

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Escola de Engenharia de São Carlos

Análise de metodologias para determinação de resiliência em redes de distribuição de água para abastecimento e aplicação em um setor de rede existente.

Autor: Gustavo Henrique Brum

Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Maria Mercedes Gamboa-Medina.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GUSTAVO HENRIQUE BRUM

Análise de metodologias para determinação de resiliência em redes de  
distribuição de água e aplicação em um setor de rede existente.

São Carlos  
2023



GUSTAVO HENRIQUE BRUM

Análise de metodologias para determinação de resiliência em redes de distribuição de água e aplicação em um setor de rede existente.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Maria Mercedes Gamboa-Medina.

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2023



AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Brum, Gustavo Henrique  
B893a      Análise de metodologias para determinação de resiliência em redes de distribuição de água para abastecimento e aplicação em um setor de rede existente. / Gustavo Henrique Brum; orientadora Maria Mercedes Gamboa Medina. São Carlos, 2023.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Abastecimento. 2. Robustez. 3. Confiabilidade. 4. Vulnerabilidade. 5. Métricas topológicas. 6. Métricas hidráulicas. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GUSTAVO HENRIQUE BRUM.**

Título da dissertação: "Análise de metodologias para determinação de resiliência de distribuição e água e aplicação em um setor de rede existente".

Data da defesa: 22/05/2023.

### Comissão Julgadora

### Resultado

Profa. Dra. **Maria Mercedes Gamboa Medina (Orientadora)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Frederico Keizo Odan**  
(Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/CEFET-MG)

Aprovado

Prof. Dr. **Jamil Alexandre Ayach Anache**  
(Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Associado **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente tenho de agradecer à minha família, em especial meus pais e meus avós que viabilizaram material e imaterialmente a realização desse trabalho. Ao suporte dado por amigos e colegas cujo apoio foi pilar fundamental para este estudo. Sou e serei sempre grato por vocês em minha vida.

Meu agradecimento aos docentes do PPG-SHS por todos ensinamentos transmitidos que permitiram a criação de uma perspectiva mais acurada e profunda acerca dos inúmeros desafios e soluções que o saneamento no Brasil ainda tem pela frente. A todos trabalhadores da Universidade de São Paulo (USP) em especial aos que mantem viva a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) e que também viabilizam a produção de ciência e conhecimento no país.

Minha eterna gratidão à Prof.º Dr.<sup>a</sup> Maria Mercedes Gamboa Medina pela orientação e suporte fornecidos durante a elaboração dessa dissertação. Seus ensinamentos e compreensão foram inestimáveis em momentos desafiadores e complicados. Sou profundamente agradecido pela oportunidade de aprender com a senhora e aplicar esses conhecimentos em minha trajetória acadêmica e profissional. Obrigado pelo apoio valioso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo subsídio financeiro a concretização deste trabalho. Ao Sistema Único de Saúde (SUS) e ao Centro de Atenção Psicossocial (CAPS) que me acolheram e possibilitaram acesso gratuito e de qualidade à serviços de saúde em momentos de necessidade. E ao povo brasileiro que com o suor do seu trabalho possibilitam a existência deste e de tantos outros estudos. Muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.



*“...cada pequena diferença pode se tornar grande se for insistida, se for colocada em primeiro plano e se as pessoas começarem a procurar todas as raízes e ramificações dessa diferença. ”*

(ULYANOV, 1904, cap. Parágrafo Um das Regras)



## RESUMO

BRUM, G. H. **Análise de metodologias para determinação de resiliência de distribuição de água e aplicação em um setor de rede existente**. 2023. Dissertação (Mestrado, Pág. 213) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Atualmente entende-se que os sistemas urbanos, dentre os quais os sistemas de abastecimento de água, precisam ter capacidade de, após serem impactados negativamente, voltar ao seu estado e forma anteriores no menor tempo e menores danos possíveis, isto é, devem ser resilientes. Considerando o crescente número de estudos a respeito do tema, as diversificadas abordagens e terminologias acadêmicas utilizadas e a problemática brasileira a respeito dessas infraestruturas de vital importância para a sociedade, vemos que a importância da resiliência é reconhecida, mas não sua compreensão, aplicação é ainda um grande desafio. A presente pesquisa teve por objetivo a análise, por meio da revisão sistemática da literatura e da aplicação em um estudo de caso, de diferentes medidas de resiliência em redes de distribuição de água. Na primeira parte do estudo encontrou-se que análises de características como a robustez ou a vulnerabilidade têm sido abordadas desde décadas anteriores, e que a concreção de métricas de resiliência tem recebido mais atenção recentemente e ainda não há consenso nem aplicação massiva na prática. No estudo de caso foi considerada uma rede real e seis cenários com alterações da conectividade ou ocorrência de falhas (rupturas) na rede, e neles a resiliência foi quantificada aplicando a mais comum métrica hidráulica e várias métricas topológicas. As observações de correlação entre as métricas demonstraram em alíneas gerais variações sutis entre os cenários de falha observados, o que eventualmente pode indicar relações causais entre diferentes aspectos que extrapolam as condições restritas à caracterização da própria falha. Outro resultado interessante foi a capacidade das métricas em determinar, com razoabilidade, condições de aumento em extensões de tubulações específicas visando a melhoria do fluxo em situações de vulnerabilidade da rede. O estudo mostra a importância de integrar diferentes tipos de métricas e considerar os tipos de evento que são considerados para poder fazer uma quantificação útil da resiliência em redes de distribuição de água.

**Palavras-chave:** Abastecimento; robustez; resiliência; vulnerabilidade; métricas topológicas; métricas hidráulicas.





## ABSTRACT

BRUM, G. H. **Analysis of methodologies for determining water distribution resilience and application in an existing network sector.** 2023. Dissertation (Masters, Pag. 213) – São Carlos School of Engineering, São Paulo University, São Carlos, 2023.

