

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Jordana Madeira Alaggio Ribeiro

**ANÁLISE DE RISCOS EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: uma abordagem  
via teoria de redes complexas**

Belo Horizonte  
2024

Jordana Madeira Alaggio Ribeiro

**ANÁLISE DE RISCOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: uma  
abordagem via teoria de redes complexas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e recursos hídricos.

Linha de pesquisa: Modelagem física e matemática em hidráulica.

Orientador: Bruno Melo Brentan

Belo Horizonte  
2024

R484a Ribeiro, Jordana Madeira Alaggio.  
Análise de riscos em sistemas de abastecimento de água [recurso eletrônico] : uma abordagem via Teoria de redes complexas / Jordana Madeira Alaggio Ribeiro. – 2024.  
1 recurso online (70 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Bruno Melo Brentan.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 64-70.

1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Recursos hídricos – Teses.  
3. Teoria das redes complexas – Teses. 4. Avaliação de riscos – Teses.  
5. Abastecimento de água – Manutenção e reparos – Teses. I. Brentan, Bruno Melo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

### **FOLHA DE APROVAÇÃO**

"Análise de Riscos Em Sistemas de Abastecimento de Água: Uma Abordagem Via Teoria de Redes Complexas"

**JORDANA MADEIRA ALAGGIO RIBEIRO**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Bruno Melo Brentan

Profa Maria Mercedes Gamboa Medina

Prof. Edevar Luvizotto Junior

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof. Bruno Melo Brentan

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 22 de março de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Mercedes Gamboa Medina, Usuário Externo**, em 02/04/2024, às 01:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Melo Brentan, Professor do Magistério Superior**, em 02/04/2024, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edevar Luvizotto Junior, Usuário Externo**, em 03/04/2024, às 14:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 06/08/2024, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3123771** e o código CRC **CFACBE25**.

## AGRADECIMENTOS

Ao decidir fazer mestrado, sabia que teria que encarar as mudanças que estavam por vir, entre elas, sair de um trabalho, sair de casa, me afastar de amigos, família e mudar a rotina. Agradeço à Deus pela vida que tenho levado, por se mostrar sempre cuidadoso e amoroso em me guiar até hoje. Obrigada por se mostrar sempre perto, me dando força e coragem.

Nada seria possível sem os meus pais, Roberto e Valéria, com apoio e amor incondicionais. Sempre me incentivando e sendo um chão firme. Um chão onde posso me apoiar sem medo de nada, sempre sendo eu mesma.

Já no mestrado, nos primeiros meses identifiquei o Bruno e conversei com ele para trabalharmos juntos. Foi divertido descobrir ao longo do tempo quão parecidos e diferentes nós somos. Agradeço por ser um orientador sempre disposto a ajudar, a ouvir, a conversar. É impossível para mim (e sei que para os meus pais também) dizer o quanto significou cada momento de ajuda, de conversa e de comemoração, de incentivo. Jamais poderei agradecer pelas oportunidades e pelo crescimento que me deu. Espero que sempre seja sempre um amigo. Repito as palavras de Daniel: “um exemplo de pesquisador”.

Agradeço ao grupo de pesquisa (e de amigos), em especial, Daniel e Thomaz. Sempre dispostos a ter conversas e discussões. Me incentivaram, deram a mão e com certeza me fizeram crescer também.

A maioria dos dias passaram-se dentro da sala de estudos. Uma sala que muito além dos estudos, tem cuidado, amizade, risadas, conversas, lanches e abraços. Nela, tinha sempre os amigos, que formaram uma “família daqui”. Alguns também vieram de longe, como Alan, Luana, Luiza e Rodrigo, e uns que são daqui de perto, Alexandre, André e Vinícius. Não posso ignorar os agregados dessa família, ao Igor, amigo que me completa e Cínthia, agregada de outro curso, que cada dia é mais amiga. Não imaginava que iria encontrar amigos tão importantes, tão incríveis assim.

Agradeço aos amigos de Teresina, sempre em contato, sempre tirando um tempo pra me ver, pra rir junto, pra ajudar, pra ta ali, mesmo longe. Saudades sempre.

Agradecimentos a UFMG, CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo amparo concedido para o desenvolvimento da pesquisa.

*Ai, ai, ai,ai  
Que saudades do Piauí  
Ai, ai, ai,ai  
Qualquer dia  
Estarei por ai*

*[...]*

*Terra onde o sol brilha mais  
Não existem dois iguais  
Só conheço o do meu Piauí*

*[...]*

*Em um santuário a rezar  
Poetas que sabem dizer  
Belezas de enternecer  
Que um dia me farão voltar*

*-Luiz Gonzaga*

*“A água é a força motriz de toda a natureza.”*

*-Leonardo da Vinci*

## RESUMO

As redes de distribuição de água (RDA), responsáveis por distribuir água em quantidade e qualidade adequadas, são vulneráveis à ocorrência de vazamentos, rupturas de tubos e intrusões de contaminantes. Estes impactam negativamente a hidráulica e a qualidade da água. Dessa forma, é importante que os atores de processos decisórios de diversas áreas, como planejamento e gestão da rede, identifiquem os elementos críticos da rede para elaborar estratégias mais assertivas de manutenção, contribuindo para a melhoria de desempenho do sistema e para prevenção de falhas. Com o propósito de identificar elementos críticos nos sistemas de abastecimento de água, este estudo visa realizar uma avaliação de risco relacionada a eventos como vazamentos, rupturas de tubulações e intrusão de contaminantes. Para atingir esse objetivo, a abordagem utilizada é a Teoria das Redes Complexas (TRC), uma alternativa às abordagens convencionais, que se fundamentam na realização de múltiplas simulações hidráulicas por meio de softwares de modelagem. Vale ressaltar que, à medida que a extensão da rede aumenta, o tempo necessário para conduzir tais simulações sob essas abordagens tradicionais também cresce significativamente. A TRC é um ramo da matemática discreta que estuda as características (conectividade, robustez) de redes para analisar seu comportamento e dinâmica. Para realizar esse tipo de análise, a RDA pode ser modelada como uma rede complexa, em que nós de demanda, tanques e reservatórios são representados por vértices e as arestas fazem referência às tubulações, bombas e válvulas. Assim, a fim de avaliar a importância de tubos e nós, foram aplicadas métricas de robustez, redundância, centralidade e conectividade aos grafos, gerados pela abstração matemática das RDA. As três falhas foram modeladas pelo uso do software EPANET, para avaliar os impactos em relação aos parâmetros hidráulicos (pressão e vazão) e ao espalhamento de substância na rede. Em seguida, aplicou-se métricas de TRC, como cálculos de caminhos mais curtos entre vértices de fonte e de demanda de água para avaliar a importância dos tubos, e métricas de centralidade de vértices para avaliar a influência de nós na rede. Os resultados das simulações hidráulicas são comparados com os resultados da aplicação de métricas nos grafos. A convergência dos resultados indica uma redução de recurso e tempo computacional para analisar o risco em redes de distribuição de água destes três tipos de falhas.

Palavras-chave: mapa de risco; ruptura; vazamento; intrusão de contaminante.

## ABSTRACT

Water Distribution Networks (WDNs), responsible for distributing water in adequate quantity and quality, are susceptible to leaks, pipe ruptures, and contaminant intrusions, negatively impacting hydraulics and water quality. Therefore, it is crucial for decision-makers in various domains, such as network planning and management, to identify critical elements within the network to formulate more effective maintenance strategies, thereby enhancing system performance and preventing failures. With the aim of identifying critical elements in water supply systems, this study seeks to conduct a risk assessment related to events such as leaks, pipe ruptures, and contaminant intrusions. To achieve this objective, the approach employed is the Complex Networks Theory (CNT), an alternative to conventional methods relying on multiple hydraulic simulations through modeling software. It is noteworthy that, as the network's scope increases, the time required to conduct such simulations under traditional approaches also significantly escalates. CNT is a scientific discipline examining network characteristics (connectivity, robustness) to analyze its behavior and dynamics. To conduct this type of analysis, the WDN can be modeled as a complex network, where demand nodes, tanks, and reservoirs are represented as vertices, and edges correspond to pipes, pumps, and valves. In order to assess the importance of pipes and nodes, metrics of robustness, redundancy, centrality, and connectivity are applied to the graphs generated by the mathematical abstraction of WDNs. The three types of failures are modeled using the EPANET software to evaluate their impacts on hydraulic parameters (pressure and flow) and substance spreading in the network. Subsequently, CNT metrics, such as calculating shortest paths between source and water demand vertices to assess the importance of pipes, and vertex centrality metrics to evaluate node influence on the network, are applied. The results of hydraulic simulations are then compared with the outcomes of metric application on graphs. The convergence of results indicates a reduction in resources and computational time required to analyze the risk in water distribution networks for these three types of failures. This study contributes to advancing knowledge by proposing an innovative approach to risk assessment in WDNs, overcoming the limitations of conventional methods. By adopting CNT, more efficient analyses can be conducted, providing valuable insights for the development of targeted maintenance strategies, thus promoting the improvement of water distribution system performance and the prevention of failures.

Keywords: risk map; rupture; leak; contaminant intrusion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O problema das pontes de Königsberg: a) as sete pontes de Königsberg; b) representação do problema em grafo .....	29
Figura 2 - Redes de amizades de crianças: a) no Ensino Infantil e b) no Ensino Fundamental; Redes de informação mais estudadas: c) rede de citação de artigos acadêmicos e d) a World Wide Web, rede de páginas acessíveis pela Internet. ....	30
Figura 3 – Exemplo de grafo direcionado e ponderado com suas respectivas matrizes de adjacência sem e com peso .....	32
Figura 4 – Rede Modena com identificação dos reservatórios e dos tubos críticos citados ao longo deste trabalho.....	47
Figura 5 – Rede E-Town .....	48
Figura 6 – Mapas de risco de rupturas da Rede Modena: a) número de nós que sofreram desabastecimento durante uma ruptura; b) número de desconexões de nós das fontes a cada remoção de aresta .....	49
Figura 7 – Comparação entre mapas: a) mapa de risco de ruptura normalizado com arestas que, ao serem removidas, acarretaram em um maior número de desconexões de nós das fontes; b) rede troncal da rede Modena com hierarquia de 10% .....	52
Figura 8 – Mapas de risco de vazamentos da Rede Modena: a) número de nós que sofreram desabastecimento durante os cenários de vazamentos; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda .....	53
Figura 9 – Mapas de risco de vazamentos: a) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo direcionado; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo não direcionado .....	54
Figura 10 – Mapas de risco de intrusão de contaminante da Rede Modena: a) número de nós que foram atingidos pelo contaminante; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda.....	55
Figura 11 – Mapas de risco de ruptura da Rede E-Town: a) número de nós que sofreram desabastecimento nos cenários de ruptura de cada trecho; b) número de nós que foram desconectados de suas fontes d'água ao retirar uma aresta do grafo .....	56
Figura 12 – Mapas de risco de ruptura da Rede E-Town: a) rede troncal com hierarquia de 10%; b) número de nós que foram desconectados de suas fontes d'água ao retirar uma aresta do grafo .....	57

Figura 13 – Mapas de risco de vazamentos da Rede E-Town: a) número de nós que sofreram desabastecimento nos cenários de inserção de vazamento em cada nó; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda.....	58
Figura 14 – Mapas de risco de vazamentos: a) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo direcionado; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo não direcionado.....	59
Figura 15 – Mapas de risco de intrusão de contaminante da Rede E-town com o número de nós que foram atingidos pelo contaminante ao inseri-lo em determinado nó: a) considerando o coeficiente de massa (“bulk”) igual a -1; b) considerando o coeficiente de massa igual a 0 .....	60
Figura 16 – Mapas de risco de intrusão de contaminante da Rede E-Town: a) número de nós que foram atingidos pelo contaminante ao inseri-lo em determinado nó (com coeficiente de massa = 0); b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda .....	60
Figura 17 – Mapas de risco de intrusão de contaminante da Rede E-Town: a) número de nós que foram atingidos pelo contaminante ao inseri-lo em determinado nó (com coeficiente de massa = -1); b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda .....	648

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

RDA – Rede de Distribuição de Água

TRC – Teoria de Redes Complexas

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVOS .....	18
2.1	Objetivo Geral .....	18
2.2	Objetivos Específicos .....	19
3	REVISÃO DA LITERATURA .....	19
3.1	Análise de risco de redes de distribuição de água .....	21
3.1.1	Simulações hidráulicas e de qualidade .....	24
3.1.2	PDA vs. DDA .....	27
3.2	Teoria de redes complexas .....	28
3.2.1	Teoria de redes complexas em redes de distribuição de água .....	32
3.3	Teoria de redes complexas aplicada a análise de risco de redes de distribuição de água .....	38
4	METODOLOGIA .....	39
4.1	Ruptura de tubulações .....	39
4.1.1	Simulação hidráulica da rede .....	39
4.1.2	Aplicação de teoria de redes complexas .....	41
4.1.3	Avaliação dos desempenhos dos métodos .....	42
4.2	Vazamentos .....	43
4.2.1	Simulação hidráulica da rede .....	43
4.2.2	Aplicação de teoria de redes complexas .....	43
4.2.3	Avaliação dos desempenhos dos métodos .....	44
4.3	Intrusão de contaminante .....	44
4.3.1	Simulação de qualidade da água .....	44
4.3.2	Aplicação de teoria de redes complexas .....	46
4.3.3	Avaliação dos desempenhos dos métodos .....	46
5	ESTUDOS DE CASO .....	46
5.1	Rede Modena .....	46
5.2	Rede E-Town .....	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
6.1	Rede de distribuição de água - Modena .....	48
6.1.1	Análise de risco de tubos .....	48
6.1.2	Análise de risco de nós .....	53
6.2	Rede de distribuição de água – E-Town .....	55
6.2.1	Análise de risco de tubos .....	55
6.2.2	Análise de risco de nós .....	57

7 CONCLUSÕES .....	61
REFERÊNCIAS.....	64

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de fornecimento de água, devido à sua natureza dinâmica e complexa, associados a uma variedade de dispositivos de controle, tais como bombas e válvulas, estão suscetíveis a falhas frequentes que podem prejudicar ou até mesmo impossibilitar o fornecimento de água aos consumidores. Uma vez que impactam diretamente os consumidores, resultando na falta de abastecimento, a ocorrência de tais falhas é amplamente divulgada pelos veículos de comunicação. Os jornais relatam os efeitos adversos decorrentes de rupturas e vazamentos, destacando os impactos no tráfego (TV Globo; g1 SP, 2022), vias danificadas ou com interrupções para reparos. Adicionalmente, são documentados os impactos no abastecimento, com a população enfrentando períodos que podem se estender de três a 15 dias sem água (Alcântara; Souza, 2023), sendo mais agravante durante épocas do ano com elevadas temperaturas (Balbino, 2022).

Resiliência é a capacidade da RDA de funcionar, abastecendo os consumidores, sob condições de falha ou estresse. Este conceito foi estudado inicialmente por Todini (2000), que apresenta a importância de considerar a resiliência no dimensionamento da rede, para que ela consiga lidar com falhas e aumentar a confiabilidade do abastecimento. Nesse sentido, a resiliência das redes de distribuição de água (RDA) deve ser avaliada com o objetivo de mitigar os potenciais impactos decorrentes de eventos de falha (Meng *et al.*, 2018). Ao conduzir essa análise, visa-se aprimorar a capacidade da rede de fornecer água em quantidade e qualidade adequadas aos seus consumidores. Esse fornecimento pode ser prejudicado significativamente por falhas, tais como a ruptura de tubos, vazamentos e a intrusão de contaminantes. Nesse contexto, cenários de falhas devem ser avaliados por tomadores de decisões envolvidos nas áreas de planejamento e gestão da rede (Pagano; Giordano; Portoghese, 2022).

Para o estudo da resiliência da rede é necessário simular diversos cenários das falhas para identificar o mais crítico. A literatura apresenta, como via principal, as simulações hidráulicas (Berardi *et al.*, 2014; Bristow; Brumbelow; Kanta, 2007; Diao *et al.*, 2016; Gheisi; Naser, 2014; Kanta; Brumbelow, 2013) e, mais recentemente, a modelagem via teoria de redes complexas (TRC) (Di Nardo, Armando *et al.*, 2018; Giudicianni *et al.*, 2018; Hajibabaei *et al.*, 2023; Meng *et al.*, 2018; Sitzenfreni *et al.*, 2020). Diao *et al.*

(2016) realizaram um trabalho extenso, simulando todas as combinações de falhas nos componentes de uma rede, para ruptura de tubos, demanda excessiva e intrusão de substâncias. Avaliaram a resiliência dos sistemas sob diferentes níveis de estresse e destacou pelos autores que houveram cenários que não convergiram a um resultado, devido a mau condicionamento das equações do programa utilizado e assim foram necessárias simplificações, realizando simulações guiadas pela demanda e não pela pressão<sup>1</sup>.

Por outro lado, utilizando as simulações de forma mais restrita, Boryczko *et al.* (2021) analisaram a ruptura de quatro tubos, já identificados previamente como importantes pelos autores e obtiveram mapas de pressão da rede para determinar as áreas mais críticas e avaliar intervenções que aumentassem a resiliência da rede. Os autores destacaram que realizar as simulações dos cenários é especialmente útil em pequenos sistemas de distribuição de água.

Os modelos de simulação hidráulica podem ser utilizados para simular cenários de falhas e identificar os elementos que são mais críticos por impactarem mais a rede. No entanto, à medida que o tamanho das redes testadas aumentam, aplicando em grandes redes reais, o número de variáveis crescem, levando ao aumento do tempo de simulação (em função da quantidade de componentes hidráulicos da rede) e dos requisitos de memória computacional (Candelieri; Perego; Archetti, 2018). Assim, como alternativa aos modelos hidráulicos para quantificar a criticidade dos elementos, existe a TRC. Essa teoria é aplicável a redes que possuem elementos que interagem entre si, com formato irregular e que possuem seu funcionamento explicado pela sua topologia (Giudicianni *et al.*, 2018).

Ulusoy *et al.* (2018) conduziram simulações hidráulicas com o objetivo de determinar a parcela máxima de demanda que a rede pode atender em cenários de ruptura de tubulações. Conjuntamente, eles desenvolveram uma métrica baseada em TRC capaz de identificar os trechos críticos para a resiliência da rede. No entanto, essa métrica não é capaz de modelar com precisão o comportamento hidráulico da RDA

---

<sup>1</sup> Simulação hidráulica dirigida pela demanda enfoca a modelagem do sistema com base nas variações de consumo de água ao longo do tempo, priorizando a resposta às necessidades dos usuários. Já a simulação dirigida pela pressão concentra-se na análise das variações de pressão dentro do sistema, visando garantir uma distribuição eficiente e estável da água.

ou avaliar a demanda extraordinária que a rede é capaz de atender. Na modelagem hidráulica, devido ao tempo computacional para realizar as análises de resiliência aumentar rapidamente com o tamanho da rede, foi necessário restringir a análise a um subconjunto menor de trechos. Além disso, destacou-se que o tempo para aplicar a métrica de TRC na rede foi menor que o tempo para realizar a modelagem hidráulica (30 minutos versus 30 horas).

