento [17].

Posteriormente, com objetivo de identificar quais os tubos que ao se romper acarretariam em maiores áreas com reduções de pressão, calculou-se a diferença percentual de variação de pressão em relação à pressão original. Três valores de diferencial de pressão foram analisados neste trabalho, a saber: 5%, 10% e 15%.

Com a utilização da biblioteca *Networkx*, a RDA foi transformada em um grafo direcionado e ponderado segundo a vazão da simulação da rede sem nenhuma ruptura. Matematicamente, o que descreve o grafo é a matriz de adjacência que indica quais vértices estão conectados. Esta é uma matriz quadrada de acordo com o número de vértices, se o elemento  $a_{ij} = 1$ , indica que tem uma conexão entre os vértices  $i$  e  $j$ ; se o valor do elemento for igual a 0, então não existe uma aresta entre eles. Em casos de grafos não-direcionados,  $a_{ij} = a_{ji}$  e a matriz é simétrica [5, 6]. Em caso de grafos com pesos associados às suas arestas, o valor do elemento  $a_{ij}$  é o valor do peso da aresta que conecta os vértices  $i$  e  $j$ . Para indicar uma ruptura, o tubo é desconectado na matriz de adjacência e de pesos. A utilização desta rede permite que seja avaliada a aplicação de métricas de TRC em situações com múltiplas fontes de água.

Nesta etapa foi aplicada a métrica CIA no grafo completo e nos grafos dos cenários de rupturas, em que o tubo rompido foi individualmente retirado das matrizes. Ela é calculada pela soma da quantidade de caminhos mais curtos entre todos pares de nós  $i$  e  $j$  ( $\sigma_{i,j}$ ) de uma rede que o trecho  $k$  está incluído normalizado pelo total de caminhos mais curtos entre  $i$  e  $j$  ( $\#\sigma$ ), de acordo com a Equação 1 [14, 16].

$$CIA = \sum_{i \neq j \in N} \frac{\sigma_{i,j}(k)}{\#\sigma} [0 \ 1] \quad (1)$$

Comparando os valores da métrica ao romper um tubo e os originais, verificou-se quais tubos, ao serem rompidos, acarretaram em um aumento percentual de valor da métrica maior que 5%, 10% e 15%.

Também foi aplicado o cálculo dos caminhos mais curtos entre fontes e nós de demanda, a todos os grafos, com e sem rupturas, a fim de investigar quais tubos ao serem rompidos aumentavam ou diminuía, em média, o caminho mais curto. Foi utilizado o algoritmo de Floyd-Warshall que cria matrizes para calcular os caminhos mais curtos entre todos os pares de nós, com o algoritmo funcionando segundo a Equação 2 [18]. Além disso, era examinado quantos nós eram desconectados a cada ruptura.

$$A_{(i,j)}^k = \min\{A_{(i,j)}^{k-1}, A_{(i,k)}^{k-1} + A_{(k,j)}^{k-1}\} \quad (2)$$

Este algoritmo foi escolhido por ser aplicável em grafos direcionados e com pesos negativos associados às arestas.

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

## 3. RESULTADOS

Ao realizar simulações hidráulicas na rede Modena para fins de validação, obteve-se mapas da rede identificando a quantidade de nós que sofreram variação da pressão reduzida em 5%, 10% e 15% em relação à pressão original da rede, ao simular o rompimento de um tubo, como apresentado na Figura 2.

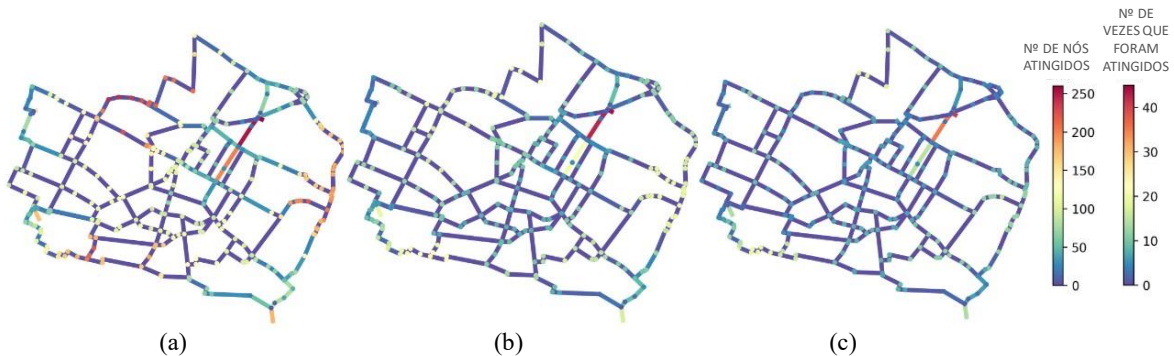


Figura 2. Mapas de variação de pressão da rede, construídos por meio de simulação hidráulica, indicando a quantidade de nós que tiveram redução de pressão ao romper um trecho e quantidade de vezes que cada nó sofreu redução de pressão: a) redução maior que 5% em relação a original; b) redução maior que 10% em relação a original; c) redução maior que 15% em relação a original.