Currently, it is understood that urban systems, including the water distribution systems, need to have the capacity to return to their previous state and form as quickly and with as little damage as possible after being negatively impacted; that is, they must be resilient. Considering the growing number of studies on the topic, multiple strategies and academic terminologies used, also the Brazilian infrastructures challenges regarding these structures. It is evident the wide recognition of resilience engineering importance but its comprehension and application remain significant challenges, moreover the methodologies and even definitions used are still open issues. This research aimed to analyze, through a systematic literature review and a case study application, different resilience measures in water distribution networks. In the first part of the study, the results indicate that the use of terms such as robustness or vulnerability have been addressed for decades, besides the application of resilience metrics has only received more recent interest, yet a consensus and widespread application are still lacking. In the case study, a real network and six scenarios with changes in connectivity or failures (ruptures) in the network were considered, and resilience was quantified by applying the most common hydraulic metric and various topological metrics. Correlation analyses between the metrics show minimal changes between failure scenarios, indicating the impact of specific network conditions being greater than that of the failure itself. Another interesting result was the metrics' ability to reasonably determine the conditions for increasing pipes to improve flow in network vulnerability conditions. The study demonstrates the importance of integrating different types of metrics and considering the types of events that are considered to make a useful quantification of resilience in water distribution networks.

**Keywords:** Supply; robustness; resilience; vulnerability; topological metrics; hydraulic metrics.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de procedimentos da revisão sistemática .....	35
Figura 2 – Graus de refinamento e <i>strings</i> de busca utilizados .....	36
Figura 3 – Percentual normalizado dos principais termos de busca relacionados ao tema. ....	37
Figura 4 – Principais áreas temáticas em relação a cada termo na base Web of Science (WoS). .....	38
Figura 5 – Principais áreas temáticas em relação a cada termo na base SCOPUS.....	39
Figura 6 – Associação de cada termo em função da <i>string</i> de busca de 2º grau.....	40
Figura 7 – Associação de cada termo em função da <i>string</i> de busca de 3º grau.....	42
Figura 8 – Curva de Resposta a Performance (PRF).....	48
Figura 9 – Fases de transição do comportamento resiliente.....	49
Figura 10 – Taxa de falhas de tubulações para diferentes materiais por diâmetros. ....	56
Figura 11 – Tipos de falhas em redes de abastecimento de água.....	58
Figura 12 – Critérios e métodos para medidas de confiabilidade em redes de água.....	60
Figura 13 – Exemplo de traçado malhado (esquerda) e ramificado (direita). ....	65
Figura 14 – Representação das redes complexas não direcionais [a] e direcionadas [b]. ....	67
Figura 15 – Fluxograma de aplicação dos cenários.....	81
Figura 16 – Fluxograma de modelos e métricas.....	83
Figura 17 – Fluxograma de implementação do procedimento de centralidade média ponderada .....	86
Figura 18 – Relevância percentual dos setores da autarquia de Araraquara/SP.....	94
Figura 19 – Percentual de resiliência dos setores da autarquia de Araraquara/SP.....	95
Figura 20 – Modelo com cotas de nós do setor da rede .....	99
Figura 21 – Distribuição de frequências da altimetria dos nós da rede.....	100
Figura 22 – Número de trechos por diâmetro na rede .....	101
Figura 23 – Distribuição dos diâmetros das tubulações ao longo da rede.....	102
Figura 24 – Comportamento da demanda diária em fator multiplicativo (k).....	103
Figura 25 – Mapa de isolinhas de consumo-base (L/s) para o setor em estudo. ....	104
Figura 26 – Comportamento de nível hidráulico do reservatório de nível fixo. ....	105
Figura 27 – Comportamento das pressões em metros nos nós com demanda ao longo do período de um dia de simulação. ....	106
Figura 28 – Trechos ponte e nós de fim de trecho (vermelho).....	107
Figura 29 – Traçado do trecho PA adicionado ao setor (vermelho).....	111

Figura 30 – Altimetria e comprimento do trecho adicional PA. ....	112
Figura 31 – Tubulações de adução de água tratada do setor (vermelho). ....	113
Figura 32 – Perda de carga unitária (m/m) (esquerda) e vazões (L/s) (direita) ao longo do tempo para cada conduto. ....	114
Figura 33 – 2,5 % dos trechos selecionados para falha. ....	117
Figura 34 – Instantes de abertura das tubulações para falha de 2,5% das tubulações. ....	118
Figura 35 – 5 % dos trechos selecionados para falha. ....	119
Figura 36 – Instantes de abertura das tubulações para falha de 5% das tubulações. ....	120
Figura 37 – Localização espacial do grau dos nós (k) para o traçado em estudo. ....	125
Figura 38 – Distribuição quantitativa e percentual de grau dos nós para setor original. ....	126
Figura 39 – Agregado do grau dos nós de cada trecho ao longo da rede [a] e produto de graus agregados pela vazão média de cada trecho no modelo [b] para setor não alterado. ....	127
Figura 40 – Frequência acumulada de comprimento médio mais curto ( $APL_e$ ) ....	128
Figura 41 – Mapa de calor para centralidade média topológica da rede no cenário original. ....	130
Figura 42 – Frequência acumulada da centralidade média ( $C_b$ ) em relação ao grau dos nós no cenário original. ....	131
Figura 43 – Frequência acumulada dos valores de centralidade média normalizada. ....	132
Figura 44 – Nós de centralidade média igual a $2\sigma$ . ....	133
Figura 45 – Centralidade dos nós para o cenário original, cenário I e subcenários do cenário II. ....	135
Figura 46 – Mapa do traçado de acordo com centralidade média dos trechos ( $C_{eb}$ ). ....	136
Figura 47 – Frequência acumulada de centralidade de trechos ( $C_{eb}$ ). ....	137
Figura 48 – Destaque de traçados com maior significância ( $2\sigma$ ) de acordo com a centralidade de trechos ( $C_{eb}$ ). ....	139
Figura 49 – Gráfico dos conjuntos de centralidade de nós (esquerda) e de trechos (direita). ....	140
Figura 50 – Matriz de correlação de aferições topológicas de variadas redes reais e sintéticas. ....	145
Figura 51 – Frequência e magnitude das pressões excedentes na rede. ....	147
Figura 52 – Localização dos nós com pressões em excesso. ....	147
Figura 53 – Comportamento dos valores de $I_T$ ao longo da simulação para o cenário original. ....	149
Figura 54 – Comportamento horário do Índice de Todini para o Cenário I e Original. ....	150
Figura 55 – Comportamento horário da resiliência no modelo de acordo com o Índice de Todini ( $I_r$ ) para os subcenário do Cenário II e Original. ....	151