Uma alternativa metodológica para modelar a RDA como uma rede complexa, a fim de analisar sua resiliência, foi proposta por Pagano *et al.* (2022). Este enfoque envolve a aplicação de um conjunto de métricas destinadas a estabelecer uma hierarquia de criticidade dos tubos na rede, sendo essa hierarquia consolidada por meio de uma estrutura de rede bayesiana. É relevante ressaltar que esta abordagem não se vale de simulações hidráulicas, embora a utilização de um grafo ponderado permita a incorporação de algumas propriedades essenciais do sistema, possibilitando, assim, a representação de algumas características físicas das condições de escoamento da rede.

Estudos demonstraram que o uso de métricas que ignoram a direção das arestas em redes, especialmente em casos como redes biológicas, onde as interações são inerentemente direcionais, pode levar à perda de informações críticas e dificultar análises precisas (Aparicio; Ribeiro; Silva, 2017). Além disso, descobriu-se que a consideração dos pesos das arestas nas redes é crucial para detectar padrões que seriam negligenciados ao usar gráficos não ponderados, enfatizando a importância de incorporar pesos na análise de sistemas complexos como redes de distribuição de água (Li *et al.*, 2011).

Vários aspectos importantes de redes complexas só puderam ser descritos incorporando elementos como pesos de arestas aos grafos análogos a redes, utilizado por (Barrat *et al.*, 2004) que, aplicando em sistemas de redes sociais e de infraestruturas, os pesos relacionados a capacidade das arestas, com o intuito de avaliar a heterogeneidade das forças das conexões e propriedades complexas estatísticas, os resultados obtidos apresentaram melhores descrições das hierarquias e dos princípios organizacionais em redes ponderadas dos sistemas. Assim como foi utilizado na decomposição de redes sociais multimilionárias em grupo de indivíduos

com padrões de atividades comuns (Palla; Barabási; Vicsek, 2007). Yazdani e Jeffrey (2012) introduziram uma técnica que se apoia na utilização das informações dos componentes do sistema de distribuição de água na ponderação de grafos. Essa técnica visa fortalecer a analogia entre grafos abstratos e os sistemas reais de distribuição de água.

Outro elemento que pode ser associado aos grafos é a direção das arestas, (Yu; Gerstein, 2006) estudaram as hierarquias das relações proteína-proteína, comparando com as de redes sociais, utilizando algoritmos para encontrar hierarquias genéricas, buscando identificar quais os fatores de transcrição que são mais importantes para a viabilidade de uma célula. Em um estudo hierárquico foi importante a utilização de grafos direcionados.

Por conta do potencial impacto das falhas na RDA, este estudo tem como objetivo realizar uma análise das consequências dessas falhas, visando a identificação dos elementos mais críticos, cuja falha afeta o maior número de consumidores, seja com variações de pressão e desabastecimento (no caso de rupturas e vazamentos), ou áreas mais amplas afetadas por contaminantes (no caso de intrusão de contaminantes). As análises foram conduzidas por meio de simulações hidráulicas e de qualidade da água, assim como pela modelagem com base na TRC e aplicação de métricas relacionadas à avaliação dos elementos críticos na rede complexa. Para a modelagem da RDA como uma rede complexa, seguiram-se as recomendações da literatura, considerando aspectos como direção e ponderação das arestas dos grafos e diferenciação entre os vértices que representam nós de demanda e nós de fontes d'água (reservatórios). Estas comparações de modelagens, foram aplicadas em redes de referência da literatura.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Investigar a aplicação de teoria de redes complexas na gestão de sistemas de abastecimento de água, determinando zonas de riscos relacionados a rupturas, vazamentos e intrusão de contaminantes.

## 2.2 Objetivos Específicos

- Investigar as aplicações da teoria de redes complexas na avaliação de vulnerabilidade de redes de abastecimento de água;
- avaliar comportamento da rede de distribuição de água, em relação a desabastecimento e variação de pressão, frente a vazamentos e rupturas;
- desenvolver mapas de risco da rede referente a vazamentos, intrusões de contaminante e rupturas, baseados em simulações hidráulicas e modelagem via teoria de redes complexas.

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

A RDA é responsável por garantir a entrega contínua de água em quantidade e qualidade adequadas aos consumidores, sendo fundamento para o bem estar da população. Potenciais impactos decorrentes da não observância dessa obrigação incluem repercussões econômicas e um significativo risco à saúde pública. Falhas, como a ruptura de tubulações, vazamentos e a intrusão de contaminantes, podem comprometer o fornecimento apropriado da água, demandando avaliação por parte dos tomadores de decisões envolvidos nas áreas de planejamento e gestão da rede (Pagano; Giordano; Portoghese, 2022).

A ruptura de um tubo pode ocorrer por diversas razões, incluindo o envelhecimento do material do tubo, qualidade do material, abrasividade do solo em contato com a tubulação, carga sobre a tubulação, qualidade da manutenção e pressões de golpe de aríete (Neelakantan; Suribabu; Lingireddy, 2008). Essas rupturas são associadas a custos diretos, como custos de reparo do tubo, interrupção do serviço e significativa perda de água que poderia ter sido comercializada aos consumidores (Giustolisi; Laucelli; Savic, 2006). Adicionalmente, há custos indiretos, com inconveniências em vários níveis, como interrupção do tráfego e atrasos de abastecimento a demandas elevadas, como em situações de combate a incêndios.

Pelletier *et al.* (2003) investigaram a probabilidade de ruptura de tubos, considerando parâmetros como idade, diâmetro e material, aplicado a três estudos de caso envolvendo redes de cidades italianas. Os autores concluíram que existiam relações entre esses parâmetros e a probabilidade de falha, embora tenham observado que o

rápido crescimento de uma das cidades pode ter ocasionado em má qualidade de materiais e técnicas de instalação, contribuindo para a ocorrência de ruptura dos tubos. Os autores reconheceram que a principal dificuldade em desenvolver um modelo matemático para análise de rupturas, reside na escassez de dados sobre a rede e as ocorrências de rupturas. Os autores utilizaram três cidades com breves históricos de rupturas, reconhecendo, assim, as incertezas associadas aos valores dos parâmetros utilizados na calibração do modelo.

Os vazamentos representam outro tipo de falha que pode ter impacto direto tanto no funcionamento hidráulico da rede quanto na qualidade da água. Este tipo de falha pode surgir devido a problemas na infraestrutura, tais como corrosão, envelhecimento ou defeitos de soldagem do tubo, assim como devido a deficiência operacional ou a impactos externos (Fang *et al.*, 2023). Com o propósito de facilitar tomadas de decisões nas áreas de manutenção da rede, esses autores buscaram modelar o ciclo de vida de um tubo, segmentando-o em fases, determinadas pela espessura da parede do tubo durante uma inspeção e pela aplicação de funções probabilísticas. Essas fases foram definidas como: introdução, maturidade, envelhecimento, terminal e, por fim, ruptura ou vazamento. Outros estudos, como o de Zhou (2010) propõe uma classificação das falhas em vazamentos pequenos, grandes ou rupturas, dependendo se a corrosão ativa ocorre através da parede do tubo, ou se ocorre um colapso devido a pressões internas no ponto de corrosão, antes da corrosão romper a parede do tubo.

Os vazamentos apresentam riscos a RDA conforme destacado por Barros *et al.* (2023), a presença de vazamentos pode permitir a entrada de contaminantes na rede de distribuição, comprometendo a segurança e a potabilidade do abastecimento, especialmente sob pressões baixas. Além do impacto na qualidade da água, Huang *et al.* (2020) ressaltam que vazamentos não apenas resultam na perda de água, mas também implicam em aumento do consumo de energia para bombear e tratar a água, impactando financeiramente, uma vez que demandam custos adicionais para a produção e distribuição de água que está sendo desperdiçada.

A intrusão de contaminantes em uma RDA é uma preocupação significativa devido ao potencial impacto adverso na saúde pública e na integridade do sistema de abastecimento de água. Essa falha ocorre quando contaminantes penetram na rede,

seja por meio de rachaduras em tubulações, vazamentos ou refluxo em conexões cruzadas (LeChevallier *et al.*, 2003).

A ocorrência de contaminação envolve diversas variáveis, como indicado por Mansour-Rezaei *et al.* (2014), sendo necessários três pré-requisitos: a presença de uma fonte contaminante próxima ao sistema, a existência de uma força-motriz (pressão do escoamento menor que a pressão externa ao tubo) e um caminho de entrada (deficiências estruturais). A operação de uma RDA visa protegê-la contra esta entrada de contaminantes, por meio do escoamento forçado, que ocupa integralmente a seção geométrica do tubo, sem contato com o meio externo, mantendo a pressão na parede do tubo diferente da pressão atmosférica (PORTO, 2006). É desejável que toda a rede mantenha a pressão acima da atmosférica para garantir que nenhum contaminante entre na tubulação e para evitar o colapso da mesma. Portanto, essa carga de pressão é utilizada para analisar a existência de força-motriz para a intrusão de contaminantes.

As deficiências estruturais podem se manifestar como conexões cruzadas, refluxo, vazamentos, gestão inadequada de reservatórios ou reparo impróprio de tubulações (Viñas; Malm; Pettersson, 2019). A conexão cruzada implica em pontos da rede que permitem o contato entre a água potável e não-potável (Viñas; Malm; Pettersson, 2019). A contaminação ocorre quando a fonte de água não-potável está sob pressão maior que a água potável (força-motriz), e há uma conexão inadequada, seja pela não existência ou pelo mau funcionamento de uma válvula de retenção, resultando no refluxo (United States Environmental Protection Agency, 2002).

Para avaliar a vulnerabilidade da rede diante dessas falhas, a fim de identificar os elementos mais críticos em relação a tais eventos, como a identificação do tubo cuja ruptura possa afetar uma área mais extensa da rede, resultando em redução de pressão ou desabastecimento, torna-se necessário realizar uma análise de risco. Esta análise foi conduzida avaliando as consequências dos cenários de falhas da rede.

### **3.1 Análise de risco de redes de distribuição de água**

Para realizar a análise de risco dos elementos da rede é necessário simular diversos cenários das falhas a fim de se identificar aquele o mais crítico. A literatura apresenta,

como via principal, as simulações hidráulicas (Berardi *et al.*, 2014; Bristow; Brumbelow; Kanta, 2007; Diao *et al.*, 2016; Gheisi; Naser, 2014; Kanta; Brumbelow, 2013) e, mais recentemente, a modelagem via TRC (Di Nardo, A. *et al.*, 2018; Giudicianni *et al.*, 2018; Meng *et al.*, 2018; Sitzenfrei *et al.*, 2020).

Gheisi e Naser (2014) realizaram simulações hidráulicas de rupturas simultaneas em uma rede real e uma de referencia da literatura, para avaliar o comportamento da rede diante de diversos níveis de estresse, porém, para realizar tal trabalho foram necessárias aplicar métodos de simplificação e trabalhar com análise guiada pela demanda. Diao *et al.* (2016) , como continuação, realizaram um trabalho extenso, simulando todas as combinações de falhas nos componentes de uma rede, para ruptura de tubos, demanda excessiva e intrusão de substâncias químicas. Aplicaram em quatro redes de portes diferentes, avaliando a resiliência dos sistemas sob diferentes níveis de estresse. Os autores destacam que alguns cenários não tiveram convergência na solução das equações hidráulicas, devido ao mau condicionamento<sup>2</sup> do sistema de equações não lineares.

Utilizando modelos com menor escala, isto é, com menos nós e tubos, Boryczko *et al.* (2021) analisaram a ruptura de quatro tubos, previamente definidos como importantes pelos autores, de uma rede real localizada no sudeste da Polônia e obtiveram mapas de pressão da rede para determinar as áreas mais críticas e avaliar intervenções que aumentassem a resiliência da rede. Os autores destacaram que realizar as simulações dos cenários é especialmente útil em pequenos sistemas de distribuição de água.

Hatam *et al.* (2019) utilizaram a integração da simulação hidráulica dirigida pela pressão com os modelos de avaliação quantitativa de risco microbiano para uma análise de risco de contaminação da água resultante de uma intrusão acidental em condições de pressões baixas. Assim, analisaram os padrões de demanda, a concentração de *Cryptosporidium* no espaço e no tempo, e avaliando quantas pessoas poderiam ser atingidas.

---

<sup>2</sup> O EPANET pode não conseguir convergir quando válvulas, bombas ou tubulações mudam seus status de uma tentativa para a outra em meio a busca de uma solução hidráulica ou quando alguma parte do sistema exige água, mas não possui ligações que a conectem fisicamente a uma fonte d'água.

Berardi *et al.* (2014) empregaram técnicas de otimização multi-objetivo para analisar quais os cenários mais críticos da rede. Modificaram a topologia da mesma para avaliar o impacto de rupturas na rede como um todo. Observou-se que além da remoção dos tubos conectados diretamente aos reservatórios, tanques ou aos tubos contendo bombas, a retirada de outros tubos, mesmo aqueles situados distantes desses elementos da rede, poderia também afetar significativamente a vulnerabilidade do sistema. Isso ocorreu devido a localização estratégica destes tubos, essenciais para o abastecimento de uma considerável porção da rede.

No âmbito da análise de vazamentos, seus impactos foram objeto de estudo por Barros *et al.* (2023). Os autores examinaram a sensibilidade das mudanças nos parâmetros hidráulicos e de qualidade durante a simulação computacional de um vazamento, constatando que os parâmetros de qualidade foram mais afetados, com maior variação. Além disso, os autores empregaram uma metodologia para determinar o caminho mais curto percorrido pela água entre os reservatórios e os pontos de vazamento, fornecendo informações pertinentes às alterações no fluxo para futuras implementações em sistemas de detecção.

A análise das intrusões de contaminantes tem sido objeto de extenso estudo, visando compreender suas causas e avaliar a probabilidade de ocorrência. Diversas abordagens têm sido empregadas nesse sentido, como a investigação das pressões negativas, que representam a força motriz para a entrada de contaminantes (Besner *et al.*, 2010). Pesquisa realizada por Jones *et al.* (2019) incluiu experimentos laboratoriais para estabelecer a relação entre o volume de contaminante que entra na rede e os valores de pressão de eventos de transiente.

Adicionalmente, diversas ferramentas de análise de risco têm sido empregadas, como aquela descrita por Vairavamoorthy, Yan e Gorantiwar, (2007), que elabora mapas de risco de intrusão de contaminantes. Esta ferramenta utiliza mapas temáticos da rede de distribuição de água, bem como das redes de esgoto e drenagem, para identificar potenciais fontes de contaminação. Para a construção do mapa de risco definitivo de intrusão de contaminantes, é necessária também a inclusão de informações sobre as condições das tubulações.

Para otimizar o posicionamento dos sensores destinados ao controle da qualidade da água distribuída e à detecção de contaminantes, Rathi *et al.* (2016) recorreram a simulações hidráulicas. Entretanto, visando mitigar a carga computacional, propuseram uma metodologia para reduzir a quantidade de cenários necessários à análise, de modo a adequar mais precisamente as posições dos sensores próximas a áreas com maior suscetibilidade à contaminação. Esse refinamento considerou as condições dos tubos, a localização dos esgotos, canais de drenagem ou outras fontes poluentes nas imediações da rede, assim como o trabalho descrito anteriormente.

Outros estudos, como o de Lee *et al.* (2022), têm desenvolvido mapas de risco mais focados no espalhamento do contaminante, para avaliar tanto os nós quanto a rede como um todo. Utilizando o software EPANET-MSX, foram elaborados cenários de intrusão de contaminantes em rede ramificada e em rede com anéis. O risco associado aos nós é determinado pelo risco médio de infecção em cada nó para todos os cenários de intrusão do vírus. Essa métrica permite identificar os nós mais vulneráveis à intrusão. Por sua vez, o risco da rede é calculado com base no risco médio da rede em um único cenário de intrusão do vírus, representando a severidade desse cenário específico.

### 3.1.1 Simulações hidráulicas e de qualidade

O EPANET 2.2 é um software de simulação hidráulica e de qualidade da água projetado para realizar simulações em redes de condutos pressurizados ao longo de extensos períodos (Rossman *et al.*, 2020). Este programa possibilita a análise de escoamento permanente, o qual é caracterizado por propriedades que não variam com o tempo (Netto *et al.*, 1998). No entanto, ao ajustar os padrões de demanda para refletir as flutuações nos níveis de consumo ao longo do dia, considerando fatores como horário, sazonalidade e características demográficas, torna-se viável simular diferentes estados permanentes do escoamento. A capacidade de conduzir simulações por períodos prolongados proporciona uma representação mais realista da rede, permitindo que o software capture as variações na demanda de consumo, nos níveis dos reservatórios, assim como nos horários de operação das bombas e válvulas.

Este programa pode ser empregado na construção de modelos de redes, análise do teor de cloro residual e avaliação da exposição do consumidor a incidentes, entre outras aplicações. Destaca-se que o EPANET 2.2 possui parâmetros de entrada editáveis e permite a exportação de dados por meio de editores de texto, utilizando o formato ".inp".

Para efetuar a simulação do comportamento da rede, o EPANET realiza o cálculo das pressões nos nós e das vazões nos tubos para valores fixos de nível nos reservatórios e tanques, e de demanda de água, em uma sequência de passos de tempo determinados pelo arquivo de entrada. Entre cada passo de tempo, os valores de demanda e nível nos reservatórios são atualizados de acordo com as suas respectivas configurações predefinidas. Os valores de pressões e vazões em cada passo de tempo envolve a solução simultânea a equação de conservação de massa em cada nó, conforme a Equação (1), e da conservação de energia em cada trecho, segundo a Equação (2). Esse processo, conhecido como balanço hidráulico da rede, requer o uso de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas. O EPANET aplica o algoritmo do gradiente global<sup>3</sup> com essa finalidade (Rossman *et al.*, 2020).

$$\sum q_{ij} - D_i = 0 \quad (1)$$

Esta equação de conservação de massa no nó  $i$  assegura que a vazão que entra em um nó é igual à vazão que sai dele. Assim,  $q_{ij}$  representa a vazão no tubo que conecta os nós  $i$  e  $j$ , enquanto  $D_i$  indica a demanda requerida a ser suprida no nó  $i$ .

$$h_i - h_j = h_{Lij}(q_{ij}) \quad (2)$$

A conservação de energia pelo tubo que conecta os nós  $i$  e  $j$  implica que  $h_i$  e  $h_j$  representam as cargas hidráulicas de cada nó, respectivamente. Além disso,  $h_{Lij}$  refere-se à perda de carga do tubo que conecta  $i$  a  $j$ , e  $q_{ij}$  representa a vazão nesse mesmo tubo.

---

<sup>3</sup> EPANET usa o algoritmo de gradiente global de Todini para resolver o sistema de equações. Este método consiste na solução de uma matriz de equações lineares de carga dos nós e na aplicação de uma fórmula para correção das vazões, mantendo a conservação da continuidade da vazão em cada nó. As iterações continuam até algum critério de convergência ser atendido, como erro residual das equações de conservação ou mudanças insignificantes das vazões.