É possível observar que os tubos 330, 331, 335 e 336, que são conectados respectivamente aos reservatórios 269, 270, 271 e 272, estão destacados, indicando que a ruptura de um deles afeta uma área significativa. O tubo que afetou a maior área foi o tubo 335, conectado ao reservatório 269. Este reservatório é localizado numa área mais central da rede e possui uma maior vazão saindo dele de  $Q_{335} = 175,7 \text{ l/s}$  enquanto que nos outros as vazões de saída são:  $Q_{336} = 46,41 \text{ l/s}$ ,  $Q_{331} = 53,56 \text{ l/s}$  e  $Q_{330} = 51,75 \text{ l/s}$ . Os outros reservatórios possuem vazões menores e são localizados na periferia da rede.

Além de uma redução percentual da pressão, foi observado que, ao romper alguns tubos, tiveram áreas com pressão abaixo da mínima exigida, afetando o consumo. Por exemplo, dos 235 nós que sofreram redução de pressão maior que 15% quando se rompeu o tubo 335, 181 ficaram com o abastecimento comprometido. A Figura 2 também apresenta em quantas rupturas um ponto específico teve redução de sua pressão de acordo com as porcentagens consideradas. O nó 72, por exemplo, sofreu redução de pressão maior que 15% durante 20 rupturas.

Em seguida, aplicou-se a métrica CIA ao grafo análogo à RDA Modena, com direção e peso de acordo com a vazão resultante de uma simulação hidráulica da rede sem ruptura. Depois de aplicada nos cenários de ruptura de trechos, foi calculada a variação percentual dos valores da métrica aplicada aos grafos com e sem desconexão de tubo. Observou-se que tal métrica não destacava como tubos críticos os mesmos identificados pelas simulações hidráulicas, mas sim os tubos mais centrais da rede. Estes tubos identificados nesta etapa são os que pertencem a um conjunto maior de caminhos mais curtos.

Assim, com a ideia de trabalhar somente com os caminhos mais curtos entre nós de fontes e nós de demanda, a cada tubo desconectado do grafo, foi aplicado o cálculo dos caminhos mais curtos entre as fontes e os nós, obtendo resultados de aumento e diminuição dos

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

caminhos e de desconexão de nós de consumo com a respectiva fonte de água. O valor final deste cálculo é a soma de pesos das arestas que pertencem ao caminho mais curto, quando não possui um caminho mais curto, o valor é dado como infinito. O resultado dos tubos que, quando rompidos, acarretaram em uma maior quantidade de nós desconectados, está presente na Figura 3.

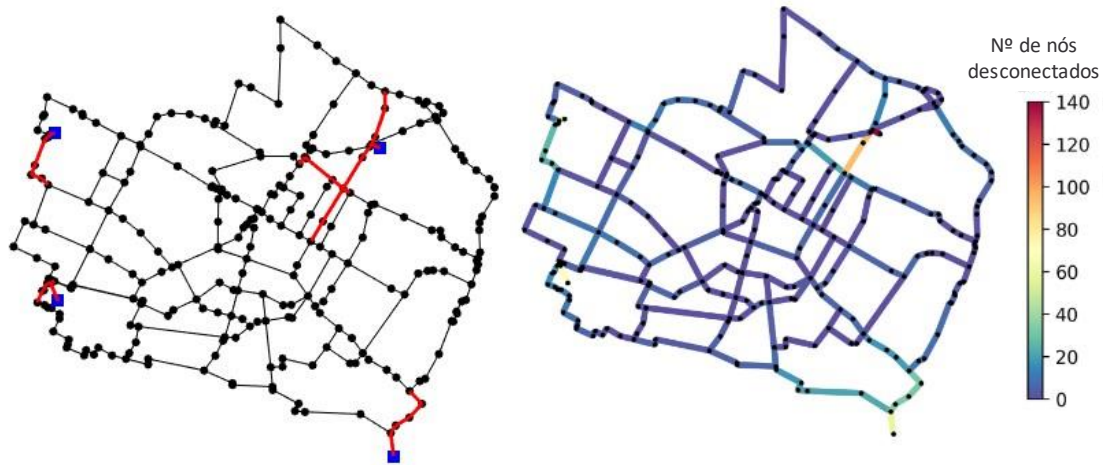


Figura 3. Rede Modena com a sua rede troncal de 10% de tubulação destacada e a representação do grafo da rede com variação de cor de acordo com a quantidade de desconexões entre nós de demanda e nós de fontes ao romper um tubo.