Figura 56 – Comportamento horário da resiliência para os instantes de incremento de falha de acordo com o Índice de Todini para o subcenário de 2,5% do cenário III.....	152
Figura 57 – Comportamento horário da resiliência de acordo com o Índice de Todini para cada instante de falha do subcenário de 5% do cenário III.....	153
Figura 58 – Centralidade média com dados de vazão média diária agregados do cenário original. ....	154
Figura 59 – Quartis de concentração de valores de centralidade de intermediação para instantes horário de maior interesse no cenário original. ....	156
Figura 60 – Mapa de calor com distribuição espacial da centralidade média de acordo com as vazões horárias indicadas para o cenário I. ....	157
Figura 61 – Centralidade de intermediação para os instantes 2 AM [a] e 10 AM [b] do cenário I em comparação ao cenário original.....	158
Figura 62 – Comportamento do coeficiente de variação (CV) dos valores do índice CI para o cenário original e cenário I ao longo do dia. ....	160
Figura 63 – Variação percentual da centralidade nos nós do cenário I em relação ao cenário original para a CI ponderada [a] e centralidade média não ponderada [b].....	161
Figura 64 – Distribuição espacial da centralidade de intermediação com ponderação de vazões horárias para subcenário II de remoção da adutora p1p. ....	163
Figura 65 – Variações percentuais entre o cenário II – p1p e cenário original no instante 10AM. ....	164
Figura 66 – Distribuição espacial da centralidade de intermediação com ponderação de vazões horárias para subcenário II de remoção da adutora p22e. ....	165
Figura 67 – Variações percentuais entre o cenário II – p22e e cenário original no instante 10AM. ....	166
Figura 68 – Conexões entre regiões da rede (vermelho) indicando pobre conectividade local. ....	167
Figura 69 – Distribuição espacial da centralidade de intermediação com ponderação de vazões horárias para subcenário II de remoção da adutora p24q. ....	168
Figura 70 – Variações percentuais entre o cenário II – p24q e cenário original no instante 10AM. ....	169
Figura 71 – Centralidade de Intermediação (CI) para o cenário original e os subcenários do cenário II.....	170
Figura 72 – Distribuição espacial dos coeficientes de variação (CV) para pressão disponível em subcenário do cenário II em relação ao cenário original. ....	171

Figura 73 – Mapa de calor da centralidade de intermediação para subcenário do cenário III com falha de 2,5% dos trechos em três instantes. ....	173
Figura 74 – Variações percentuais entre o subcenário III 2,5 % e cenário original no instante 10AM.....	174
Figura 75 – Mapa de calor da centralidade de intermediação para subcenário do cenário III com falha de 5% dos trechos em três instantes. ....	175
Figura 76 – Variações percentuais entre o subcenário III - 5 % e cenário original no instante 10AM.....	176
Figura 77 – Coeficiente de Variação (CV) para centralidade média de nós (Cb) ponderada pelas vazões. ....	177
Figura 78 – Variação percentual do somatório das vazões horárias de cada trecho no subcenário III-2,5% e cenário original.....	178
Figura 79 – Variação percentual do somatório das vazões horárias de cada trecho no subcenário III-5% e cenário original.....	179
Figura 80 – Coeficiente de Variação (CV) para centralidade média de trechos (Ceb) ponderada pelas vazões. ....	180
Figura 81 – Resultado por nó para o Índice de resiliência ( $I_{GT}$ ) para o cenário original no instante 10AM.....	181
Figura 82 – Matrizes de correlação entre variáveis em quatro instantes destacados. ....	182
Figura 83 – Mapa da rede com valores para $I_{GT}$ – Cenário I para o instante 10AM. ....	183
Figura 84 – Matrizes de correlação para quatro instantes de simulação indicados para o cenário I.....	184
Figura 85 – Diferença percentual das correlações em três instantes indicados em relação à correlação do cenário original. ....	185
Figura 86 – Índice $I_{GT}$ para cada subcenário do cenário II de tubulação interrompida.....	186
Figura 87 – Matrizes de correlação para cada subcenário do cenário II no instante 10AM. .	187
Figura 88 – Matrizes de diferença percentual de cada subcenário do cenário II em relação ao cenário original.....	188
Figura 89 – Mapa dos valores de resiliência $I_{GT}$ médios para o subcenário de 2,5% de falha do cenário III no instante 10AM.....	189
Figura 90 – Matrizes de correlação para dois instantes indicados no subcenário 2,5% do cenário III. ....	190
Figura 91 – Matrizes de diferença percentual de correlação entre o subcenário de 2,5% e o cenário original.....	191

Figura 92 – Mapa dos valores de resiliência $I_{GT}$ médios para o subcenário de 5 % de falha do cenário III. ....	192
Figura 93 – Matrizes de correlação ao longo de quatro horários do dia indicados para o subcenário de 5% do cenário III. ....	193
Figura 94 – Matriz de diferenças entre a topologia original e o subcenário de 5% do cenário III. ....	194
Figura 95 – Variação do comportamento do Coeficiente de Variação (CV) para os conjuntos de resultados de $I_{GT}$ [b] e Centralidade de Intermediação com vazão (CI) [a]. ....	195
Figura 96 – Valores de vulnerabilidade (VI) para cada cenário. ....	198



## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 – Correlação entre termos associados a redes de abastecimento e recursos hídricos	43
Tabela 2 – Aspectos fundamentais à capacidade de resiliência. ....	47
Tabela 3 – Dependência do setor de água e degradação dos sistemas por interrupção do fornecimento. ....	54
Tabela 4 – Fatores e falhas por material de composição da tubulação.....	55
Quadro 1 – Questões, importância e resposta da autarquia.....	96
Quadro 2 – Características topológicas e espectrais para o modelo original e Cenários I e II. ....	122
Quadro 3 – Características topológicas para os instantes de falha para o Cenário III com 2,5 % de trechos falha. ....	123
Quadro 4 – Média e desvio padrão de cenário original e cenário I. ....	158