É possível realizar a simulação de qualidade da água em conjunto com a simulação hidráulica da rede, utilizando o mesmo software, o EPANET 2.2. As RDA consistem em bombas, tubos, válvulas, que formam o caminho da água entre os pontos de fontes de água até os consumidores. A simulação de qualidade do EPANET 2.2 utiliza uma abordagem lagrangiana do tempo, trabalhando com passos de tempo discretos, enquanto as substâncias são transportadas pelos tubos e misturadas nos nós (Rossman *et al.*, 2020). Para cada passo de tempo, o conteúdo de cada trecho está submetido à reação, é realizado um cálculo acumulado, utilizando os princípios de conservação de massa e a cinética de reação, considerando o transporte advectivo pelos tubos, Equação (1), mistura nos nós dos tubos e mistura em reservatórios (Shang; Uber; Rossman, 2008).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (3)$$

Em que,  $C_i$  é a concentração (mg/L) do tubo  $i$  em função da distância  $x$  no tempo  $t$ ,  $u_i$  é a velocidade de escoamento no tubo  $i$  (m/s) e  $r$  é a taxa de reação em função da concentração (mg/L/hora).

Para este tipo de análise existem duas fases dentro do sistema de distribuição de água: uma fase móvel do volume de água e uma fase fixa da superfície do tubo. As espécies que funcionam na fase móvel são componentes químicos ou biológicos que existem na rede e são transportados por ela na velocidade média da água, por exemplo, constituintes dissolvidos, como íons de cloro, ou constituintes suspensos, como bactérias ou partículas inorgânicas (Shang; Uber; Rossman, 2008). Enquanto uma substância passa por um tubo, ela pode reagir com constituintes da água. A taxa de reação ( $r$ ) geralmente pode ser descrita como uma função da concentração, como na Equação (1) (Rossman *et al.*, 2020).

$$r = K_b \cdot C^n \quad (4)$$

Em que,  $K_b$  é a constante da reação de massa,  $C$  é a concentração da substância e  $n$  é a ordem de reação. Neste trabalho, foi considerado que o contaminante possui a primeira ordem de decaimento, dessa forma, o  $n$  tem valor de 1.

As espécies da superfície são componentes presos ou incorporados à parede do tubo e assim, imóveis, como bactérias incorporadas no biofilme, ferro oxidado ou material particulado sedimentado.

### 3.1.2 PDA vs. DDA

A RDA tem a responsabilidade de fornecer água aos consumidores em condições normais, enquanto simultaneamente é operada para assegurar uma pressão adequada para lidar com anomalias no sistema. A simulação conduzida por meio da análise dirigida pela demanda considera que as demandas nos nós são atendidas, sem levar em conta a pressão disponível no nó (Hamed *et al.*, 2022). Os resultados desse tipo de análise sempre indicarão que os consumidores estão sendo abastecidos, mesmo que o nó esteja sujeito a pressões negativas, ultrapassando as toleradas pelo tubo ou abaixo da pressão de vapor, situação que poderia resultar em cavitação e que não é contemplada pelo software. Em situações de deficiência de pressão, esse tipo de análise não consegue representar com precisão o que realmente ocorre na rede.

Na análise conduzida pela demanda, ocorrem pressões negativas quando a perda de carga entre a fonte e o nó é superior à carga hidráulica disponível na fonte. Isso acontece principalmente quando a demanda do nó excede a vazão disponível para transporte pelos tubos, com base na carga fornecida pela fonte de água disponível (Conety Ravi *et al.*, 2019).

Na realidade, a vazão entregue aos nós da rede ( $q_{Di}$ ) está associada com a carga de pressão que chega nos nós ( $p_i$ ). Este tipo de modelagem é referenciada na literatura como análise dirigida pela pressão e a relação entre estes dois parâmetros pode ser estabelecido seguindo as seguintes regras (Pacchin; Alvisi; Franchini, 2017), da Equação (5):

$$q_{Di} = \begin{cases} 0, & \text{se } p_i \leq P_0 \\ D_i \left( \frac{p_i - P_0}{P_f - P_0} \right)^{1/e}, & \text{se } P_0 < P < P_f \\ D_i, & \text{se } p_i \geq P_f \end{cases}, \quad (5)$$

Em que,  $D_i$  é a demanda total do nó  $i$  quando  $p_i$  é maior que  $P_f$ ,  $P_0$  é a pressão sob a qual a demanda atendida é 0 e  $1/e$  é o expoente da função das pressões, geralmente com valor igual a 0,5 para mimetizar o escoamento por um orifício. Se a pressão no nó está abaixo da requerida, então o abastecimento ocorrerá de forma parcial, atendendo somente uma parte da demanda, que é estabelecido em função da pressão que chega nos nós. Porém, se a pressão do nó é acima da requerida para o atendimento pleno da demanda, então o abastecimento foi atendido.

Em situações de pressões baixas, por exemplo, em uma reabilitação de um sistema após um tubo romper ou uma bomba ter sido desligada, é recomendado o uso de análise dirigida pela pressão, para que seja possível identificar onde não está sendo abastecido (Pacchin; Alvisi; Franchini, 2017). Portanto, nesse estudo foram utilizadas simulações hidráulicas dirigidas pela pressão, para avaliar o comportamento da rede frente as falhas.

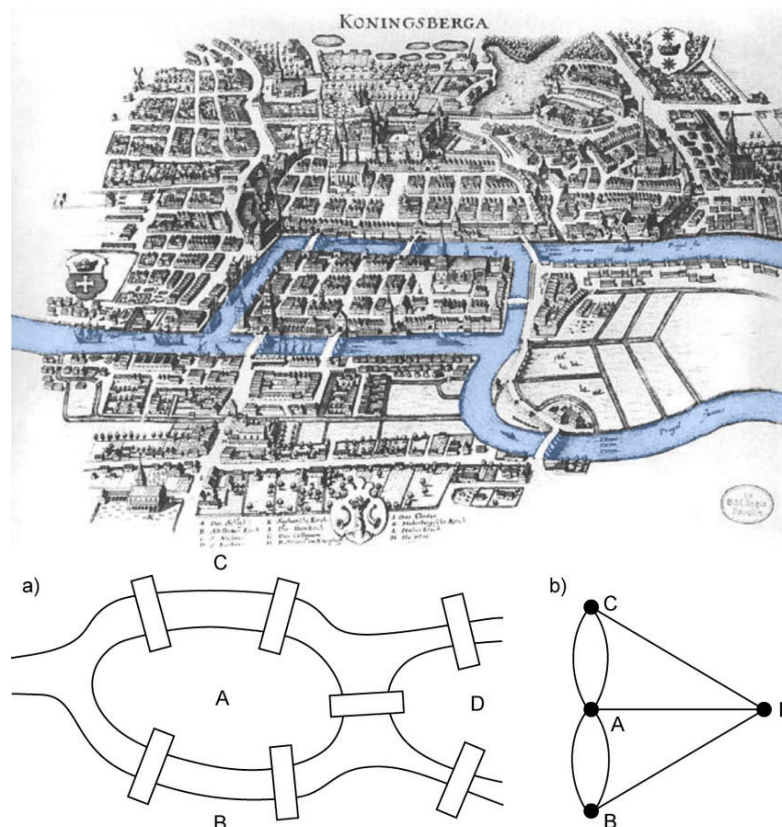
### **3.2 Teoria de redes complexas**

A modelagem da RDA como uma rede complexa oferece uma abordagem inovadora e eficaz para a análise e identificação de elementos críticos dentro dessa rede. A TRC fornece uma estrutura poderosa para compreender e modelar sistemas do mundo real, desde redes sociais até sistemas de transporte e, neste caso, RDA (Barabási,; Newman; Watts, 2003). Como este tipo de modelagem pode ser utilizada para realizar análise de risco, é crucial estabelecer uma compreensão dos conceitos fundamentais envolvidos neste estudo de redes complexas.

Uma rede complexa caracteriza-se pela interação entre seus elementos de forma não-trivial, com milhares de nós e arestas, com diferentes tipos formando um diagrama intrincado, podendo evoluir dinamicamente no tempo e, principalmente, por ter seu comportamento influenciado pela sua topologia. Segundo Strogatz (2001), o estudo das redes pode ser desafiador devido à sua complexidade estrutural, evidenciada por modelos complexos com múltiplas arestas e anéis. Além disso, a dinâmica temporal das redes, como na *World Wide Web*, envolve a criação e remoção constante de páginas e links. Adicionalmente, as redes se destacam pela diversidade de seus elementos, onde as arestas podem possuir diferentes pesos e direções, enquanto os vértices podem apresentar distintos tipos de conexões.

O estudo das redes por meio da teoria dos grafos constitui um dos fundamentos da matemática, com suas origens remontando a 1735, quando o matemático Leonard Euler solucionou o problema das pontes de Königsberg. Nesta cidade, sete pontes conectavam quatro massas de terra, e havia a dúvida se era possível percorrer todas as pontes apenas uma vez. A resposta é negativa, não é possível atravessá-las somente uma vez, porém este não era um simples problema de grafos, pois existiam mais de duas pontes conectando massas de terra. Ao transformar esse desafio em um grafo, com quatro vértices representando as massas de terra e sete arestas representando as pontes, conforme ilustrado na Figura 1, Euler demonstrou que, ao converter certos problemas em grafos, estes se tornam mais simples e a existência de um caminho não depende da capacidade humana de achar, mas que é algo inerente ao grafo (Newman; Barabási; Watts, 2006).

**Figura 1 – O problema das pontes de Königsberg: a) as sete pontes de Königsberg; b) representação do problema em grafo**



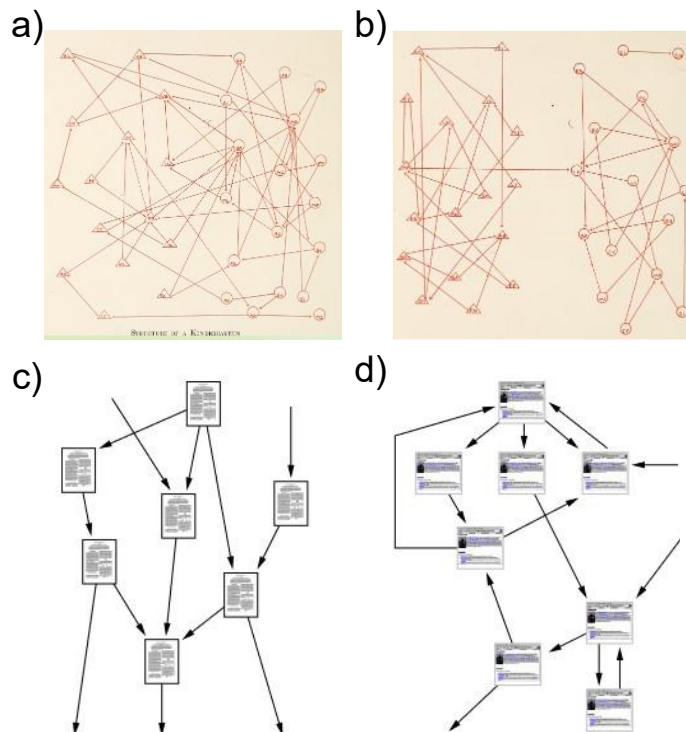
Fonte: Adaptado de (Boguslawski, 2011).

A teoria dos grafos se espalhou e além da matemática, é utilizada na engenharia, na ciência da computação e pesquisas operacionais, podendo ser aplicada em redes das áreas da informação, sociologia e tecnologia, respectivamente, modelando a *World*

*Wide Web* (Barabási; Albert; Jeong, 2000), uma rede de amizade de crianças de uma escola (Moreno, 1934) e redes de distribuição de água (Yazdani; Jeffrey, 2010).

Em 1950, iniciou o uso da teoria dos grafos nas redes sociais, como o estudo já citado, porém estas análises sofriam de imprecisões, subjetividade e tamanho de amostra pequeno (Newman; Barabási; Watts, 2006). Já na década de 1960, aplicaram grafos também em redes de informação, por exemplo, na cadeia de citações de artigos acadêmicos, que formam grafos acíclicos, isto é, não possuem loops fechados, pois um artigo só pode citar os que foram publicados antes dele (Newman; Barabási; Watts, 2006). Já um exemplo de grafos cíclicos de informação é a *World Wide Web* que é uma rede de páginas da internet (vértices) conectadas por *hyperlinks* (arestas), como apresentado na Figura 2. Este tipo de rede possui uma propriedade que permite uma página ser encontrada mais facilmente se é indicada por outra página (Lawrence; Giles, 1999).

**Figura 2 – Redes de amizades de crianças: a) no Ensino Infantil e b) no Ensino Fundamental; Redes de informação mais estudadas: c) rede de citação de artigos acadêmicos e d) a World Wide Web, rede de páginas acessíveis pela Internet**



Fonte: Adaptado de Barabási; Newman; Watts (2003) e Moreno (1934).

Matematicamente, grafos ( $G$ ) são uma coleção  $V$  de vértices, que são conectados por  $E$  arestas (Sadavare; Kulkarni, 2012), seguindo a Equação (6).

$$G = (V, E) \quad (6)$$

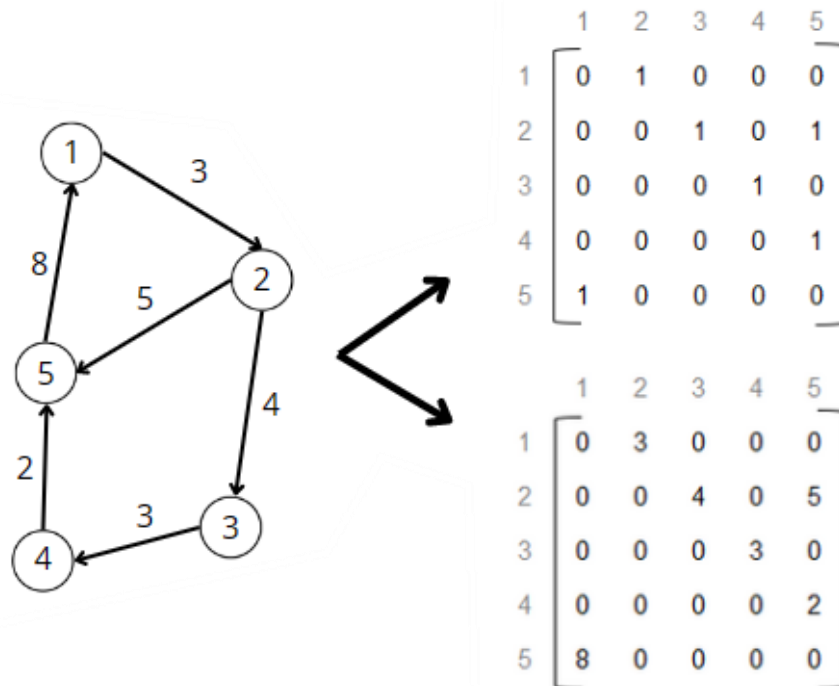
Em que,  $V$  é um conjunto finito de objetos que são representados pelos vértices e  $E$  é um par  $(u, v)$  com  $u$  e  $v$  pertencente ao conjunto  $V$ . Os grafos podem ser caracterizados de acordo com a presença de peso ou direção das arestas (Sadavare; Kulkarni, 2012).

- Grafo direcionado ou digrafo: é um grafo em que cada aresta simboliza uma relação assimétrica entre dois vértices. Geralmente, é representado pela presença de uma seta na aresta.
- Grafo não-direcionado: é um grafo em que existe uma relação simétrica entre dois vértices. O fluxo pode ocorrer nas duas direções.
- Grafo ponderado: é um grafo em que as arestas representam relações que possuem algum valor, por exemplo, distância entre cidades ou tempo de amizade entre duas pessoas.
- Grafo não-ponderado: as relações representadas pelas arestas deste tipo de grafo são consideradas equivalentes.

Um grafo pode ser representado por uma matriz de adjacência, que indica quais vértices estão conectados (DI NARDO et al., 2018; GIUDICIANNI et al., 2018). 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,  $a_{ij} = a_{ji}$ , a matriz é simétrica.

Em casos de grafos ponderados, eles podem ser representados por uma matriz de adjacência ponderada, como apresentado na Figura 3. Nesta matriz, se os vértices estão conectados, então o valor do elemento será igual ao peso associado à relação entre eles (STANKOVIĆ; DAKOVIĆ; SEJDIĆ, 2019).

**Figura 3 – Exemplo de grafo direcionado e ponderado com suas respectivas matrizes de adjacência sem e com peso**



Fonte: Autora (2024).

Com base na bem-sucedida aplicação da TRC em diversos campos (como a Internet, ciência da computação, biologia, ciências sociais, etc.), neste trabalho, as RDA são consideradas sistemas complexos, modeladas como grafos, e estudadas dentro da abordagem da TRC. De fato, as RDA podem ser consideradas como redes complexas, uma vez que são frequentemente compostas por milhares de elementos, apresentam muitos anéis e possuem uma forma irregular, visto que seguem o traçado da cidade que abastecem (Giudicianni *et al.*, 2018).

### 3.2.1 Teoria de redes complexas em redes de distribuição de água

A vida moderna em centros urbanos é dependente de redes de infraestrutura como redes de transporte, luz e água (Phan *et al.*, 2019). Logo passaram a estudar as RDA, pelo viés da Teoria dos Grafos. A aplicação de TRC em RDA envolveu temáticas como otimização de dimensionamento (Kessler; Ormsbee; Shamir, 1990), detecção de vazamentos (Barros *et al.*, 2022), estudos sobre a resiliência da rede (Meng *et al.*, 2018; Yazdani; Jeffrey, 2012) e sobre técnicas espectrais (Di Nardo, A. *et al.*, 2018), localização ótima de sensores para detectar intrusão de contaminantes (Giudicianni *et al.*, 2020) e para setorização ótima da rede (Di Nardo; Di Natale, 2011).

Para trabalhar com as RDA como redes complexas, elas devem ser modeladas como grafos. Esse consiste em uma abstração matemática composta por vértices ( $V$ ) que são conectados por arestas ( $E$ ) (Sadavare; Kulkarni, 2012), neste caso específico, o conjunto de vértices  $V$  representa os nós da rede, reservatórios e tanques, enquanto que o conjunto de arestas  $E$  está relacionado com os tubos, bombas e válvulas da rede.

Por associarem pesos às arestas dos grafos, Yazdani e Jeffrey (2012) foram capazes de capturar o significado e o impacto de diferentes componentes da rede na performance e resiliência do sistema como todo. Eles introduziram uma técnica que se apoia na utilização das informações dos componentes do sistema de distribuição de água na ponderação de grafos, estreitando a analogia entre grafos abstratos e os sistemas reais de distribuição de água. Destaca-se que essa abordagem proporciona uma avaliação mais robusta da suscetibilidade a danos das RDA, ao possibilitar uma quantificação mais precisa da topologia do sistema e de sua relação com os impactos causados por falhas eventuais.

Os grafos são estruturas matemáticas que representam relações ou conexões entre objetos ou entidades. A teoria dos grafos foi capaz de avaliar padrões de conexões, estruturas de comunidade, permitindo uma profunda caracterização dos sistemas que os grafos representam (Newman; Barabási; Watts, 2006). Como consequência disso, a TRC foi utilizada em outras áreas muito além da matemática, como na ciência da computação, ciências sociais e engenharias (Barabási,; Newman; Watts, 2003).

A TRC inclui uma série de métricas destinadas a avaliar o comportamento e a estrutura das redes complexas. Estas métricas abrangem o diâmetro, a distribuição de grau, o coeficiente de agrupamento e as centralidades das redes (Arsic *et al.*, 2012; Di Nardo, Armando *et al.*, 2018; Giudicianni *et al.*, 2018; Sitzenfrei *et al.*, 2020). Tais métricas são aplicáveis para a análise de diversos tipos de redes e têm sido amplamente utilizadas devido à sua capacidade de proporcionar uma compreensão mais aprofundada da estrutura interna de sistemas complexos.