Os tubos que acarretaram em uma maior área desconectada de sua respectiva fonte, se identificam, em sua maioria, à rede troncal. Esta é definida por uma hierarquia de tubos de acordo com a sua importância para o abastecimento, calculada por meio de caminhos mais curtos em grafo direcionado e ponderado pela vazão da rede [19].

Os resultados da aplicação de TRC, utilizando caminhos mais curtos entre fontes e nós de consumo, indicaram tubos que foram identificados como críticos nas simulações hidráulicas, como apresentado na Figura 4.

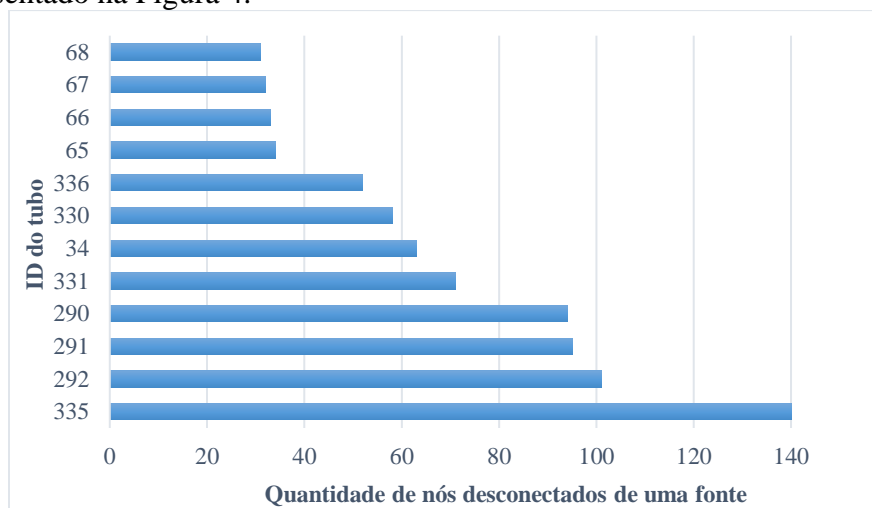


Figura 4. Quantidade de nós que foram desconectados das fontes d'água durante a ruptura de tubos via cálculo dos caminhos mais curtos entre fonte e nó de consumo.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

As exceções foram no ranking dos que geraram maiores reduções percentuais de pressões, que indicaram os tubos 157 e 158 que são tubos conectados ao reservatório 269, centrais na rede, com dois trechos próximos a eles que podem funcionar na rede como caminhos alternativos entre a fonte e nó de demanda, assim, não foram indicados pela métrica.

#### **4. CONCLUSÕES**

O trabalho visou identificar quais tubos seriam mais críticos em uma RDA, afetando maiores áreas de forma prejudicial, seja com redução de pressão ou desabastecimento de água, sem necessitar de exaustivas simulações hidráulicas de cenários de ruptura. Para isto foram utilizadas recomendações encontradas na literatura sobre como trabalhar com grafos para que estes representem o funcionamento de uma RDA.

Foram aplicados aos grafos direção e peso de arestas de acordo com a vazão de uma simulação hidráulica da rede em funcionamento pleno e localização de reservatórios. Considerando estas particularidades, foi aplicado o cálculo do caminho mais curto entre as fontes de água e os nós de consumo. Foi calculado assim os tubos que suscitam em maiores desconexões de nós de suas fontes de água. Os tubos deste resultado, foram, em sua maioria, os mesmos indicados como críticos pelas simulações hidráulicas de validação, inclusive na ordem de criticidade.