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
2	OBJETIVOS.....	31
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	31
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	32
3.1	ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DA BIBLIOGRAFIA.....	32
3.2	METODOLOGIA DE REVISÃO SISTEMÁTICA .....	33
3.3	RESULTADO DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	37
<b>3.3.1</b>	<b>1° Grau: <i>keywords</i> primárias.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.2</b>	<b>2° Grau: contexto de água e redes.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.3</b>	<b>3° Grau: problema especificado. ....</b>	<b>41</b>
3.4	ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL .....	44
3.5	RESILIÊNCIA E SUAS VARIANTES .....	46
<b>3.5.1</b>	<b>Resiliência.....</b>	<b>46</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Confiabilidade.....</b>	<b>49</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Redundância e robustez .....</b>	<b>50</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Vulnerabilidade .....</b>	<b>51</b>
<b>3.5.5</b>	<b>Conectividade.....</b>	<b>52</b>
3.6	NATUREZA DAS FALHAS .....	53
<b>3.6.1</b>	<b>Riscos, ameaças e vulnerabilidades.....</b>	<b>57</b>
3.7	CLASSIFICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE MEDIÇÃO DE RESILIÊNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA .....	59
3.8	REDES COMPLEXAS .....	63
3.9	REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: MORFOLOGIA NO CONTEXTO TOPOLÓGICO.....	64
3.10	MÉTODOS DE ANÁLISES TOPOLÓGICAS .....	66
<b>3.10.1</b>	<b>Métricas topológicas de redes complexas. ....</b>	<b>68</b>

3.10.1.1	<i>Densidade dos trechos</i> .....	69
3.10.1.2	<i>Grau médio dos nós</i> .....	69
3.10.1.3	<i>Coeficiente de aglomeração</i> .....	70
3.10.1.4	<i>Assortatividade</i> .....	71
3.10.1.5	<i>Coeficiente de malha</i> .....	72
3.10.1.6	<i>Excentricidade dos grafos</i> .....	73
3.10.1.7	<i>Comprimento médio dos trechos</i> .....	74
3.10.1.8	<i>Centralidade média</i> .....	75
3.10.1.9	<i>Centralidade média de trechos</i> .....	76
<b>3.10.2</b>	<b>Teoria espectral dos grafos</b> .....	<b>77</b>
3.10.2.1	<i>Auto Lacuna (Eigengap)</i> .....	77
3.10.2.2	<i>Raio Espectral ou maior autovalor</i> .....	78
3.10.2.3	<i>Lacuna Espectral</i> .....	78
3.10.2.4	<i>Conectividade algébrica</i> .....	79
3.11	LIMITAÇÕES DAS ANÁLISES TOPOLÓGICAS .....	79
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	80
4.1	AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA .....	82
<b>4.1.1</b>	<b>Índice de Resiliência de Todini (<math>I_r</math>)</b> .....	<b>84</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Centralidade de intermediação</b> .....	<b>85</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Índice de resiliência por centralidade média do nó com a fonte (<math>I_{GT}</math>)</b> .....	<b>88</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Índice de vulnerabilidade por entropia (<math>VIE</math>)</b> .....	<b>89</b>
4.2	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL .....	91
<b>4.2.1</b>	<b>EPANET</b> .....	<b>91</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Pacote WINTER/EPA (Water Network Tool for Resilience)</b> .....	<b>92</b>
4.2.2.1	<i>Métricas de resiliência inseridas no pacote</i> .....	92
10.1	ESTUDO DE CASO: SETOR MARTINEZ – ARARAQUARA/SP .....	94

<b>10.1.1</b>	<b>Estudo de caso do sistema de abastecimento de Araraquara acerca de sua resiliência frente às mudanças climáticas.....</b>	<b>94</b>
<b>10.1.2</b>	<b>Local do estudo .....</b>	<b>97</b>
<b>10.1.3</b>	<b>Modelo hidráulico.....</b>	<b>98</b>
<i>10.1.3.1</i>	<i>Elevação .....</i>	<i>99</i>
<i>10.1.3.2</i>	<i>Diâmetros .....</i>	<i>101</i>
<i>10.1.3.3</i>	<i>Vazões de demanda e pressões.....</i>	<i>103</i>
<i>10.1.3.4</i>	<i>Trechos de fim de rede e trechos ponte .....</i>	<i>107</i>
<b>10.2</b>	<b>MODELO TOPOLÓGICO.....</b>	<b>108</b>
<b>10.3</b>	<b>CENÁRIOS E CONDIÇÕES DE DISRUPÇÃO.....</b>	<b>109</b>
<b>10.3.1</b>	<b>Cenário I: adição de tubulação.....</b>	<b>110</b>
<b>10.3.2</b>	<b>Cenário II: isolamento de adutoras de água tratada .....</b>	<b>113</b>
<b>10.3.3</b>	<b>Cenário III: isolamento de tubulações.....</b>	<b>115</b>
<b>11</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>121</b>
<b>11.1</b>	<b>MÉTRICAS TOPOLÓGICAS .....</b>	<b>121</b>
<b>11.1.1</b>	<b>Densidade de trechos (q), razão trecho-nó (e) e grau médio dos nós.....</b>	<b>124</b>
<b>11.1.2</b>	<b>Comprimento médio dos trechos (APL e APLe) .....</b>	<b>128</b>
<b>11.1.3</b>	<b>Centralidade média de nós (C<sub>b</sub>) .....</b>	<b>129</b>
<b>11.1.4</b>	<b>Centralidade média de trechos (C<sub>eb</sub>).....</b>	<b>136</b>
<b>11.1.5</b>	<b>Coefficiente de malha (R<sub>m</sub>), assortatividade (Γ) e diâmetro do grafo (D) .</b>	<b>141</b>
<b>11.1.6</b>	<b>Métricas topológicas espectrais .....</b>	<b>143</b>
<b>11.2</b>	<b>ÍNDICE DE TODINI (I<sub>R</sub>).....</b>	<b>146</b>
<b>11.2.1</b>	<b>Cenário original .....</b>	<b>146</b>
<b>11.2.2</b>	<b>Cenário I.....</b>	<b>149</b>
<b>11.2.3</b>	<b>Cenário II .....</b>	<b>151</b>
<b>11.2.4</b>	<b>Cenário III.....</b>	<b>152</b>
<b>11.3</b>	<b>ÍNDICE DE CENTRALIDADE DE INTERMEDIÇÃO.....</b>	<b>154</b>