O que fez com que a TRC chamasse atenção e fosse aplicada em outras áreas foram as métricas desenvolvidas que capturam as relações estruturais e semânticas (devido aos pesos e direções) (Goyal; Ferrara, 2018). Isso permite uma análise e processamento eficientes de grafos em grande escala. Por exemplo, as métricas de centralidade estão relacionadas com os caminhos mais curtos, isto é, a soma dos pesos do menor caminho entre dois nós em uma rede (Girvan; Newman, 2002). É importante notar que entre dois nós específicos, pode ter mais de um caminho mais curto (Newman, 2001). Para calcular essa métrica, diversos algoritmos podem ser aplicados, e neste trabalho, optou-se pela utilização dos algoritmos de Floyd-Warshall e de Dijkstra, devido às suas adequações para grafos direcionados e ponderados.

Uma série de métricas foram desenvolvidas destinadas a avaliar o comportamento e a estrutura de redes complexas. Estas métricas abrangem o diâmetro, a distribuição de grau, o coeficiente de agrupamento e as centralidades das redes (Arsic *et al.*, 2012; Di Nardo, Armando *et al.*, 2018; Giudicianni *et al.*, 2018; Sitzenfrey *et al.*, 2020). Nos estudos de resiliência das redes, existem duas propriedades importantes a serem medidas, como a robustez da rede, que é a habilidade dos componentes e do sistema de tolerar um certo nível de estresse ou demanda sem perder a função (Bruneau *et al.*, 2003), e a redundância, que é um indicador da presença de caminhos alternativos independentes entre a fonte e o nó de demanda/consumo que podem ser usados para satisfazer o suprimento de água durante uma ruptura ou falha dos caminhos principais (Goulter, 1987). Tais métricas são aplicáveis para a análise de diversos tipos de redes e têm sido amplamente utilizadas devido à sua capacidade de proporcionar uma compreensão mais aprofundada da estrutura interna de sistemas complexos.

Portanto, a análise das RDA como redes complexas envolve a aplicação de métricas específicas e técnicas de análise de redes para identificar elementos críticos e entender como a rede se comporta em diferentes cenários (Agathokleous; Christodoulou; Christodoulou, 2017; Pagano; Giordano; Portoghese, 2022). Estas métricas podem incluir, entre outras:

- Caminho mais curto: Para o cálculo dos caminhos mais curtos, foram empregados os algoritmos de Floyd-Warshall e Dijkstra. O algoritmo de Floyd-Warshall cria matrizes para determinar os caminhos mais curtos entre todos os

pares de nós, investigando os caminhos que passam por nós específicos, com base na aplicação da Equação (7) (Floyd, 1962). O comprimento do caminho entre dois vértices é definido como a soma dos pesos das arestas ao longo do caminho. A equação representa a lógica de decisão do algoritmo, que atualiza o caminho mais curto entre dois vértices, comparando o valor previamente encontrado ( $A_{(i,j)}^{k-1}$ ) com o novo valor de um caminho que passa por um vértice intermediário ( $A_{(i,k)}^k + A_{(k,j)}^k$ ).

$$A_{(i,j)}^k = \min\{A_{(i,j)}^{k-1}, A_{(i,k)}^k + A_{(k,j)}^k\} \quad (7)$$

Este algoritmo foi selecionado devido à sua aplicabilidade em grafos direcionados e com pesos negativos associados às arestas. O algoritmo de Dijkstra, por outro lado, é utilizado para calcular o caminho mais curto entre uma fonte e um nó de demanda, considerando nó inicial e nó final. Ele explora os vizinhos dos vizinhos até encontrar o caminho mais curto.

O algoritmo inicia atribuindo uma distância de 0 ao nó inicial e considerando a distância a todos os outros nós como infinita. Em seguida, seleciona o nó com a menor distância (inicialmente, o próprio nó de partida) e visita os seus nós vizinhos. Para cada nó adjacente, o algoritmo calcula a distância do nó inicial até o nó em questão e atualiza o caminho mais curto, se encontrar um. Este processo continua até que todos os nós tenham sido investigados ou até que o caminho mais curto até o nó final tenha sido encontrado (Dijkstra, 1959). Importante destacar que o algoritmo de Dijkstra não pode ser utilizado em caso de arestas com pesos negativos, mas apresenta uma complexidade de tempo que varia de  $O((V + E) \log V)$  (para fonte única) até  $O(V^2)$  (para todos os pares de nós), o que é inferior à complexidade do algoritmo de Floyd-Warshall, que é  $O(V^3)$  (Skiena, 2008)

- Centralidade de proximidade normalizada ( $C_C$ ): determina a importância dos vértices na rede, conforme os menores comprimentos de caminhos mais curtos aos outros vértices da rede (Zhu; Wang; Wu, 2021). Essa métrica é calculada pela Equação (8) (Freeman, 1978).

$$C_C(i) = \frac{n - 1}{\sum_{j=1}^{n-1} d_{i,j}} \quad (8)$$

Nesta equação,  $d_{i,j}$  representa a soma dos pesos das arestas de todos os caminhos mais curtos entre os vértices  $i$  e  $j$ . E esta distância está normalizada pelo número de nós da rede ( $n$ ). Essa centralidade quando aplicada em grafos direcionados, podem ser considerados os caminhos mais curtos que chegam ( $CCi_{in}$ ) ou que saem ( $CCi_{out}$ ) de  $i$ .

- Centralidade de intermediação normalizada ( $C_B$ ): estudado inicialmente por Freeman (1977) que definiu a métrica pela Equação (9). Ele utilizou esta métrica para avaliar a influência de um determinado nó sobre as conexões entre os outros pares de nós da RDA.

$$C_B(i) = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{s \neq r \neq i} \frac{n_{s,r}(i)}{n_{s,r}} \quad (9)$$

em que,  $n$  é o número de nós da rede,  $n_{s,r}$  denota o número de caminhos mais curtos entre  $s$  e  $r$  e  $n_{s,r}(i)$  o número de caminhos mais curtos entre  $s$  e  $r$  que passam pelo nó  $i$ . Existe uma variação dessa métrica para arestas, calculada pela soma dos caminhos mais curtos entre todos pares de nós  $i$  e  $j$  de uma rede no quais o trecho  $k$  está incluído, normalizado pelo total de caminhos mais curtos entre  $i$  e  $j$  (Girvan; Newman, 2002; Sitzenfrei *et al.*, 2020).

- Centralidade do autovetor: Zhu *et al.* (2021) aplicaram esta métrica em redes de informação e redes sociais, destacando que nestas redes esta métrica foi a que teve maior correlação com a influência de um nó. Grupos de vértices altamente conectados são mais importantes para a comunicação da rede quando comparados com vértices com a mesma quantidade de conexões, mas que não formam um grupo, ou seja, seus vizinhos são menos conectados. Assim, essa métrica analisa o número de vizinhos dos nós adjacentes (Di Nardo, A. *et al.*, 2018). Essa centralidade atribui um valor para cada nó igual a coordenada correspondente do autovetor principal da matriz de adjacência do grafo. Este autovetor corresponde ao maior autovalor da matriz.
- Centralidade de intermediação fonte-demanda: computa a centralidade de intermediação entre dois grupos de vértices. Utilizado neste trabalho para computar a centralidade entre fontes d'água (reservatórios) e nós de demanda. Ela é calculada pela Equação (10).

$$C_B(v) = \sum_{s \in S, z \in Z} \frac{\sigma(s, z|v)}{\sigma(s, z)} \quad (10)$$

em que,  $S$  é o conjunto de fontes,  $Z$  é o grupo de alvos,  $s$  e  $z$  são nós, respectivamente, destes grupos. Essa centralidade é calculada pelo somatório dos caminhos mais curtos entre  $s$  e  $z$  que passam pelo vértice  $v$ , sobre todos os caminhos mais curtos entre  $s$  e  $z$ . Assim como, para a centralidade de intermediação de aresta, existe a variação centralidade de intermediação de aresta fonte-demanda, em que se calcula a importância de uma aresta pela quantidade de caminhos mais curtos em que a aresta está incluída (Sitzenfrei *et al.*, 2020).

A TRC já foi aplicada em diversas temáticas em RDA. Por exemplo, Nazempour, Monfared e Zio (2018) a utilizaram para associar ao processo de alocação ótima de sensores de detecção de contaminantes uma análise da complexa topologia e dinâmica da rede. Outra aplicação foi realizada por Hajibabaei *et al.* (2024), que a utilizaram para reconstruir informações faltantes sobre os diâmetros dos trechos de RDA. O modelo por eles desenvolvido emprega métricas de TRC para recuperar os diâmetros ausentes com base em características topológicas (por exemplo, conectividade) e hidráulicas (por exemplo, vazão) das arestas com informações disponíveis. Essa abordagem visa beneficiar concessionárias de água que frequentemente se deparam com dados incompletos em seus modelos, necessitando de recuperação de dados em larga escala.

Outra aplicação da TRC foi encontrada na definição de setores da rede, o que pode ser uma tarefa complexa devido à necessidade de respeitar tanto o desempenho da rede quanto o custo máximo de investimento. Spizzo *et al.* (2023) apresentam uma abordagem de otimização baseada na TRC, combinada com uma técnica de otimização utilizando algoritmos genéticos (AG).

Estes estudos recentes ilustram as várias aplicações da teoria de redes complexas na análise das redes de distribuição de água, desde a setorização da rede até a otimização do seu projeto e a identificação de segmentos críticos. Ao empregar a TRC, os pesquisadores estão adquirindo informações valiosas sobre as características estruturais, o desempenho e a resiliência dos sistemas de distribuição de água,

contribuindo, em última análise, para redes de abastecimento de água mais eficientes e confiáveis.

### **3.3 Teoria de redes complexas aplicada a análise de risco de redes de distribuição de água**

Os modelos de simulação hidráulica podem ser utilizados para simular cenários de falhas e identificar elementos que são mais críticos, tendo como característica de criticidade, um maior impacto em termos de variação de pressão na rede. À medida que o tamanho das redes testadas aumentam, aplicando em grandes redes reais, o número de variáveis cresce, levando ao aumento do tempo de simulação (proporcional à quantidade de componentes hidráulicos da rede) e dos requisitos de memória computacional (Candelieri; Perego; Archetti, 2018). Assim, como uma ferramenta auxiliar aos modelos hidráulicos para interpretar e compreender os complexos sistemas urbanos, existe a TRC. Essa teoria é aplicável a 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 (Giudicianni *et al.*, 2018).

Da mesma forma que foram conduzidas simulações hidráulicas, Meng *et al.* (2018) realizaram análise da resiliência da rede em distintos níveis de estresse, focalizando especificamente na ruptura de tubos e no desligamento de bombas. Os autores utilizaram TRC, avaliando quais métricas estavam associadas a elementos de resiliência, como o tempo de recuperação e a duração da falha.

Uma alternativa metodológica para modelar a RDA como uma rede complexa, a fim de analisar sua resiliência, foi proposta por Pagano *et al.* (2022). Este enfoque envolve a aplicação de um conjunto de métricas destinadas a estabelecer uma hierarquia de criticidade dos tubos na rede, sendo essa hierarquia consolidada por meio de uma estrutura de rede bayesiana. É relevante ressaltar que esta abordagem não se valeu de simulações hidráulicas, embora a incorporação de propriedades físicas e hidráulicas como característica dos grafos possibilitaria a uma melhor representação do sistema físico e conseqüentemente, das condições de escoamento da rede.

Deste modo, na investigação sobre a aplicação de TRC na análise de risco de falhas, este estudo propôs conduzir simulações hidráulicas a fim de investigar o comportamento da rede diante de falhas individuais e comparar esse desempenho com a aplicação de métricas de TRC, visando indicar os elementos mais críticos da rede. Estes cenários foram aplicados a redes de referência da literatura, buscando estreitar a analogia entre RDA e grafos e para três tipos de falhas: ruptura de tubos, vazamentos e intrusões de contaminante.

## **4 METODOLOGIA**

A metodologia proposta divide-se em duas etapas. A primeira etapa inclui a realização de simulações hidráulicas e simulações de qualidade da água, nas quais cenários de falha são delineados e os impactos relacionados a cada falha são analisados, isto é, a redução da capacidade de abastecimento da rede em termos hidráulicos, via análise da redução de pressão nos nós de consumo e a qualidade do abastecimento, a partir da análise da concentração de contaminantes nos nós de consumo.

Na segunda etapa, é empregada a TRC. Em que, a RDA é modelada como um grafo, e as métricas de TRC são calculadas para cada cenário estabelecido. Subsequentemente, os resultados obtidos nas duas etapas são comparados tanto de forma numérica quanto por meio da elaboração de mapas de risco, visando uma análise abrangente e sistemática da situação em estudo. Todas as etapas e resultados são analisados por meio do ambiente de programação *Python*, com auxílio das bibliotecas *Water Network Tools for Resilience (WNTR)* (Klise; Murray; Haxton, 2018) e *Networkx* (Hagberg; Swart; Schult, 2008).

### **4.1 Ruptura de tubulações**

#### **4.1.1 Simulação hidráulica da rede**

Para a construção dos modelos hidráulicos das RDA, a rede deve conter suas informações hidráulicas em um formato de arquivo padrão do EPANET (.inp). A partir do modelo, a RDA é importada para o ambiente de programação Python que permite a construção de cenários de falha e realizar simulações, respectivamente, pela edição do arquivo de entrada e interação com o software EPANET.

A fim de simular o cenário de ruptura individual de tubos, procedeu-se à modificação do status dos tubos rompidos, tornando-os completamente fechados durante toda a simulação, com o propósito de replicar o isolamento de tubulações sujeitas a falhas (perda de conectividade). Esta representação constitui uma simplificação de uma falha real na tubulação, não incluindo o processo desde a ocorrência da falha até a detecção e isolamento completos. Desse modo, a perda de água anterior ao isolamento da tubulação não é contemplada na modelagem. Os tubos com falha são considerados isoláveis imediatamente após a ruptura, e, portanto, a "falha do tubo" foi simulada mediante o fechamento dos tubos, em detrimento de abri-los, permitindo fluxo livre para o ambiente até o esvaziamento de reservatórios.

Após as construções de cenários para este modo de falha, foram realizadas simulações hidráulicas dirigidas pela pressão. Desta forma, foi possível analisar variações de pressões e desabastecimento, parcial ou total, da demanda. A seguir, os resultados da simulação são consolidados e analisados, por meio do cálculo da redução percentual de pressão (*VP*) nos nós da rede em relação aos valores de pressão nos nós da rede sem ruptura, conforme apresentado na Equação (11):

$$VP = \frac{P_{n,k}^t - P_{n,0}^t}{P_{n,0}^t} \quad (11)$$

em que,  $P_{n,k}^t$  é a pressão do nó  $n$  no instante  $t$ , durante a ruptura do tubo  $k$ , e  $P_{n,0}^t$  é a pressão do nó  $n$  no instante  $t$ , na rede sem ruptura. Todas as pressões estão em metros. Para cada ruptura de tubo, foram calculadas estas variações de pressões de cada nó em cada passo de tempo. Com este cálculo foi possível analisar se ocorreu um aumento ou redução de pressão porcentual nos nós.

Desta maneira, procedeu-se à soma da quantidade de nós que experimentaram uma diminuição de pressão superior a 5%, 10% e 15% em comparação com as condições originais da rede (livre de falhas), em cada simulação de ruptura de um trecho. Assim, a cada tubo foi atribuído um valor representativo do número total de ocorrências em que algum nó sofreu redução de pressão superior à percentagem especificada durante as 24 horas de simulação. Adicionalmente, foi realizado o cálculo e a elaboração de um mapa de risco da rede, associando a cor de cada tubo com a frequência em que os nós sofreram com desabastecimento, seja de forma parcial ou

total. Este cenário se configura quando a pressão nos nós se situa abaixo da pressão requerida ( $P_f$  para atender plenamente à demanda).

#### 4.1.2 Aplicação de teoria de redes complexas

Na segunda fase do estudo, que implica investigar a aplicação de TRC num grafo representativo da rede, procurou-se determinar se a criação de um mapa de risco gerado a partir desta análise, indicaria áreas críticas na rede de maneira consistente com os mapas derivados da etapa inicial. Para tanto, recorreu-se à biblioteca *NetworkX* e aderindo às recomendações existentes na literatura pertinente, a RDA foi convertida num grafo direcionado e ponderado.

A direção do grafo foi estabelecida conforme a vazão média da rede em pleno funcionamento, enquanto a ponderação considerou a vazão média da rede sem rupturas, a resistência dos tubos e o tempo médio de viagem da água. Alguns pesquisadores têm sustentado que um grafo direcionado e ponderado é mais apropriado para representar o comportamento da rede, permitindo a incorporação de valores e direção de vazão (Di Nardo *et al.*, 2017; Herrera; Abraham; Stoianov, 2016; Lee; Jung, 2021; Yazdani; Jeffrey, 2010). Esta ponderação foi realizada com o intuito de obter informações acerca dos volumes de água que são transportados nas tubulações da rede.

A utilização de resistência dos tubos, segundo a Equação (12), já foi utilizada por outros autores (Herrera; Abraham; Stoianov, 2016; Pagano; Giordano; Portoghese, 2022; Sitzenfreni *et al.*, 2020). A estimativa de perda de energia no transporte da água é comumente calculado pelas fórmulas de Darcy-Weisbach e Hazen-Williams. As redes utilizadas neste trabalho possuem sua rugosidade definidas pelo coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams, dessa forma, foi utilizada a equação de resistência derivada desta fórmula.

$$R = \frac{10,65 \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (12)$$

Nessa equação,  $R$  é a resistência ( $m^{-4,55} \cdot s^{1,85}$ ),  $L$  se refere ao comprimento do tubo em metros,  $C$  ao coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams ( $m^{0,367}/s$ ) e  $D$  ao diâmetro do tubo em metros. A utilização desta forma de ponderação permite que não seja necessário realizar nenhuma simulação hidráulica.

Para ponderar o grafo segundo o tempo de viagem da água, foi utilizada a equação (13).

$$Tv = \frac{L_m}{v_m \cdot 3600} \quad (13)$$

em que,  $Tv$  é o tempo de viagem da água em horas,  $L_m$  é o comprimento do tubo  $m$  em metros e  $v_m$  é a velocidade média de escoamento da água pelo tubo  $m$  em metros por segundo. Esta ponderação foi utilizada com o intuito de quantificar o tempo para abastecimento dos nós da rede e caracterizar a qualidade da água que chega aos nós.

Em seguida, para a ruptura, foram criados cenários de falhas aplicados aos grafos, em que a aresta correspondente ao tubo rompido é desconectada na matriz de adjacência ponderada. O valor do elemento  $a_{ij}$ , que anteriormente era igual a 1, indicando conexão entre os nós  $i$  e  $j$ , passa a ser 0. É importante ressaltar que  $i$  e  $j$  correspondem, respectivamente, aos nós de montante e jusante do tubo de acordo com o sentido da vazão inicial da rede.

Os vértices dos grafos foram diferenciados, identificando os vértices correspondentes às fontes de água e aos nós de demanda. Desta forma, para cada cenário, foi calculado o caminho mais curto entre fontes de água e nós de demanda, formando uma matriz com a soma dos pesos das arestas pertencentes ao caminho mais curto.

Por fim, realizou-se a análise do aumento e da diminuição dos caminhos mais curtos, bem como a desconexão de nós em relação às suas fontes, quando a distância entre eles se torna infinita.