Os tubos críticos apontados pela aplicação de TRC foram compatíveis com a rede troncal de 10% da tubulação, corroborando com a importância destes para o abastecimento. Além disso, foi apresentado que tubos conectados em sequência, saindo do reservatório 269, eram mais críticos do que tubos conectados diretamente aos outros reservatórios. Por fim, os dois métodos de análise de risco, simulações hidráulicas e TRC, apresentaram uma boa convergência nos resultados. É recomendado aplicar ainda em outros tipos de rede, com diferentes topologias e comportamento hidráulico.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

#### **REFERÊNCIAS**

- [1] D. B. Barros, G. Meirelles, A. Saliba, and B. Brentan, “DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO VIA DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA E TEORIA DOS GRAFOS,” presented at the I Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, Ouro Preto - MG, Agosto, 2022.
- [2] O. Giustolisi, D. Laucelli, and D. A. Savic, “Development of rehabilitation plans for water mains replacement considering risk and cost-benefit assessment,” *Civ. Eng. Environ. Syst.*, vol. 23, no. 3, Setembro, 2006.
- [3] A. Pagano, R. Giordano, and I. Portoghese, “A Pipe Ranking Method for Water Distribution Network Resilience Assessment Based on Graph-Theory Metrics Aggregated Through Bayesian Belief Networks,” *Water Resour. Manag.*, vol. 36, no. 13, Outubro, 2022.

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [4] A.-J. Ulusoy, I. Stoianov, and A. Chazerain, “Hydraulically informed graph theoretic measure of link criticality for the resilience analysis of water distribution networks,” *Appl. Netw. Sci.*, vol. 3, no. 1, Dezembro, 2018.
- [5] C. Giudicianni, A. Di Nardo, M. Di Natale, R. Greco, G. Santonastaso, and A. Scala, “Topological Taxonomy of Water Distribution Networks,” *Water*, vol. 10, no. 4, Abril, 2018.
- [6] A. B. Sadavare and D. R. V. Kulkarni, “A Review of Application of Graph Theory for Network,” vol. 3, 2012.
- [7] M. Herrera, M. Pérez-Hernández, A. Kumar Parlikad, and J. Izquierdo, “Multi-Agent Systems and Complex Networks: Review and Applications in Systems Engineering,” *Processes*, vol. 8, no. 3, Março, 2020.
- [8] A. Yazdani and P. Jeffrey, “Water distribution system vulnerability analysis using weighted and directed network models: VULNERABILITY ANALYSIS USING NETWORK MODELS,” *Water Resour. Res.*, vol. 48, no. 6, Junho, 2012.
- [9] O. Giustolisi, L. Ridolfi, and A. Simone, “Tailoring Centrality Metrics for Water Distribution Networks,” *Water Resour. Res.*, vol. 55, no. 3, Março, 2019.
- [10] F. Meng, G. Fu, R. Farmani, C. Sweetapple, and D. Butler, “Topological attributes of network resilience: A study in water distribution systems,” *Water Res.*, vol. 143, pp. 376–386, Outubro, 2018.
- [11] R. Sitzenfrei, Qi Wang, Zoran Kapelan, and Dragan Savić, “Using Complex Network Analysis for Optimization of Water Distribution Networks,” *Water Resources Research*, vol. 56, Julho, 2020.
- [12] A. Di Nardo, M. Di Natale, C. Giudicianni, G. F. Santonastaso, and D. Savic, “Simplified Approach to Water Distribution System Management via Identification of a Primary Network,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 144, no. 2, Fevereiro, 2018.
- [13] M. Girvan and M. E. J. Newman, “Community structure in social and biological networks,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 99, no. 12, Junho, 2002.
- [14] M. E. J. Newman, “Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality,” *Phys. Rev. E*, vol. 64, no. 1, Junho, 2001.
- [15] A. Bolognesi, C. Bragalli, A. Marchi, and S. Artina, “Multiobjective Design of Water Distribution Networks through the Generation of Pseudofronts in the Hydraulically Feasible Region,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 4, Julho, 2012.
- [16] L. A. Rossman, H. Woo, M. Tryby, F. Shang, R. Janke, and T. Haxton, “EPANET 2.2 User Manual,” *U.S. Environmental Protection Agency*, 2022.
- [17] T. T. Tanyimboh and A. B. Templeman, “Seamless pressure-deficient water distribution system model,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Water Manag.*, vol. 163, no. 8, Setembro, 2010.
- [18] R. W. Floyd, “Algorithm 97: Shortest path,” *Commun. ACM*, vol. 5, no. 6, Junho, 1962.
- [19] E. Campbell, J. Izquierdo, I. Montalvo, A. Ilaya-Ayza, R. Pérez-García, and M. Tavera, “A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-objective optimization,” *J. Hydroinformatics*, vol. 18, no. 1, Janeiro, 2016.