11.3.1	<b>Cenário original</b> .....	<b>154</b>
11.3.2	<b>Cenário I</b> .....	<b>157</b>
11.3.3	<b>Cenário II</b> .....	<b>162</b>
11.3.4	<b>Cenário III</b> .....	<b>172</b>
11.4	ÍNDICE DE RESILIÊNCIA POR CENTRALIDADE MÉDIA NÓ-FONTE ( $I_{GT}$ ) 180	
11.4.1	<b>Cenário original</b> .....	<b>180</b>
11.4.2	<b>Cenário I</b> .....	<b>183</b>
11.4.3	<b>Cenário II</b> .....	<b>185</b>
11.4.4	<b>Cenário III</b> .....	<b>188</b>
11.5	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE ( $VI_E$ ).....	197
12	CONCLUSÃO.....	199
13	SUGESTÕES A FUTUROS ESTUDOS .....	202
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>204</b>
	APÊNDICE A – PRESSÕES E VAZÕES MÁXIMAS E MÍNIMAS PARA CADA CENÁRIO. ....	220
	APÊNDICE B – RELATÓRIO EPANET 2.0 DE ADVERTÊNCIAS PARA O SUBCENÁRIO.....	222
	APÊNDICE C – CONTROLES SIMPLES PARA FALHAS DO SUBCENÁRIO III – 2,5% .....	223
	APÊNDICE D – CONTROLES SIMPLES PARA FALHAS DO SUBCENÁRIO III – 5% .....	224
	APÊNDICE E – RELATÓRIO DE CONDIÇÕES ELEMENTARES DO MODELO EPANET ORIGINAL DO SETOR. ....	226
	ANEXO A – TABELA DE REDES E MÉTRICAS TOPOLÓGICAS .....	228

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço dos processos de urbanização, produção, comunicação e tantos outros, a estrutura social, suas atividades econômicas, de consumo e logísticas tem se tornado cada vez mais refinadas, complexas e interconectadas. Os benefícios e as melhorias na qualidade de vida são evidentes, contudo, essa complexidade e alta conectividade entre serviços, redes e sistemas fazem surgir problemas, riscos, vulnerabilidade e, portanto, desafios das mais diferentes naturezas. Parte destes desafios se encontram nas eventuais fragilidades das estruturas, sistemas e redes de caráter essenciais e básicos à manutenção da sociedade contemporânea que por vezes são vulneráveis e passíveis à sofrerem perturbações e eventos disruptivos que possam abalar as fundações que sustentam a sociedade moderna, pondo em cheque a ordem social, segurança nacional e diversos outros setores (RIBEIRO; GONÇALVES, 2019).

Com a emergência dessas novas condições, o conceito de resiliência, o mesmo conceito chave que permitiu que o ser humano desbravasse novos territórios e povoasse o globo terrestre, ganhou holofotes no sentido de caracterizarem a capacidade destes sistemas à se adaptar e/ou se recuperar de forma eficaz de perturbações ou eventos disruptivos que abalasse a estrutura natural ou normal de um sistema (LIU et al., 2020). A palavra resiliência provém do latim e tem por significado certa similaridade com termos como recuperar, ricochetear ou reerguer. Em termos práticos, resiliência se resume basicamente a habilidade de uma entidade, sistema ou estrutura de retornar, após ser submetido à um evento que o perturbe, total ou parcialmente, às suas condições originais (HENRY; EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ, 2012; HOSSEINI; BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2016).

Contudo, conforme passou a ser utilizado por diversas áreas (e.g. psicologia, economia, engenharia, etc.) o termo resiliência passou a englobar definições abrangentes, no contexto do presente trabalho, tem ligação com a manutenção de segurança e proteção de infraestruturas críticas (IEC), ou seja, aquelas estruturas, sistemas, redes ou outros elementos que possuem importância de grande relevância e cuja desestabilização traz consequências profundas, gerando danos severos na esfera social, econômica, política, e até mesmo internacionais e de segurança nacional (BRASIL, 2020a; DHS, 2019; EU, 2015; HOSSEINI; BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2016).

O Movimento Internacional da Cruz Vermelha e do Crescente Vermelho—International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC) — é uma rede humanitária mundial

de promoção de condições saudáveis e seguras às comunidades e publicou o relatório intitulado “Características de Comunidade Seguras e Resilientes” acerca de estratégias e elementos essenciais à redução de riscos e desastres. Dentre tais características, o acesso seguro à água e ao saneamento estão dentre as principais condições de infraestrutura e serviços que uma comunidade deve ter para manter suas condições de resiliência asseguradas (IFRC, 2012).

Dessa maneira, a manutenção e o gerenciamento de segurança de infraestruturas críticas têm ganhado grande atenção das agendas de governos do mundo todo propulsionados por eventos terroristas e crises econômicas do início do século XXI (LIU et al., 2020). No Brasil, o conceito de infraestrutura crítica foi considerado pela primeira vez pela Estratégia Nacional de Defesa através do Decreto nº6.703 de 2008, impulsionado pelos ataques violentos no Estado de São Paulo no ano de 2006 e considerando os setores de comunicação, energia, transportes, finanças e águas como estruturas e serviços estratégicos (BRASIL, 2020b). Em 2018 é criada a Política Nacional de Segurança de Infraestruturas Críticas (PNSIC) pelo Decreto nº9.573, formando o que vem a ser atualmente o documento balizador das ações federais referente a segurança destas infraestruturas, com objetivos como a prevenção de interrupções de qualquer natureza, totais ou parciais destas infraestruturas, integração de dados acerca de ameaças e tecnologias de segurança e gestão de riscos e identificação de interdependência entre as diferentes infraestruturas. A PNSIC por sua vez, tem como exemplo planos predecessores, como o NIPP (National Infrastructure Protection Plan), EPCIP (European Programme for Critical Infrastructure Protection) e nos esforços realizados pela ONU (Organização das Nações Unidas) ao encorajamento de seus Estados componentes para a criação de estratégias nacionais de segurança de infraestruturas críticas com foco em ataques terroristas (BRASIL, 2020b).

No contexto do abastecimento de água, de acordo com SNIS (Sistema Nacional de Informações do Saneamento) em 2019, ocorreram em termos de paralisações e interrupções sistemáticas, em média cerca de 1498,66 economias são atingidas por paralisação nos municípios brasileiros cada qual, tendo em média uma duração de cerca de 12,23 horas; já no caso das interrupções sistemáticas, tal média cai para cerca de 999,30 economias atingidas por intermitência enquanto que cada qual possui, em média, cerca de 19,37 horas de interrupção. No entanto, em virtude das deficiências no sistema de coleta e centralização de informações a respeito da ocorrência de paralisações, ou mesmo eventos de outras naturezas nos sistemas de distribuição de água brasileiros, divergências consideráveis ainda são observadas entre dados computados e a realidade do abastecimento em muitos municípios de acordo com o diagnóstico



(SNIS, 2019). Apesar da natureza das interrupções não ser detalhadamente definida, a magnitude com as quais elas ocorrem denotam a sensibilidade que um sistema como o de abastecimento de água possui, sendo vulnerável tanto em sua própria infraestrutura como por dependência de outros sistemas como o de distribuição de energia e comunicação.