#### 4.1.3 Avaliação dos desempenhos dos métodos

Além disso, efetuou-se uma comparação entre os resultados da primeira e da segunda etapa do estudo. Esta análise foi realizada por valores numéricos e pela construção de mapas de risco.

Para a primeira etapa que envolve simulações hidráulicas, foram construídos mapas da rede que indicam os tubos que ao serem isolados afetaram as pressões, em relação a redução, e ao desabastecimento, parcial ou total. Para a segunda, relacionada a aplicação de TRC, contruiu-se mapas que indicam qual aresta ao ser

retirada do grafo implicou em mais desconexões entre fontes de água e nós de demanda.

## 4.2 Vazamentos

### 4.2.1 Simulação hidráulica da rede

A primeira etapa da metodologia para a análise de vazamentos, à semelhança da etapa de análise de rupturas, consiste na realização de simulações hidráulicas dirigidas pela pressão, sendo o modelo hidráulico da RDA construído da mesma forma. Entretanto, os cenários delineados nessa etapa envolvem a inserção de vazamento em cada nó de demanda da rede, individualmente.

Estes vazamentos são inseridos em cada nó por meio do uso da equação padrão do EPANET 2.2, configurando o coeficiente de emissão. Os emissores são dispositivos associados aos nós, capazes de modelar a vazão descarregada para atmosfera por um bocal ou orifício, obedecendo a Equação (14) (Rossman *et al.*, 2020).

$$q = \alpha \cdot p^\beta \quad (14)$$

Nesse contexto, a vazão  $q$  depende da carga de pressão no nó  $p$ , sendo  $\alpha$  o coeficiente do emissor e  $\beta$ , o expoente de pressão.

Com o intuito de inserir vazamentos de magnitude comparável, foi calculada a pressão média de cada nó da rede, garantindo, assim, que a taxa de vazão fosse mantida aproximadamente constante, isto é, independentemente de onde se modela o vazamento, a vazão descarregada para atmosfera é a mesma. Os vazamentos são modelados com duração constante durante todo o período de simulação (24 horas). Em seguida, são realizadas simulações hidráulicas dirigidas pela pressão, e calculou-se a redução de pressão dos nós em comparação à pressão da rede sem vazamento. Além disso, identificaram-se os nós sujeitos a desabastecimento, seja parcial ou total.

### 4.2.2 Aplicação de teoria de redes complexas

Na segunda etapa referente a vazamentos, diferentemente do cenário de ruptura, em que se retira do grafo a aresta correspondente ao tubo no qual se simula a ruptura, no caso de vazamentos essa ação não será realizada. Na etapa da caracterização da rede por TRC, o grafo é mantido com todas as suas arestas e vértices.

Foram conduzidos testes com o grafo ponderado com base na vazão, no tempo de viagem da água e na resistência, conforme foi desenvolvido na metodologia de ruptura. Foi investigada a aplicação de métricas de TRC que visam identificar os vértices mais importantes ou mais conectados, que influenciem uma maior área. Por exemplo, centralidade de proximidade que foi desenvolvida para medir a eficiência de um nó em disseminar informação por Freeman (1978) ou centralidade de intermediação que quando mais um vértice está incluído no cálculo dos caminhos mais curtos, mais relevante ele é (Giustolisi; Ridolfi; Simone, 2019).

#### 4.2.3 Avaliação dos desempenhos dos métodos

Após a avaliação numérica e a construção de mapas de risco, foi possível identificar qual métrica de TRC indicava como elemento crítico da rede de forma convergente com os mapas de risco criados a partir da análise de parâmetros hidráulicos decorrente de resultados da primeira etapa.

### 4.3 Intrusão de contaminante

#### 4.3.1 Simulação de qualidade da água

A intrusão de contaminantes em uma RDA é uma preocupação significativa devido ao potencial impacto adverso na saúde pública e na integridade do sistema de abastecimento de água. Essa falha ocorre quando contaminante penetram na rede, seja por meio de rachaduras em tubulações, vazamentos ou refluxo em conexões cruzadas (LeChevallier *et al.*, 2003). A ocorrência de contaminação envolve diversas variáveis, como apontado por Mansour-Rezaei *et al.* (2014), sendo necessários três pré-requisitos: a presença de uma fonte contaminante próxima ao sistema, a existência de uma força-motriz (pressões baixas ou negativas) e de um caminho de entrada (deficiências estruturais).

Entretanto, no âmbito deste estudo, não será analisada a forma de entrada de contaminantes ou a probabilidade de contaminação em pontos específicos da rede, mas sim quais nós ao serem contaminados, poderão afetar uma área mais extensa. Portanto, foram criados cenários de intrusão de contaminante em cada nó da rede de forma individual, e analisado o espalhamento da substância.

Nesse contexto, a primeira etapa da metodologia envolveu simulações de qualidade da água, as quais podem ser executadas com o auxílio do mesmo software, o EPANET 2.2 (Rossman *et al.*, 2020). Nesse tipo de simulação, é necessário determinar a concentração da substância, os coeficientes de reação dos tubos, o tipo de fonte de contaminação, bem como parâmetros e o período de simulação.

Para determinar a concentração, adotou-se a metodologia empregada por Diao *et al.* (2016). Eles utilizaram uma concentração de 2,5 g/L comparando com o limite estabelecido pelas regulamentações da União Europeia para substâncias comuns, como cloro e sulfato, cujo valor máximo permitido é de 250 mg/L. Essa concentração elevada representa uma deterioração significativa na qualidade da água. Além disso, quanto maior a massa de contaminante, maior o tempo necessário para a simulação, uma vez que a recuperação da concentração demandará mais tempo.

De acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), que estabelece os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seus padrões de potabilidade, no Anexo 11, que apresenta a tabela de padrões organolépticos de potabilidade, o valor máximo permitido para cloreto e sulfato é de 250 mg/L. Portanto, nesta pesquisa, optou-se por utilizar uma concentração de 250 mg/L da substância.

A substância foi introduzida no sistema como tipo “*chemical*”, com reação de decaimento de primeira ordem, semelhante ao cloro, e com o modo de simulação “*set point booster source*”. O manual recomenda o uso de um dos modos “*booster*” para simular a intrusão de contaminantes, e o modo “*set point*” foi escolhido, pois ele mantém uma concentração fixa saindo do nó (Rossman *et al.*, 2020).

Barros *et al.* (2022) modelaram a injeção da substância na rede a partir da sexta hora de simulação, e essa abordagem também foi adotada neste estudo. Contudo, a injeção do contaminante foi aplicada apenas durante uma hora dentre o total de 24 horas de simulação, que se mostrou suficiente para recuperação do sistema.

#### 4.3.2 Aplicação de teoria de redes complexas

Na segunda fase da intrusão de contaminantes, destinada à modelagem por meio da TRC, o grafo foi analisado de forma completa, sem a construção de cenários nele, seguindo a mesma abordagem adotada para vazamentos. A análise considerou a direção do grafo conforme a vazão e a ponderação baseada nos valores médios de vazão resultantes de uma simulação hidráulica única da rede, isenta de falhas, levando em consideração a resistência dos tubos e o tempo de viagem da água.

Foram aplicadas as métricas de centralidade para identificar o nó mais influente na rede, buscando caracterizar qual nó, quando contaminado, impactaria uma área mais extensa.

#### 4.3.3 Avaliação dos desempenhos dos métodos

Com o propósito de avaliar a concordância dos resultados obtidos nas duas fases deste estudo, foram desenvolvidos mapas de risco, os quais foram subsequentemente submetidos a comparações. Após simular a intrusão de contaminantes em cada nó da rede individualmente, métricas foram aplicadas utilizando a biblioteca WNTR para quantificar a quantidade de nós impactados. Notadamente, verificou-se se, em cada intervalo de tempo, os nós apresentavam concentração da substância simulada superior a 0 mg/L.

É importante ressaltar que este cenário ideal, onde há sensores em cada nó da rede, apresenta-se como uma limitação do estudo, uma vez que na realidade nem todos os nós são equipados com sensores, o que pode comprometer a detecção precisa e abrangente da contaminação.

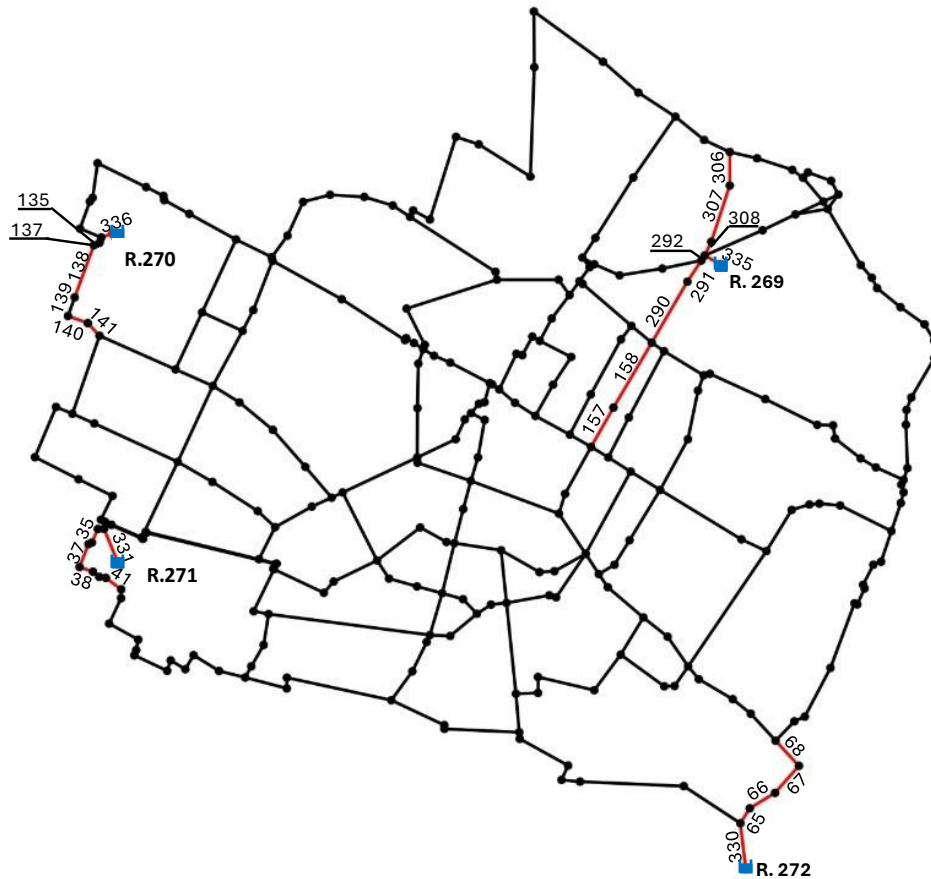
## 5 ESTUDOS DE CASO

### 5.1 Rede Modena

A primeira rede utilizada neste estudo é a rede de referência Modena, composta por 268 nós, 317 tubos e abastecida por 4 reservatórios, como ilustrado na Figura (Bragalli *et al.*, 2008). Esta rede possui uma notável quantidade de anéis, manifestando um comportamento complexo e um sistema hidráulico de uma rede com múltiplas fontes de água. Conforme registrado por Bolognesi *et al.* (2012), a pressão

requerida para funcionamento pleno é de 20 m.c.a. Além disso, a rede testada apresenta somente uma diferença de elevação de 11,44 m.

**Figura 4 - Rede Modena com identificação dos reservatórios e dos tubos críticos citados ao longo deste trabalho**



Fonte: Autora (2024).

## 5.2 Rede E-Town

A segunda rede utilizada neste trabalho foi a E-Town, utilizada a partir de 2022, na *2nd International Joint Conference in Water Distribution Systems Analysis & Computing and Control in the Water Industry (WDSA/CCWI)*. Esta é uma rede grande, complexa, consistindo em 2859 nós, 3231 tubos, 7 bombas, 6 reservatórios, 4 tanques e 15 válvulas. Esta rede foi escolhida por ser de referência na literatura e por possuir vários tanques, reservatórios, válvulas e bombas, se aproximando da complexidade de uma rede real, como apresentada na Figura .

**Figura 5 – Rede E-Town**



Fonte: Autora (2024).

Entre os 3231 tubos, 4 funcionam como válvulas de retenção. Entre todos os elementos que são encontrados na rede como “links”, 42 são duplicados, hidráulicamente equivalentes, entre eles 2 bombas e 40 tubos.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados foram organizados de acordo com a rede e falha analisada. Primeiramente, apresenta-se a comparação dos resultados de ruptura, uma vez que estes estão diretamente relacionados à avaliação crítica dos tubos. Em seguida, aborda-se conjuntamente os resultados relativos a vazamentos e à intrusão de contaminante, pois estes aspectos estão associados à criticidade dos nós.

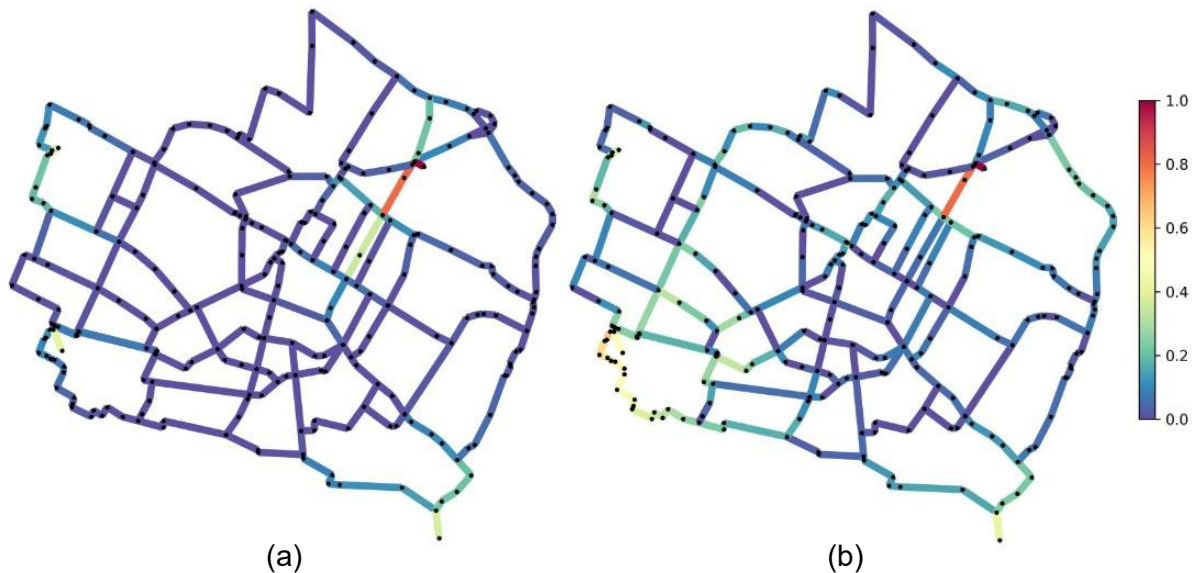
### **6.1 Rede de distribuição de água - Modena**

#### **6.1.1 Análise de risco de tubos**

Um tubo é considerado crítico sob a perspectiva hidráulica quando seu fechamento resulta em uma área substancialmente afetada. Esse impacto pode ser quantificado pelo cálculo de desabastecimento, seja de forma parcial ou total. A Figura exibe os mapas de riscos desenvolvidos para avaliar a criticidade dos tubos, tanto sob a perspectiva hidráulica quanto com base na TRC.

Um nó é considerado desabastecido durante simulação dirigida pela pressão quando sua pressão cai abaixo do nível requerido para satisfazer integralmente a demanda. Foi realizado o somatório de todas as horas em que algum nó ficou desabastecido em todos os cenários de ruptura. Adicionalmente, como parte da segunda etapa da metodologia para ruptura, foram calculadas as desconexões que ocorreram na determinação dos caminhos mais curtos entre os nós de demanda e uma fonte. A cada aresta removida, era calculado o caminho mais curto entre as fontes e os nós de demanda, identificando quais caminhos anteriormente acessíveis passaram a ter distância infinita (desconexão).

**Figura 6 – Mapas de risco de rupturas normalizados: a) tubos que impactaram mais nós com desabastecimento durante uma ruptura; b) arestas que, ao serem removidas, acarretaram em um maior número de desconexões de nós das fontes**



Fonte: Autora (2024).

Ao analisar os mapas de risco da Figura 6, nota-se que, eles indicam como críticos os mesmos tubos, principalmente aqueles conectados aos reservatórios e uma pequena parte de seu escoamento. No caso dos tubos próximos ao reservatório 271, que são identificados como críticos na modelagem de TRC, mas não nas simulações hidráulicas, isso ocorre devido à inversão da direção do escoamento nas simulações hidráulicas. Isso faz com que os pontos de demanda que eram originalmente abastecidos pelo reservatório 271 passem a ser atendidos por outros reservatórios, evitando um desabastecimento crítico.

Além disso, os tubos 157 e 158, não são considerados críticos na modelagem de TRC, devido à presença de dois trechos paralelos que atuam como caminhos alternativos. A remoção de sua aresta correspondente não afeta significativamente as desconexões nos caminhos mais curtos entre fontes e nós de demanda. No entanto, nas simulações hidráulicas, esses tubos possuem uma alta vazão ao longo de toda a simulação, o que resulta em uma mudança significativa no fluxo, reduzindo a pressão em alguns nós, levando ao desabastecimento, seja total ou parcial, sendo assim indicados como críticos. Mesmo com algumas limitações de representar todo o funcionamento hidráulico pelo estudo topológico de TRC, os resultados indicam como críticas as mesmas áreas.

Em geral, as RDA dependem de uma linha de transmissão principal para abastecer os usuários situados mais distantes das fontes d'água (Campbell *et al.*, 2016). Esta linha principal é conhecida como rede troncal, em contraste com a rede de distribuição. A rede troncal consiste nos nós e tubulações mais importantes e interconectados, responsáveis por transportar maiores volumes de água. Posteriormente, esses volumes são distribuídos por tubos de diâmetros menores, com capacidades de fluxo reduzidas, e que possuem menor relevância e conexão na rede.

Na modelagem da rede troncal, em um grafo sem ponderação nas arestas, isto é, todas as arestas têm peso igual a 1, calcula-se o número de vértices incluídos no caminho mais curto. Na modelagem em que foi aplicada o cálculo dos caminhos mais curtos a um grafo com pesos atribuídos às arestas, como a vazão, o valor do caminho mais curto é a soma dos pesos deste trajeto. Portanto, o algoritmo visa encontrar o caminho com as menores vazões, esses caminhos compõem a rede de distribuição, em oposição à rede troncal, formando caminhos alternativos ao principal.

É relevante destacar que, neste estudo, ao considerar a vazão, não se analisou a variação ou os valores das distâncias dos caminhos mais curtos, mas sim a conexão, isto é, se foi possível ou não encontrar esse caminho mais curto. Assim, após a análise dos resultados, foi possível identificar os tubos mais cruciais da rede.