A análise de resiliência, confiabilidade e/ou vulnerabilidade aplicada a rede de água tem seus primeiros estudos datados da década de 1980, com os estudos de Hashimoto; Stedinger e Loucks (1982), cujos esforços se ancoraram em linhas de estudo precursoras, primordialmente das análises hidráulicas em redes de abastecimento de água no fim do século XIX (FREEMAN, 1892; SPIESS, 1887), da posterior introdução de técnicas de matemática iterativa nos estudos sobre redes de água na década de 1930 (HOWLAND, 1934) e do avanço de técnicas analíticas na década de 1960 (SHAMIR; HOWARD, 1968). Nos últimos anos o interesse da comunidade científica tem aumentado, como pode ser notado nas pesquisas publicadas sobre o tema, seja propondo e aplicando formas de avaliação e melhora da resiliência (ou conceitos relativos) nos sistemas de abastecimento de água.

Há de se destacar que tanto a resiliência como suas variantes, devem também ser considerados em outras etapas dos sistemas de abastecimento de água, estendendo-se do manancial à distribuição. Arenales (2019) traz importantes considerações acerca da visão de interdependência da resiliência existente dentro do processo de sistemas de abastecimento de água embasada em uma perspectiva do DAAE (Departamento Autônomo de Água e Esgoto) de Araraquara-SP quanto à resiliência existente como um todo dentro do gerenciamento da companhia de saneamento. Nesse sentido, a autora apurou fragilidades nos setores de “Suporte”, “Financeiro”, “Energia elétrica”, “Plano inicial e preparação”, “Compartilhamento de informações”, “Sistema de testes”, “Plano contínuo de treinamento”, “Planejamento” e “Mitigação de danos” (ARENALES, 2019).

Muitos estudos, por sua vez, possuem variantes terminológicas e de conceitos além das diferentes metodologias e resultados de mensuração da resiliência em redes de água (LIU et al., 2020; SHUANG; LIU; PORSE, 2019). Por exemplo, o estudo realizado por Chang e Shinozuka (2004) a partir de modelos, analisa eventos sísmicos sobre uma cidade americana, e indica possíveis melhorias nas estações de bombeamento como incremento para a resiliência das redes. Todini (2000) analisa a carga hidráulica excedente nos nós da rede como medida para resiliência em conjunto com processo de otimização heurístico com base em funções de custo e de diâmetro econômico de tubulações sob falhas de tubulações na rede para criação de um índice de resiliência da rede. Por sua vez, Wright; Parpas e Stoianov (2015) analisou condições

de gerenciamento das pressões na rede sob condições reais e artificiais de operação, chegando à indicativos de melhoria da resiliência por meio da manutenção das pressões dentro da rede. Candelieri; Soldi e Archetti (2015) analisou a resiliência e a vulnerabilidade de uma rede específica a partir da simulação de cenários hidráulicos críticos no intuito de formular um sistema de suporte a decisão sobre intervenções baseando-se nas tubulações.

Haja vista a crescente utilização de conceitos de resiliência, confiabilidade e semelhantes em redes de distribuição de água, em referência a diferentes situações reais e diferentes abordagens de análise, torna-se relevante a realização de esforços mais detalhados no intuito de avaliar as variáveis, os fatores e as metodologias utilizadas pelos diferentes autores nas análises. Desse modo, é desejável a construção de uma visão mais criteriosa tanto sobre a terminologia, como sobre suas diferentes metodologias e aplicações na engenharia de redes de distribuição de água.

A análise conduzida no presente estudo deu-se por meio da aplicação de metodologias específicas, com destaque para técnicas topológicas, em virtude de sua fácil reprodutibilidade, maior simplicidade e menor custo de implementação. Isso permite uma abordagem que possibilite resultados mais significativos tanto para a posterior consolidação de modelos e métodos que, mesmo que preliminarmente, a consideração e aplicação de análises de resiliência de redes de distribuição de água por gestores e corpo técnico de companhias de saneamento. Além disso, assim como salientado por Rodrigues (2007), a teoria de redes complexas engloba grande diversidade de metodologias e métodos de modelagem que suportam a caracterização de inúmeros problemas relacionados à sistemas complexos. Contudo, ainda existe uma lacuna existente em virtude de metodologias mais refinadas para caracterização e análise de problemas reais. Portanto, esforços de implementação e escrutínio destas técnicas é essencial para a implementação das melhores técnicas de resiliência nas fases de projeto e gestão da engenharia de redes de abastecimento de água.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar e comparar diferentes metodologias para análise de resiliência de sistemas de abastecimento de água apresentadas na literatura acadêmica especializada, visando identificar as mais adequadas para serem aplicadas no contexto atual brasileiro.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Analisar os diferentes conceitos e abordagens referentes a confiabilidade e resiliência de redes de abastecimento de água utilizados na literatura por meio de revisão bibliográfica sistemática;
- ✓ Analisar o significado atribuído aos diferentes termos relacionados como confiabilidade, resiliência, robustez, redundância, vulnerabilidade e conectividade, avançando para o uso mais adequado dos termos no contexto dos sistemas de abastecimento de água;
- ✓ Identificar, analisar e resumir as principais metodologias de abordagem topológica existentes na literatura para quantificação da resiliência em redes de distribuição de água.
- ✓ Aplicar metodologias de abordagem topológica de avaliação de resiliência à um setor da rede de distribuição do município de Araraquara-SP

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DA BIBLIOGRAFIA

Devido à crescente produção científica atual, tornando muitas vezes inviáveis as revisões caso-a-caso acerca de um tema, a utilização de ferramentas para obtenção, análise e organização do grande volume de informação contidos nas principais bases científicas e a criação de procedimentos de coleta e análise de dados tem se tornado uma maneira eficiente para o processamento e organização de grandes quantidades de publicações (ARIA; CUCCURULLO, 2017). Para o presente estudo, foi empregada uma revisão sistemática no intuito de identificar principalmente quantitativamente a evolução dos trabalhos científicos publicados no tema, analisando os principais termos utilizados na análise e mensuração de resiliência em redes de abastecimento de água.