(Campbell *et al.*, 2016) dado um nó de origem, calcularam todos os nós que este alcança, de acordo com o caminho mais curto, e computaram essas “distâncias”. Geraram uma matriz com os nós na primeira coluna como os nós de origem e os na

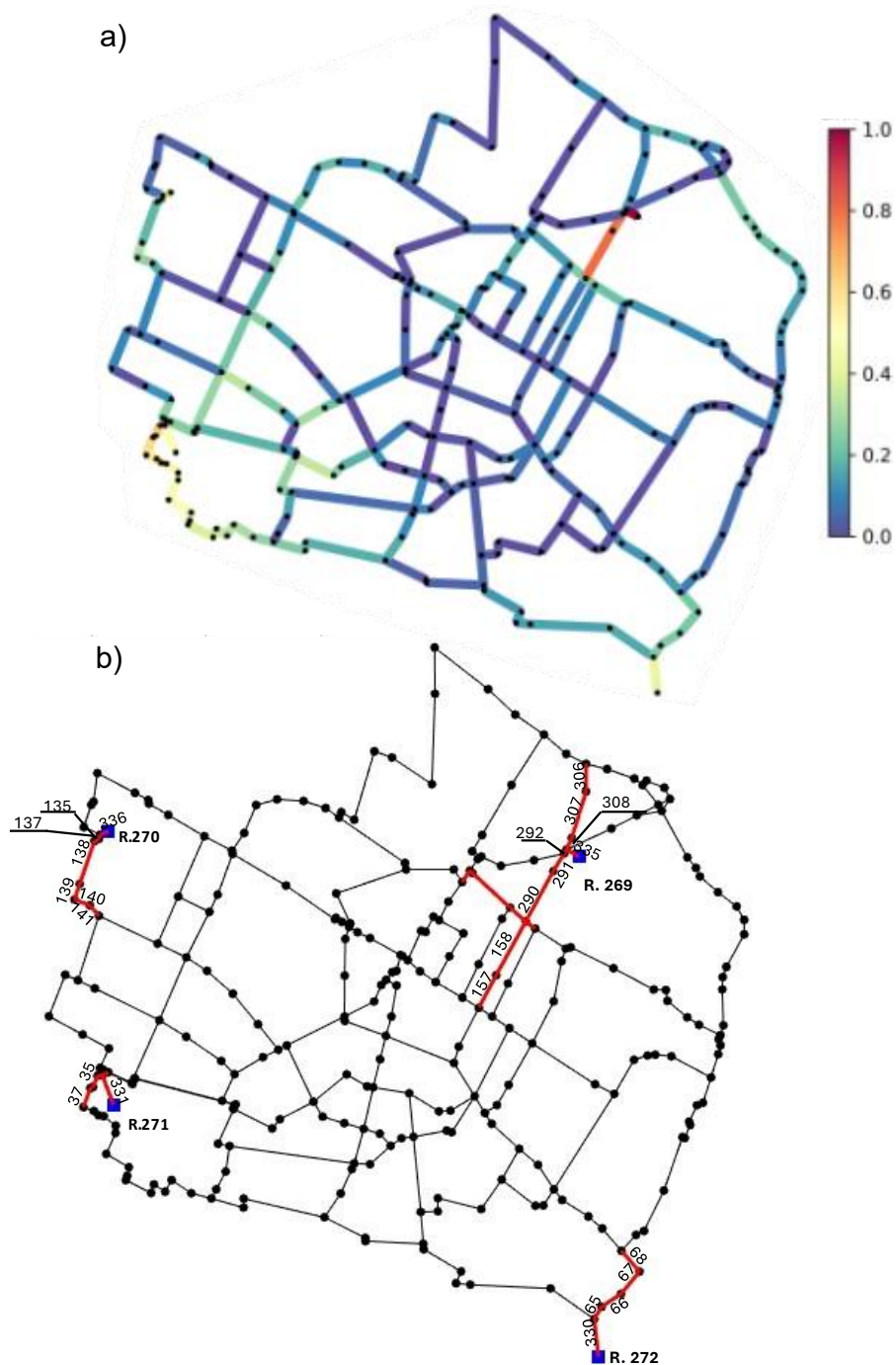
primeira linha como os nós finais dos caminhos mais curtos. A matriz foi preenchida seguindo as regras apresentadas na Equação (15):

- Se  $NI = NF$ , então Distância = 0;
- Se  $NI$  não alcança  $NF$ , então Distância =  $\infty$ ;
- Se  $NI$  alcança  $NF$ , então Distância =  $n^{\circ}$  de nós pertencentes ao caminho mais curto. (15)

Sendo  $NI$  o nó inicial e  $NF$  o nó final do caminho mais curto. Quanto maior for a soma das distâncias de uma linha, mais conectado e importante é um nó, uma vez que sua importância aumenta proporcionalmente ao número de nós alcançados. É possível associar esta importância a um tubo, relacionando-o ao valor acumulado de distancias de seu nó de jusante (CAMPBELL et al., 2016).

Utilizando as fontes de água da rede como  $NI$  e normalizando os valores associados aos tubos, é construída uma hierarquia em que se espera que os tubos conectados a cada fonte sejam mais importantes, dependendo do número de nós que são capazes de atender (CAMPBELL et al., 2016). Os tubos que resultaram em uma maior área desconectada de sua respectiva fonte, se identificam, em sua maioria, à rede troncal. Na Figura 7 foram destacados os tubos pertencentes a 10% da hierarquia, com os reservatórios como raízes desta rede.

**Figura 7 – Comparação entre mapas: a) mapa de risco de ruptura normalizado com arestas que, ao serem removidas, acarretaram em um maior número de desconexões de nós das fontes; b) rede troncal da rede Modena com hierarquia de 10%**



Fonte: Autora (2024).

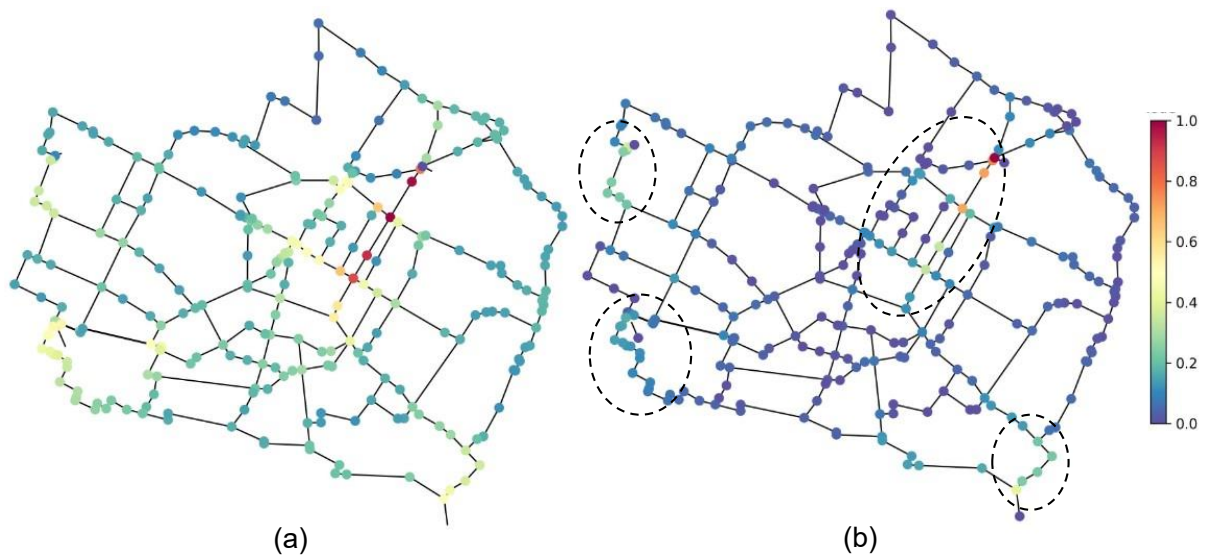
Os tubos críticos apontados pela aplicação de TRC foram compatíveis com a rede troncal de 10% da tubulação, corroborando com a importância destes para o abastecimento. Além disso, foi apresentado que tubos conectados em sequência, saindo do reservatório 269, eram mais críticos do que tubos conectados diretamente aos outros reservatórios. Por fim, os dois métodos de análise de risco, simulações

hidráulicas e TRC, apresentaram uma boa convergência nos resultados para análise de ruptura.

### 6.1.2 Análise de risco de nós

Na parte da análise relacionada aos cenários de inserção de vazamento nos nós da rede, assim como foi analisado para ruptura, também foi avaliado se ocorreu desabastecimento, como apresentado na Figura . Além disso, a Figura 8 apresenta a modelagem da RDA em forma de grafos, em que foi aplicada a métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda.

**Figura 8 – Mapas de risco de vazamentos: a) número de nós que sofreram desabastecimento durante os cenários de vazamentos em cada vértice; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda**



Fonte: Autora (2024).

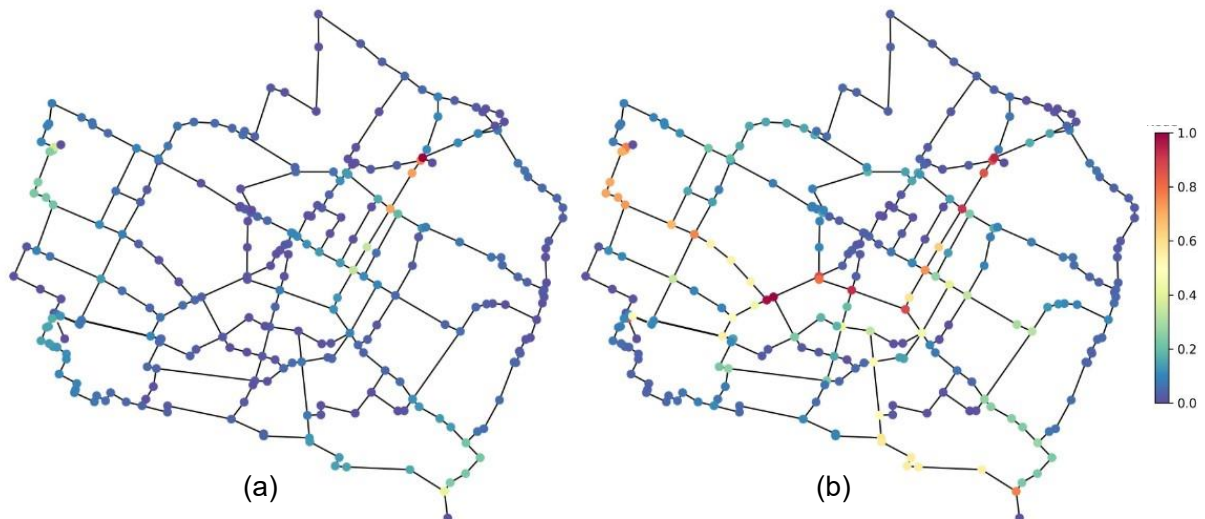
A métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda avalia a importância de um nó com base na quantidade de caminhos mais curtos que ele é intermediário. Por outro lado, na primeira etapa da metodologia de vazamento, o cálculo da quantidade de nós desabastecidos envolve simulações individuais de inserção de vazamentos, com duração de 24 horas cada. A partir dos resultados de pressões nos nós, obtidos a cada hora durante as simulações de cada cenário, é gerada uma matriz que registra os nós impactados pelos vazamentos e quantifica o número de vezes que um nó sofreu desabastecimento ao longo das 24 horas de cada simulação dos cenários.

Ao comparar os dois mapas de risco apresentados na Figura 8, observa-se uma notável concordância nos resultados. Esses apresentam as mesmas regiões críticas

na rede, destacadas por círculos na imagem, que coincidem com regiões que são próximas aos reservatórios.

Neste trabalho, foi investigado também a aplicação das métricas de TRC em grafos não direcionados, como apresentado na Figura 9. Ao aplicar a métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo não direcionado análogo à rede Modena, é possível observar que indica outros vértices, além dos identificados na rede direcionada, como críticos, divergindo dos resultados da análise de desabastecimento da rede via simulações hidráulicas.

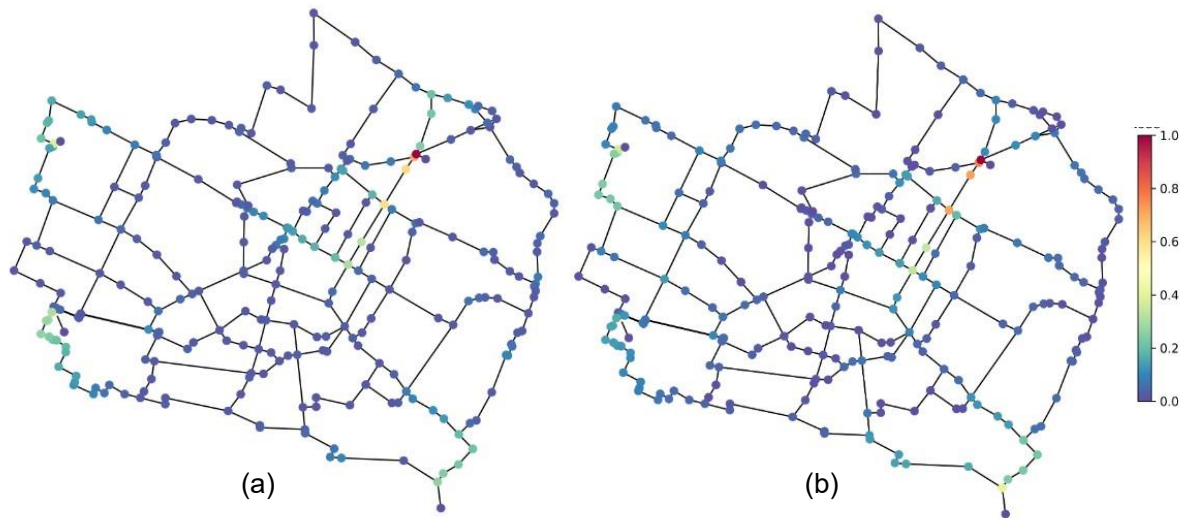
**Figura 9 – Mapas de risco de vazamentos: a) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo direcionado; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo não direcionado**



Fonte: Autora (2024).

A fase inicial da análise de intrusão de contaminantes consistiu na realização de simulações hidráulicas e de qualidade da água de maneira integrada. Em cada cenário considerado, foram contabilizados os nós nos quais a concentração de contaminantes excedia 0 mg/L. Assim, o mapa de risco resultante, apresentado na Figura 10a, identifica como crítico o nó cuja contaminação impacta uma área mais extensa quando comparado aos demais nós.

**Figura 10 – Mapas de risco de intrusão de contaminante: a) número de nós que foram atingidos pelo contaminante; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda**



Fonte: Autora (2024).

Os resultados da primeira etapa foram comparados com os obtidos na segunda etapa, na qual foram empregadas métricas de avaliação da importância de vértices para a determinação de vértices críticos em um grafo, bem como foi utilizado para a análise de vazamentos. A Figura 10b ilustra que a criticidade está diretamente associada a valores mais elevados da métrica de centralidade de intermediação entre fontes de água e nós de demanda, indicando nós que participam em um maior número de caminhos mais curtos.

## 6.2 Rede de distribuição de água – E-Town

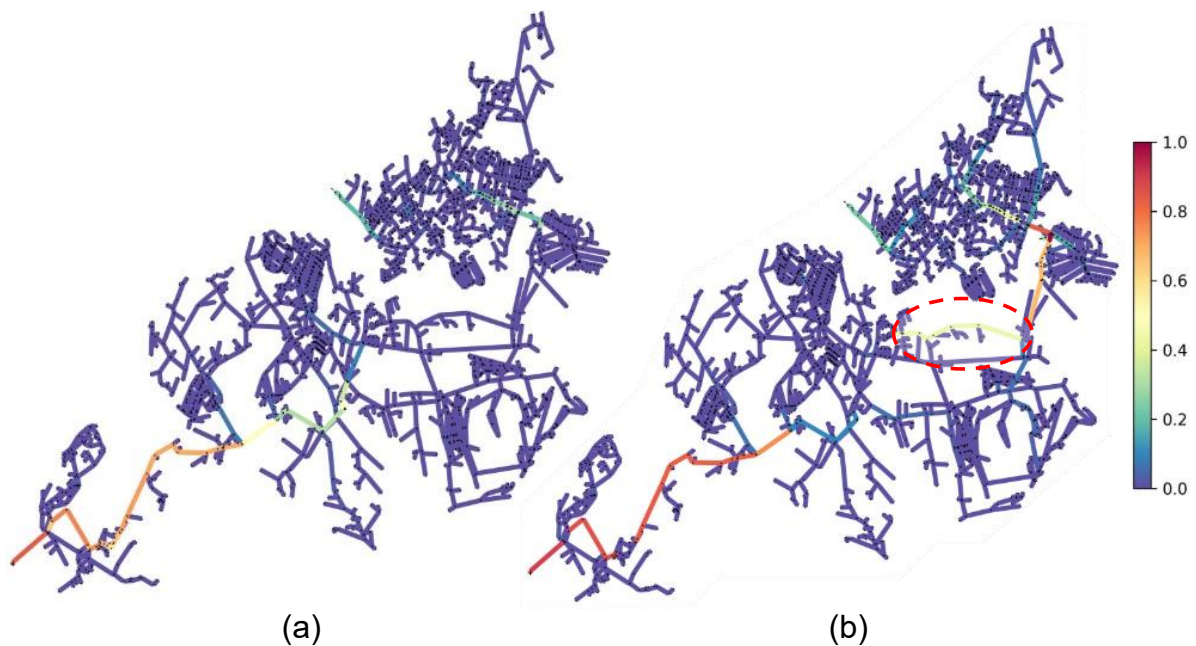
### 6.2.1 Análise de risco de tubos

Na etapa final da metodologia de ruptura, são derivados mapas de risco da rede E-Town, os quais foram desenvolvidos mediante simulações hidráulicas de cenários de ruptura e a aplicação de TRC, conforme ilustrado na Figura 11.

Na aplicação da metodologia, foram simulados 3207 isolamento de tubos, fechando-os, foram retirados 20 tubos duplicados e os 4 tubos que funcionavam como válvula de retenção. Retirou-se os tubos duplicados para poder comparar de forma igualitária com as arestas correspondentes aos tubos da aplicação de TRC. Ao usar uma matriz de adjacência para representar o grafo matematicamente, não é possível colocar mais de 1 tubo com mesmos nós iniciais e finais. Assim, foram modelados 3207 cenários de retirada de arestas para a aplicação dos cálculos de caminhos mais curtos.

O mapa de risco apresentado na Figura 11a identifica os tubos cuja ruptura resultaria em um maior número de nós desabastecidos, seguindo a simulação dirigida pela pressão. Este mapa de risco demonstra uma notável correspondência com os tubos destacados após a aplicação do cálculo dos caminhos mais curtos e da análise da quantidade de nós de demanda desconectados de suas fontes ao remover uma aresta do grafo, conforme evidenciado na Figura 11b. Portanto, identifica-se como crítica a aresta que ocasionou o maior número de desconexões ao ser retirada do grafo.