Devem-se salientar os recentes estudos de revisão que contemplam o tema, como a análise evolutiva histórica realizada por Zarghami e Gunawan (2020) referente a análise de confiabilidade em redes de água, da revisão de métodos quantitativos de inferência de resiliência realizados por Shuang; Liu e Porse (2019), o estudo de estado da arte sobre robustez em redes de abastecimento feito por Jung; Lee e Kim (2019), bem como a revisão sistemática feita por Assad e Bouferguene (2022) sobre resiliência em redes de abastecimento de água. Outros autores que realizaram análises de revisão da literatura acerca do tema são Hosseini; Barker e Ramirez-Marquez (2016) que, mesmo com um escopo mais amplo abordando o histórico de trabalhos sobre resiliência em diferentes sistemas complexos dentre eles redes de água ou da relativamente recente revisão sistemática para medidas quantitativas de resiliência realizada por Shin et al. (2018). Outras publicações recentes na literatura realizando revisões principalmente na análise dos estudos de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade tanto de redes complexas no geral como trabalhos com foco em redes de abastecimento e água, como (GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016; HOSSEINI; BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2016; MURRAY, 2013; ZARGHAMI; GUNAWAN; SCHULTMANN, 2018a).

Sem desconhecer as contribuições e análises realizadas pelos supracitados autores, mas visando incluir eventuais estudos não contemplados. Considerando também a recorrente afirmação encontrada na literatura acerca do ainda inexistente consenso sobre a definição e aplicação da terminologia e variações utilizadas na análise de resiliência (robustez, confiabilidade, vulnerabilidade, etc), e de suas diferentes abordagens (e.g. análises hidráulicas

e análises topológicas). Optou-se pela realização de uma revisão sistemática da literatura e análise cienciométrica, considerando terminologia usadas principalmente na definição de métricas relacionadas ao funcionamento da rede e que possam estar sob aspectos interessantes à determinação de resiliência e confiabilidade em redes de abastecimento. A metodologia aplicada para tanto, e que contempla um “afunilamento” desde os termos gerais até a aplicação específica, é apresentada na próxima seção. Os resultados da supracitada metodologia são em seguida apresentados.

### 3.2 METODOLOGIA DE REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão empregada no presente estudo (Figura 1) procurou realizar primeiramente uma análise de comportamento dos principais termos utilizados nas bases científicas buscadas ao longo do tempo e quantitativa sobre os termos buscados. O procedimento de normalização dos dados contemplados na Figura 3, foi realizado através da razão entre a soma dos resultados da busca nas bases Web of Science e SCOPUS pela soma do total global de publicações das bases em cada ano entre o período de 1920 a 2020, como descrito pela Equação (1), abaixo.

$$Anual\ Normalizado = \frac{\sum_{2020}^{1920} R_i}{\sum_{2020}^{1920} Total_i} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

$R_i$  = soma da quantidade das buscas retornadas das bases Web of Science e SCOPUS para o ano  $i$ .

$Total_i$  = total de publicações em cada base em cada ano  $i$ .

As bases Web of Science e SCOPUS foram selecionadas em virtude do grande acervo científico de publicações e por abranger tanto os principais periódicos e as publicações de maior relevância e impacto dentro do meio científico. A seleção dessas duas bases também foi atrelada a maior facilidade de filtragem e manejo dos dados bibliométricos fornecidos por ambas bases. *A priori* com a constatação da vasta quantidade de publicações em ambos acervos, em um primeiro momento optou-se por admitir uma lacuna amostral de aproximadamente 100 anos (1920 a 2020) para aferição do comportamento de cada termo ao longo dos anos.

Posteriormente, a partir de uma *string* de busca<sup>1</sup> mais específica, afunilando os resultados e permitindo uma análise qualitativa das publicações, com a classificação dos

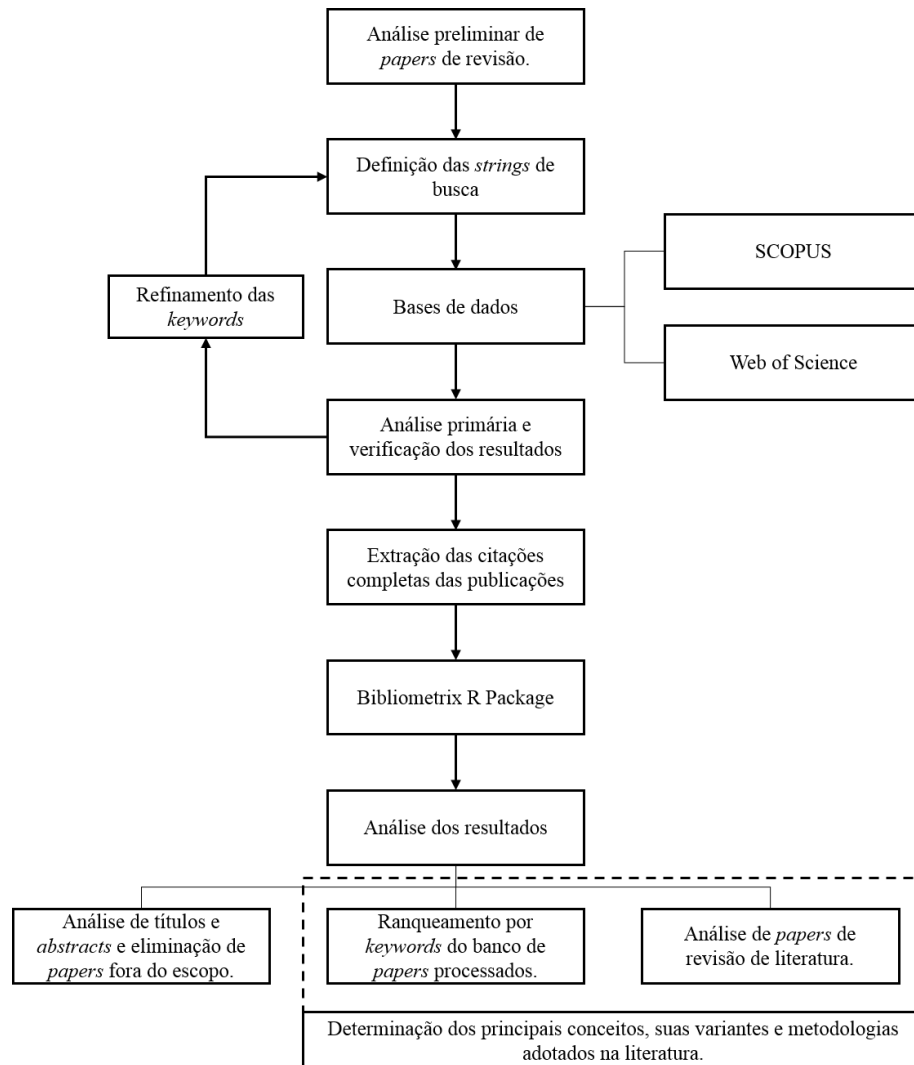
---

<sup>1</sup> *String* de busca: Conjunto de termos e palavras organizadas no objetivo de buscar, em um banco de dados, determinadas informações relacionadas acerca dos termos e palavras utilizados.