**Figura 11 – Mapas de risco de ruptura: a) número de nós que sofreram desabastecimento nos cenários de ruptura de cada trecho; b) número de nós que foram desconectados de suas fontes d'água ao retirar uma aresta do grafo**



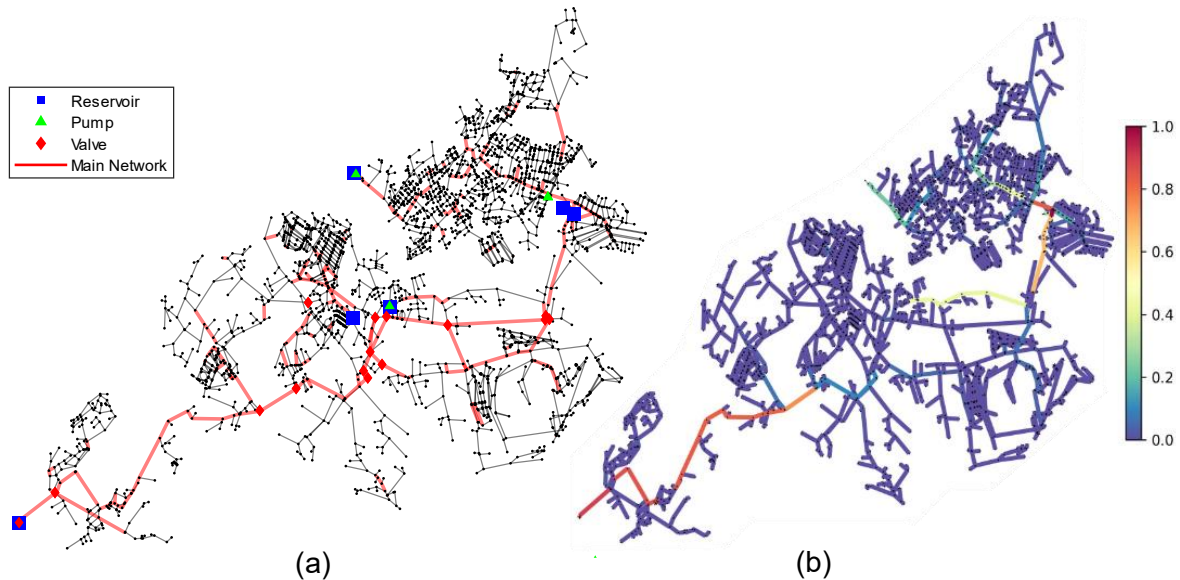
Fonte: Autora (2024).

Os tubos identificados pelas simulações hidráulicas são aqueles pelos quais as maiores vazões fluem, caracterizando-se como elementos centrais em suas respectivas vizinhanças, interligados aos reservatórios e equipados com válvulas e bombas. A maioria dos tubos críticos, identificados nessas simulações, coincidem com os tubos apontados como críticos pela aplicação de TRC. Destaca-se, contudo, uma exceção: os trechos que foram superestimados pela aplicação de TRC, referente aos tubos L1316, L2034, L2974, L1792, L1738, L1736 e L1735 (conforme Figura 10b), indicados como tubos críticos.

A Figura 12 proporciona uma análise visual comparativa entre os mapas de risco desenvolvidos pela aplicação de TRC e o mapa correspondente à rede troncal hierárquica de 10%. A rede troncal representa os tubos de maior relevância para a

manutenção do abastecimento. Os tubos identificados pela aplicação de TRC estão entre os tubos apresentados como importantes pela rede troncal, com exceção novamente, dos tubos supracitados, superestimados pelo mapa de risco gerado a partir da aplicação de TRC.

**Figura 12 – Mapas de risco de ruptura: a) rede troncal com hierarquia de 10%; b) número de nós que foram desconectados de suas fontes d'água ao retirar uma aresta do grafo**



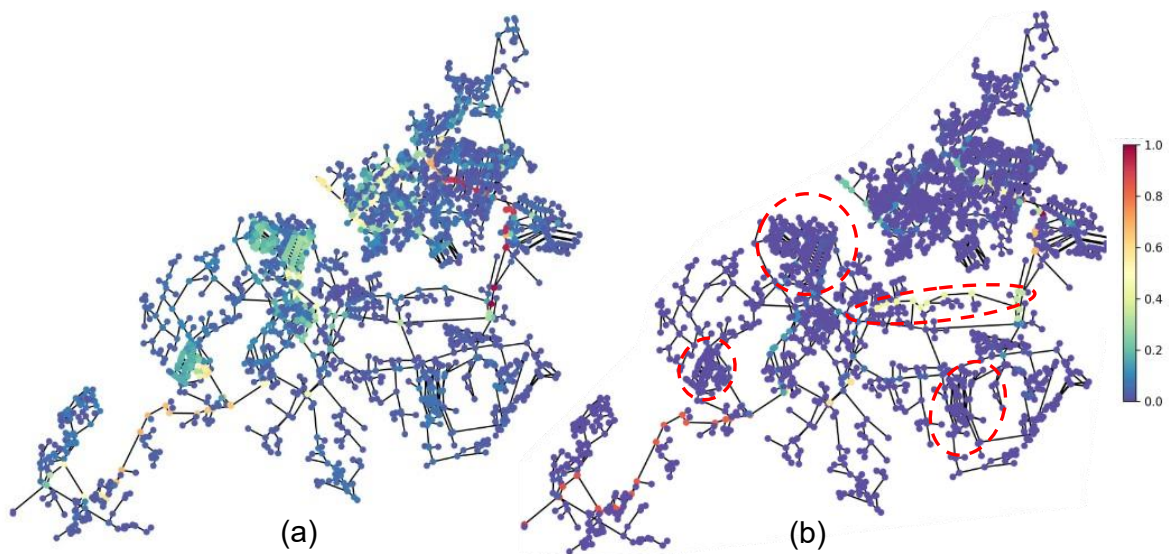
Fonte: Autora (2024).

Ao aplicar a metodologia numa rede maior, é possível ainda indetificar uma mesma correspondência das áreas mais críticas. Apesar das limitações encontradas por a TRC basear-se, principalmente, em características topológicas e não considerar os efeitos do fluxo de vazão e da capacidade do tubo na avaliação de resiliência.

### 6.2.2 Análise de risco de nós

A análise de risco dos nós aqui apresentada inicia-se com a avaliação de vazamentos, comparando as duas etapas mediante a elaboração de mapas de risco construídos por simulação hidráulica dos cenários de inserção de vazamentos nos nós da rede, juntamente com a análise via TRC. Nesse contexto, são aplicadas métricas para identificar nós relevantes na estrutura de um grafo completo, direcionado e ponderado. Dessa forma, a Figura 13 exhibe os vértices mais críticos obtidos por meio da simulação hidráulica (Figura 13a) e da aplicação da TRC (Figura 13b).

**Figura 13 – Mapas de risco de vazamentos: a) número de nós que sofreram desabastecimento nos cenários de inserção de vazamento em cada nó; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda**



Fonte: Autora (2024).

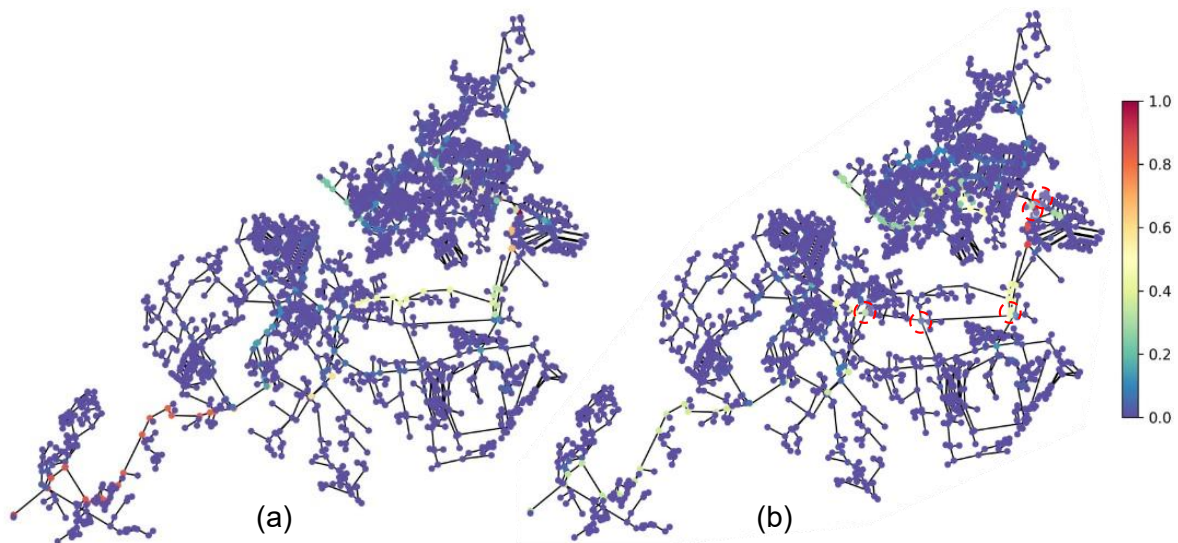
O mapa de risco derivado das simulações hidráulicas indica como crítico os nós situados numa área mais central dos agrupamentos mais densos, próximos aos trechos que transportam as maiores vazões da rede. Assim como na análise de ruptura, como destacado na Figura 13, foram indicados vértices críticos pertencentes a um caminho da rede que não pertence aos caminhos mais críticos identificados pela simulação hidráulica e que não transporta as maiores vazões. No cálculo da métrica de centralidade de intermediação, as zonas indicadas convergiram significativamente, com variação nos padrões nas zonas identificadas na Figura 13b, pelos círculos tracejados vermelhos.

A métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda foi aplicada também em um grafo não direcionado análogo a rede E-Town, como apresentado na Figura 14. Nesta figura, os cinco vértices identificados pelos círculos vermelhos, são os vértices mais críticos, com maior valor da métrica, apesar de não ser possível vê-los por ter vértices muito próximos um do outro. Dessa forma, é possível notar que ao aplicar a métrica em um grafo não direcionado numa rede com diferente complexidade (em relação à Modena), se obteve melhor convergência dos resultados ao não direcionar as arestas.

Neste mapa apresentado na Figura 14, os dois mapas são bastante semelhantes, convergindo em identificar os vértices críticos. Porém, no mapa da figura 14b, vértices

que pertencem a uma área que foi identificada previamente como divergente do mapa de vértices críticos identificados pelas simulações hidráulicas, não foram indicados como críticos. Enquanto que foram identificados vértices convergentes com as simulações hidráulicas. Estes vértices estão conectados a arestas análogas a tubos que transportam maiores vazões e possuem maiores diâmetros.

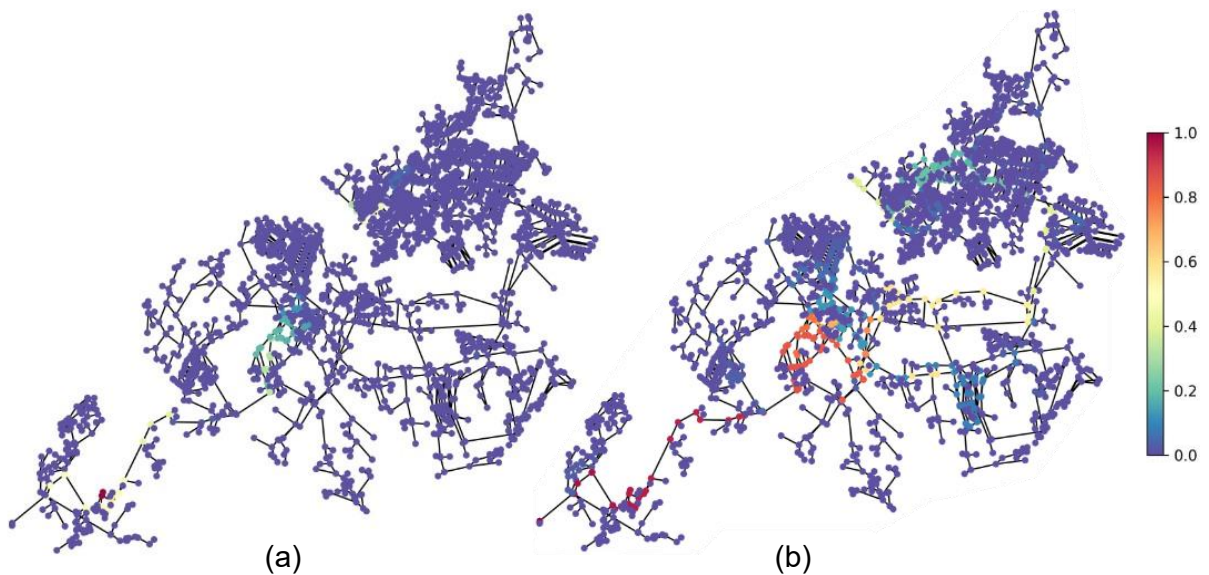
**Figura 14 – Mapas de risco de vazamentos: a) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo direcionado; b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda em um grafo não direcionado**



Fonte: Autora (2024).

Ao concluir a primeira etapa da metodologia de intrusão de contaminantes, a realização de simulações hidráulicas possibilitou a elaboração dos dois mapas de risco apresentados na Figura 15. Os mapas, evidenciados nesta figura, divergem quanto ao valor do coeficiente de massa. Uma vez que este estudo foi conduzido independentemente da origem da ameaça, considerando somente as suas consequências, a substância em questão pode ser aquela que sofre decaimento, como o cloro, de primeira ordem, de acordo com o manual do EPANET (Rossman *et al.*, 2020), com o valor do coeficiente de massa igual a -1. Alternativamente, pode ser uma substância sem decaimento, não sujeita a redução por processos químicos, físicos ou biológicos, ou seja, com o valor do coeficiente igual a 0.

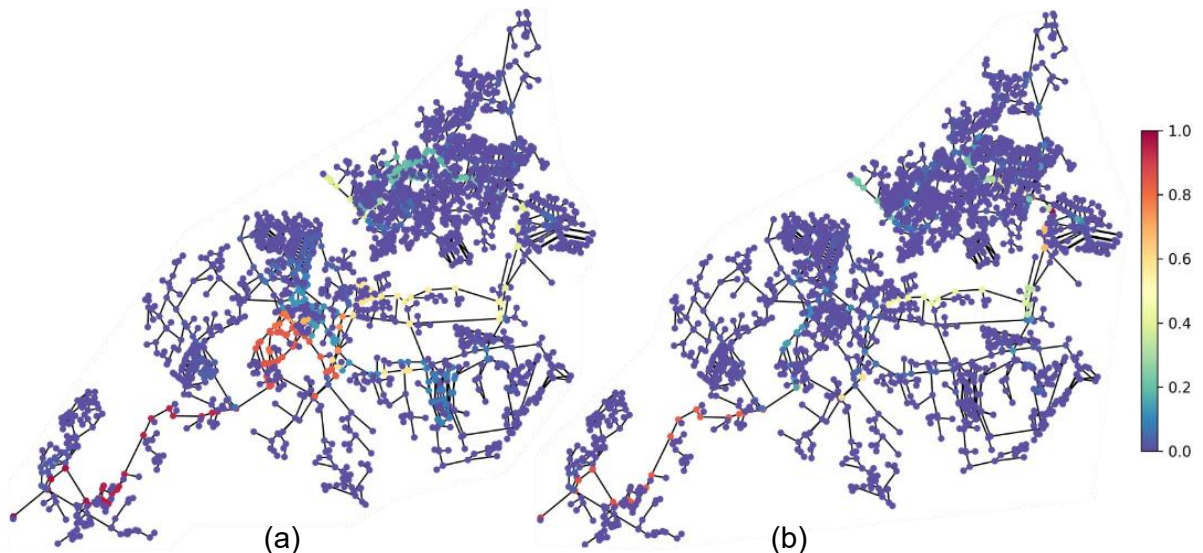
**Figura 15 – Mapas de risco de intrusão de contaminante número de nós que foram atingidos pelo contaminante ao inseri-lo em determinado nó: a) considerando o coeficiente de massa (“bulk”) igual a -1; b) considerando o coeficiente de massa igual a 0**



Fonte: Autora (2024).

Desta forma, com os dois mapas reproduzidos, foram comparados com os mapas de risco gerados pela aplicação da métrica topológica, como na Figura 16 e 17.

**Figura 16 – Mapas de risco de intrusão de contaminante: a) número de nós que foram atingidos pelo contaminante ao inseri-lo em determinado nó (com coeficiente de massa = 0); b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda aplicada ao grafo direcionado**

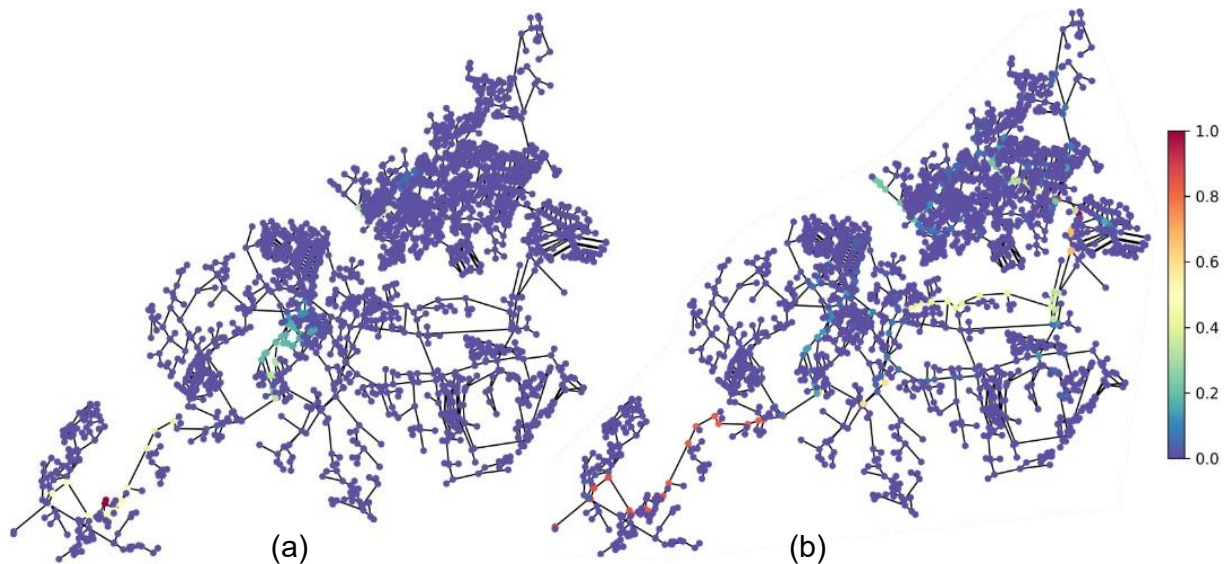


Fonte: Autora (2024).

Ao simular a intrusão de contaminante com um coeficiente de decaimento de massa igual a 0, ou seja, sem decaimento, a substância sofre redução exclusivamente por meio do seu consumo (demanda). A sua intrusão é limitada a um intervalo de tempo e sua redução é devido ao consumo ao longo da rede. Na Figura 16, foi possível notar

uma significativa convergência nos resultados, sugerindo uma forte influência topológica.

**Figura 17 – Mapas de risco de intrusão de contaminante: a) número de nós que foram atingidos pelo contaminante ao inseri-lo em determinado nó (com coeficiente de massa = -1); b) cálculo da métrica de centralidade de intermediação fonte-demanda**



Fonte: Autora (2024).

Ao comparar o mapa de risco gerado pela simulação hidráulica da intrusão de contaminante considerando um coeficiente de massa igual a -1 com o resultado obtido pela aplicação da métrica, observa-se que apenas uma parcela dos tubos indicados como crítico pela aplicação de TRC, é também indicada como crítica pela simulações hidráulicas. No entanto, a indicação persiste para os nós localizados em regiões onde ocorrem elevadas vazões.

Ao realizar a comparação entre os dois mapas, destaca-se uma notável convergência nos resultados, com a identificação de nós críticos que se encontram nas proximidades das maiores vazões da rede, estando conectados a tubos de maiores diâmetros.

## 7 CONCLUSÕES

Este estudo propõe uma investigação sobre o emprego de métricas da TRC como uma alternativa às simulações hidráulicas e de qualidade, para a análise de risco de RDA, diante de falhas como ruptura de tubos, vazamentos e intrusão de contaminantes. Para alcançar este propósito, na análise por meio da TRC, buscou-se estreitar a analogia entre RDA e redes complexas, seguindo recomendações encontradas na literatura.

Os grafos utilizados nesta modelagem possuíam direção associada às suas arestas conforme a vazão média de uma única simulação da RDA em situação de funcionamento pleno. Além disso, os grafos foram ponderados pela vazão média da simulação única original (da rede sem falhas), pela resistência dos tubos (sem simulação) e pelo tempo de viagem da água (utilizando a velocidade média da simulação sem falhas).

A aplicação de TRC nos grafos foram satisfatórias, indicando os elementos críticos de formas coincidentes com a análise de risco da RDA realizada por métodos tradicionais. Ao utilizar a métrica de caminhos mais curtos, buscou-se diferenciar entre nós de fontes d'água e nós de demanda, com o intuito de melhorar a comparação entre o cálculo desta métrica e o escoamento da água na rede.

Na análise dos vértices, dentre várias métricas testadas, a centralidade de intermediação fonte-demanda se destacou como a mais apropriada. Observou-se que a aplicação desta métrica resultou em uma maior convergência quando comparou-se os resultados entre as etapas, com mapas de riscos resultantes de simulação hidráulicas e de qualidade da água de cenários de falhas, e da aplicação de métricas de TRC. Em relação à Rede E-Town, foi identificado que a aplicação de métricas em um grafo não direcionado melhor convergiu com a análise de vazamentos por simulações hidráulicas, enquanto que em relação à análise de intrusão de contaminantes, a melhor convergência foi observada entre a simulação da intrusão com coeficiente de massa igual a 0 e a aplicação da métrica em um grafo direcionado. Para a Rede Modena, identificou-se que os mapas de risco de vazamentos e intrusão de contaminante com coeficiente de massa igual a 0 só convergiram com a métrica centralidade de intermediação de fonte-demanda aplicada ao grafo direcionado. Quando aplicada em um grafo não direcionado, indicava como críticos, trechos divergentes.

É importante ressaltar que os tanques podem atuar tanto como fonte d'água quanto como demanda de água, porém, a modelagem via TRC não consegue representar a dinâmica do comportamento dos tanques em diferentes intervalos de tempo, sendo neste trabalho considerados nós de demanda. Além disso, existem técnicas de dinâmica de pesos que favorecem o cálculo dos caminhos mais curtos, direcionando-

os por arestas correspondentes aos trechos de bombas, reduzindo o peso associado a elas (Hajibabaei *et al.*, 2023). No entanto, tais técnicas não foram aplicadas neste estudo, uma vez que as bombas foram colocadas como arestas comuns. Elas estão localizadas imediatamente após os reservatórios e tanques, com o caminho mais curto entre a fonte d'água e os nós de demanda passando por elas.

A maior vantagem desse estudo é a utilização de uma única simulação e com ela modelar a RDA via TRC, obtendo a indicação de quais os elementos mais críticos da rede, sem modelar diversos cenários. O estudo apresenta uma abordagem que deve ser testada em outras redes, com diferentes topologias, complexidades e funcionamentos hidráulicos. Além disso, essa metodologia pode ser utilizada de forma híbrida. Por exemplo, podendo ser utilizada para pré-selecionar um conjunto de tubos, identificando-os antecipadamente como críticos, usando TRC e depois avaliar a importância dos tubos com mais precisão, após modelagem hidráulica.

## REFERÊNCIAS

AGATHOKLEOUS, A.; CHRISTODOULOU, C.; CHRISTODOULOU, S. E. Topological Robustness and Vulnerability Assessment of Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 31, n. 12, p. 4007–4021, 2017.

ALCÂNTARA, M. C.; SOUZA, F. Rompimento de adutora causa desabastecimento de água em três cidades do Rio. [s. l.], 28 nov. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/rompimento-de-adutora-causa-desabastecimento-de-agua-em-tres-cidades-do-rio/#:~:text=Uma%20adutora%20de%20%C3%A1gua%20da,atuaram%20no%20conserto%20da%20tubula%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 29 jan. 2024.

APARICIO, D.; RIBEIRO, P.; SILVA, F. Extending the Applicability of Graphlets to Directed Networks. **IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 1302–1315, 2017.

ARSIC, B. *et al.* Graph spectral techniques in computer sciences. **Applicable Analysis and Discrete Mathematics**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1–30, 2012.

BALBINO, L. Tubulação rompe e destrói calçada no Bairro Serra. [s. l.], 22 ago. 2022. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2018/08/22/interna\\_gerais,982546/abastecimento-de-agua-sera-normalizado-nesta-tarde-segundo-a-copasa.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2018/08/22/interna_gerais,982546/abastecimento-de-agua-sera-normalizado-nesta-tarde-segundo-a-copasa.shtml). Acesso em: 29 jan. 2024.

BARABÁSI, A.-L.; ALBERT, R.; JEONG, H. Scale-free characteristics of random networks: the topology of the world-wide web. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [s. l.], v. 281, n. 1–4, p. 69–77, 2000.

BARABÁSI, A. L.; NEWMAN, M. E. J.; WATTS, D. J. The Structure and Function of Complex Networks. **SIAM Review**, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 167–256, 2003.

BARRAT, A. *et al.* The architecture of complex weighted networks. [s. l.], v. 101, p. 3747–3752, 2004.

BARROS, D. *et al.* An Investigation on the Effect of Leakages on the Water Quality Parameters in Distribution Networks. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 324, 2023.

BARROS, D. B. *et al.* Using data mining techniques to isolate chemical intrusion in water distribution systems. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 194, n. 3, p. 203, 2022.

BERARDI, L. *et al.* Assessing mechanical vulnerability in water distribution networks under multiple failures. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 2586–2599, 2014.

BESNER, M.-C. *et al.* Pressure Monitoring and Characterization of External Sources of Contamination at the Site of the Payment Drinking Water Epidemiological Studies. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 269–277, 2010.

BOGUSLAWSKI, P. **MODELLING AND ANALYSING 3D BUILDING INTERIORS WITH THE DUAL HALF-EDGE DATA STRUCTURE**. 2011. - University of Glamorgan/Prifysgol Morgannwg, United Kingdom, 2011.

BOLOGNESI, A. *et al.* Multiobjective Design of Water Distribution Networks through the Generation of Pseudofronts in the Hydraulically Feasible Region. **Journal of Computing in Civil Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 06014004, 2012.

BORYCZKO, K. *et al.* Risk Assessment of Lack of Water Supply Using the Hydraulic Model of the Water Supply. **Resources**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 43, 2021.

BRAGALLI, C. *et al.* Water Network Design by MINLP. [s. l.], 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº888, de 4 de maio de 2021**. 7 maio 2021.

BRISTOW, E.; BRUMBELOW, K.; KANTA, L. Vulnerability Assessment and Mitigation Methods for Interdependent Water Distribution and Urban Fire Response Systems. *In*: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2007, 2007, Tampa, Florida, United States. **World Environmental and Water Resources Congress 2007**. Tampa, Florida, United States: American Society of Civil Engineers, 2007. p. 1–10. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/40927%28243%29529>. Acesso em: 17 out. 2023.

BRUNEAU, M. *et al.* A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. **Earthquake Spectra**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 733–752, 2003.

CAMPBELL, E. *et al.* A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-objective optimization. **Journal of Hydroinformatics**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 62–76, 2016.

CANDELIERI, A.; PEREGO, R.; ARCHETTI, F. Bayesian optimization of pump operations in water distribution systems. **Journal of Global Optimization**, [s. l.], v. 71, n. 1, p. 213–235, 2018.

CONETY RAVI, S. *et al.* Analysis of water distribution network under pressure-deficient conditions through emitter setting. **Drinking Water Engineering and Science**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 1–13, 2019.

DI NARDO, A. *et al.* Applications of Graph Spectral Techniques to Water Distribution Network Management. **Water**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 45, 2018.

DI NARDO, Armando *et al.* Complex network and fractal theory for the assessment of water distribution network resilience to pipe failures. **Water Supply**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 767–777, 2018.

DI NARDO, A. *et al.* Redundancy Features of Water Distribution Systems. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 186, p. 412–419, 2017.

DI NARDO, A.; DI NATALE, M. A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks. **Engineering Optimization**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 193–211, 2011.

- DIAO, K. *et al.* Global resilience analysis of water distribution systems. **Water Research**, [s. l.], v. 106, p. 383–393, 2016.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. [s. l.], 1959.
- FANG, Q. *et al.* Research on Leak Location Method of Water Supply Pipeline Based on MVMD. **Computer Modeling in Engineering & Sciences**, [s. l.], v. 134, n. 2, p. 1237–1250, 2023.
- FLOYD, R. W. Algorithm 97: Shortest path. **Communications of the ACM**, [s. l.], v. 5, n. 6, p. 345, 1962.
- FREEMAN, L. C. A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. **Sociometry**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 35, 1977.
- FREEMAN, L. C. Centrality in social networks conceptual clarification. **Social Networks**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 215–239, 1978.
- GHEISI, A.; NASER, G. Water distribution system reliability under simultaneous multicomponent failure scenario. **Journal AWWA**, [s. l.], v. 106, n. 7, 2014. Disponível em: <https://awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.5942/jawwa.2014.106.0075>. Acesso em: 17 out. 2023.
- GIRVAN, M.; NEWMAN, M. E. J. Community structure in social and biological networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 99, n. 12, p. 7821–7826, 2002.
- GIUDICIANNI, C. *et al.* Topological Placement of Quality Sensors in Water-Distribution Networks without the Recourse to Hydraulic Modeling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s. l.], v. 146, n. 6, p. 04020030, 2020.
- GIUDICIANNI, C. *et al.* Topological Taxonomy of Water Distribution Networks. **Water**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 444, 2018.
- GIUSTOLISI, O.; LAUCELLI, D.; SAVIC, D. A. Development of rehabilitation plans for water mains replacement considering risk and cost-benefit assessment. **Civil Engineering and Environmental Systems**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 175–190, 2006.
- GIUSTOLISI, O.; RIDOLFI, L.; SIMONE, A. Tailoring Centrality Metrics for Water Distribution Networks. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 55, n. 3, p. 2348–2369, 2019.
- GOULTER, I. C. Current and future use of systems analysis in water distribution network design. **Civil Engineering Systems**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 175–184, 1987.
- GOYAL, P.; FERRARA, E. Graph embedding techniques, applications, and performance: A survey. **Knowledge-Based Systems**, [s. l.], v. 151, p. 78–94, 2018.
- HAGBERG, A.; SWART, P.; SCHULT, D. Exploring network structure, dynamics and function using Networkx. [s. l.], 2008.

HAJIBABAEI, M. *et al.* Resilience enhancement of water distribution networks under pipe failures: a hydraulically inspired complex network approach. **AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society**, [s. l.], p. jws2023180, 2023.

HAJIBABAEI, M. *et al.* Using complex network theory for missing data reconstruction in water distribution networks. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 101, p. 105114, 2024.

HAMED, M. M. *et al.* Graphical user interface for water distribution network pressure-driven analysis using artificial elements. **Sustainable Water Resources Management**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 89, 2022.

HATAM, F. *et al.* Using Nodal Infection Risks to Guide Interventions Following Accidental Intrusion due to Sustained Low Pressure Events in a Drinking Water Distribution System. **Water**, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 1372, 2019.

HERRERA, M.; ABRAHAM, E.; STOIANOV, I. A Graph-Theoretic Framework for Assessing the Resilience of Sectorised Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 1685–1699, 2016.

HUANG, Y. *et al.* Efficient Leak Localization in Water Distribution Systems Using Multistage Optimal Valve Operations and Smart Demand Metering. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 56, n. 10, p. e2020WR028285, 2020.

JONES, S. *et al.* Experimental Quantification of Intrusion Volumes due to Transients in Drinking Water Distribution Systems. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 04018026, 2019.

KANTA, L.; BRUMBELOW, K. Vulnerability, Risk, and Mitigation Assessment of Water Distribution Systems for Insufficient Fire Flows. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s. l.], v. 139, n. 6, p. 593–603, 2013.

KESSLER, A.; ORMSBEE, L.; SHAMIR, U. A methodology for least-cost design of invulnerable water distribution networks. **Civil Engineering Systems**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 20–28, 1990.

KLISE, K. A.; MURRAY, R.; HAXTON, T. An Overview of the Water Network Tool for Resilience (WNTR). [s. l.], 2018.

LAWRENCE, S.; GILES, C. L. Accessibility of information on the web. [s. l.], v. 400, 1999.

LECHEVALLIER, M. W. *et al.* The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients. **Journal of Water and Health**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 3–14, 2003.

LEE, S. *et al.* Exploring Vulnerable Nodes, Impactful Viral Intrusion Sites, and Viral Infection Risk Reductions Offered by Chlorine Boosters in Municipal Drinking Water Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s. l.], v. 148, n. 9, p. 04022048, 2022.

LEE, S.; JUNG, D. Shortest-Path-Based Two-Phase Design Model for Hydraulically Efficient Water Distribution Network: Preparing for Extreme Changes in Water Availability. **IEEE Access**, [s. l.], v. 9, p. 53358–53369, 2021.

LI, W. *et al.* Integrative Analysis of Many Weighted Co-Expression Networks Using Tensor Computation. **PLoS Computational Biology**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. e1001106, 2011.

MANSOUR-REZAEI, S.; NASER, G.; SADIQ, R. Predicting the potential of contaminant intrusion in water distribution systems. **Journal AWWA**, [s. l.], v. 106, n. 2, 2014. Disponível em: <https://awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.5942/jawwa.2014.106.0019>. Acesso em: 10 out. 2023.

MENG, F. *et al.* Topological attributes of network resilience: A study in water distribution systems. **Water Research**, [s. l.], v. 143, p. 376–386, 2018.

MORENO, J. L. **Who Shall Survive: A New Approach to the Problem of Human Interrelations**. Washington, D.C.: Nervous and Mental Disease Publishing Co., 1934. (Nervous and Mental Disease Monograph, v. 58).

NAZEMPOUR, R.; MONFARED, M. A. S.; ZIO, E. A complex network theory approach for optimizing contamination warning sensor location in water distribution networks. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 30, p. 225–234, 2018.

NEELAKANTAN, T. R.; SURIBABU, C. R.; LINGIREDDY, S. Optimisation procedure for pipe-sizing with break-repair and replacement economics. **Water SA**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 217, 2008.

NETTO, A. *et al.* **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1998.

NEWMAN, M. E. J. Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. **Physical Review E**, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 016132, 2001.

NEWMAN, M.; BARABÁSI, A.-L.; WATTS, D. J. **The Structure and Dynamics of Networks**. [S. l.]: Princeton University Press, 2006. (Princeton Studies in Complexity).

PACCHIN, E.; ALVISI, S.; FRANCHINI, M. A New Non-iterative Method for Pressure-driven Snapshot Simulations with EPANET. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 186, p. 135–142, 2017.

PAGANO, A.; GIORDANO, R.; PORTOGHESE, I. A Pipe Ranking Method for Water Distribution Network Resilience Assessment Based on Graph-Theory Metrics Aggregated Through Bayesian Belief Networks. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 36, n. 13, p. 5091–5106, 2022.

PALLA, G.; BARABÁSI, A.-L.; VICSEK, T. Quantifying social group evolution. **Nature**, [s. l.], v. 446, n. 7136, p. 664–667, 2007.

PELLETIER, G.; MAILHOT, A.; VILLENEUVE, J.-P. Modeling Water Pipe Breaks—Three Case Studies. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s. l.], v. 129, n. 2, p. 115–123, 2003.

PHAN, H. C. *et al.* Managing water main breaks in distribution networks—A risk-based decision making. **Reliability Engineering & System Safety**, [s. l.], v. 191, p. 106581, 2019.

RATHI, S. *et al.* Risk Based Analysis for Contamination Event Selection and Optimal Sensor Placement for Intermittent Water Distribution Network Security. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 30, n. 8, p. 2671–2685, 2016.

ROSSMAN, L. A. *et al.* EPANET 2.2 User Manual. [s. l.], 2020.

SADAVARE, A. B.; KULKARNI, D. R. V. A Review of Application of Graph Theory for Network. [s. l.], v. 3, p. 5296–5300, 2012.

SHANG, F.; UBER, J. G.; ROSSMAN, L. A. Modeling Reaction and Transport of Multiple Species in Water Distribution Systems. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 808–814, 2008.

SITZENFREI, R. *et al.* Using Complex Network Analysis for Optimization of Water Distribution Networks. [s. l.], v. 56, 2020. Disponível em: Acesso em: 9 jun. 2022.

SKIENA, S. S. **The Algorithm Design Manual**. London: Springer London, 2008. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-84800-070-4>. Acesso em: 9 out. 2023.

SPIZZO, F. *et al.* Water Distribution Network Partitioning Based on Complex Network Theory: The Udine Case Study. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 1621, 2023.

STROGATZ, S. H. Exploring complex networks. **Nature**, [s. l.], v. 410, n. 6825, p. 268–276, 2001.

TODINI, E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. **Urban Water**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 115–122, 2000.

TV GLOBO; G1 SP. Rompimento de tubulação abre cratera e provoca alagamento na Marginal Pinheiros em SP. São Paulo, 2 maio 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/05/02/rompimento-de-tubulacao-abre-cratera-e-provoca-alagamento-na-marginal-pinheiros-em-sp.ghtml>. Acesso em: 29 jan. 2024.

ULUSOY, A.-J.; STOIANOV, I.; CHAZERAIN, A. Hydraulically informed graph theoretic measure of link criticality for the resilience analysis of water distribution networks. **Applied Network Science**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 31, 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Potential Contamination Due to Cross-Connections and Backflow and the Associated Health Risks. [s. l.], 2002.

VAIRAVAMOORTHY, K.; YAN, J.; GORANTIWAR, S. D. Modelling the risk of contaminant intrusion in water mains. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management**, [s. l.], v. 160, n. 2, p. 123–132, 2007.

VIÑAS, V.; MALM, A.; PETTERSSON, T. J. R. Overview of microbial risks in water distribution networks and their health consequences: quantification, modelling, trends, and future implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 149–159, 2019.

YAZDANI, A.; JEFFREY, P. **A complex network approach to robustness and vulnerability of spatially organized water distribution networks**. [S. l.]: arXiv, 2010. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1008.1770>. Acesso em: 9 jun. 2022.

YAZDANI, A.; JEFFREY, P. Water distribution system vulnerability analysis using weighted and directed network models: VULNERABILITY ANALYSIS USING NETWORK MODELS. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 48, n. 6, 2012. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2012WR011897>. Acesso em: 29 nov. 2022.

YU, H.; GERSTEIN, M. Genomic analysis of the hierarchical structure of regulatory networks. [s. l.], v. 103, p. 14724–14731, 2006.

ZHOU, W. System reliability of corroding pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [s. l.], v. 87, n. 10, p. 587–595, 2010.

ZHU, J.; WANG, L.; WU, T. A sorting method of node based on Eigenvector and Closeness centrality. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 2031, n. 1, p. 012043, 2021.