documentos por meio de planilha de cálculo após processamento por pacote Bibliometrix R Package (ARIA; CUCCURULLO, 2017). O pacote Bibliometrix trata-se de pacote para linguagem R de programação com ferramentas para extração e manipulação de quantitativamente grandes bases de dados bibliométricos, permitindo a conversão e junção de bases de dados de diferentes fontes. As ferramentas disponibilizadas pelo pacote ainda permitem a descrição das informações bibliográficas em diversas características e retorno de diferentes análises e estruturação conceitual das informações submetidas à análise.

Devido a definição ainda difusa do termo resiliência, em particular aplicada à recursos hídricos e redes de abastecimento de água (SHIN et al., 2018), as variações terminológicas de resiliência primeiramente selecionadas para análise foram baseadas nas utilizadas por Zarghami e Gunawan (2020), pela maior diversidade de termos e coerência na literatura entre os mesmos em comparação com estudos relativos à resiliência em redes de abastecimento de água.

Figura 1 – Fluxograma de procedimentos da revisão sistemática



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 2 abaixo, são dispostos os três graus de refinamento realizados na pesquisa para título de análise dos principais termos empregados na literatura no contexto de análise de resiliência de redes de abastecimento de água. As *strings* de busca aplicadas na primeira análise foram estipuladas com base na revisão realizada por Zarghami e Gunawan (2020), contudo, sem maiores refinamentos, buscando resultados quantitativos da utilização de cada um dos termos ao longo do tempo dentro da base.

No segundo grau, foi adicionada à *string* de primeiro grau os termos “ (water OR network)”, limitando as buscas para bibliografias contendo estas especificações. Na análise de terceiro grau, o afinamento foi dado em específico a redes de distribuição de água.

Figura 2 – Graus de refinamento e *strings* de busca utilizados

1º Grau	2º Grau	3º Grau
Reliability	1º Grau AND	1º Grau AND
OR	Water	“water supply”
Resilience	OR	OR
OR	Network	“water network”
Redundancy		OR
OR		“distribution
Robustness		system”
OR		OR
Vulnerability		“distribution
OR		network”
Connectivity		

Fonte: Autor (2021)

As análises implementadas para o 1º e o 2º grau de especificidade da pesquisa foram unicamente quantitativas em virtude da grande quantidade de bibliografias, da diversidade de áreas do conhecimento abrangidas e das restrições computacionais para o tratamento qualitativo dos *datasets* analisados. A análise qualitativa dos mesmos se restringiu a análise das áreas do conhecimento abrangidas por cada termo.

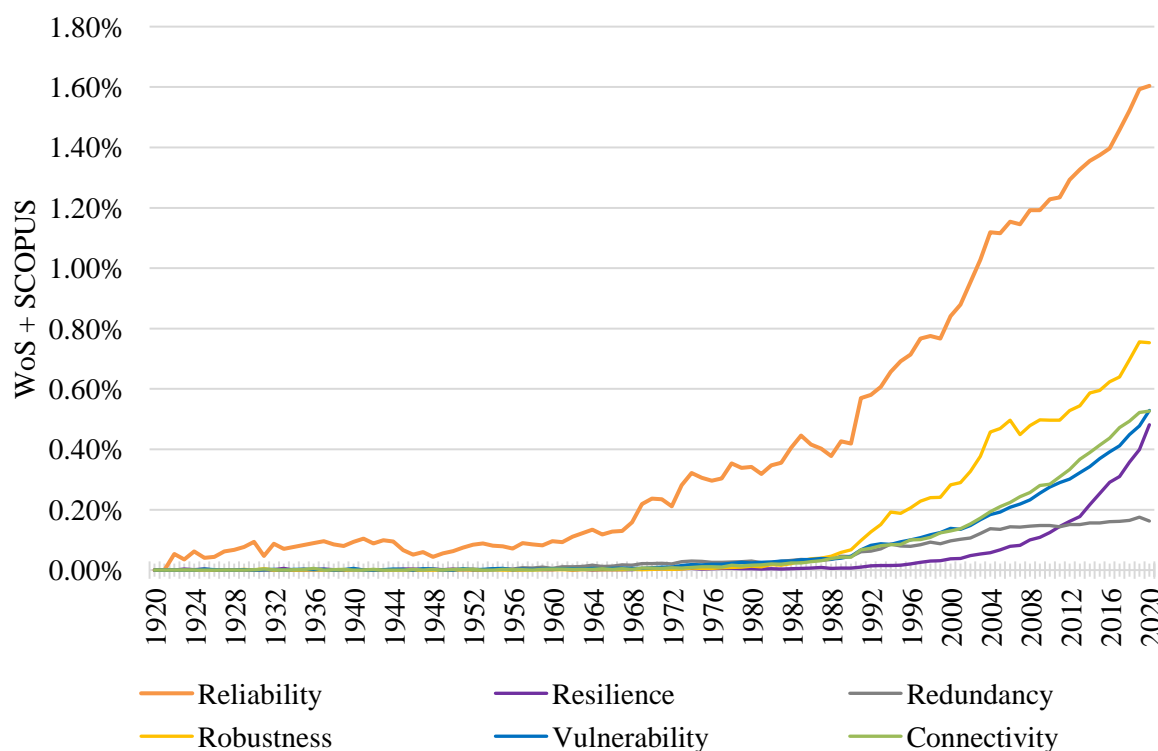


### 3.3 RESULTADO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

#### 3.3.1 1º Grau: *keywords* primárias.

As análises em primeiro grau de cada uma das palavras-chave foram abrangendo toda a base de publicações, buscou-se averiguar primeiramente o comportamento das mesmas ao longo do tempo. Na Figura 3, abaixo, os dados expostos compreendem o número de publicações nas duas bases pesquisadas entre os períodos de 1920 a 2020, não considerando publicações anteriores visto sua pequena quantidade. É importante salientar a possibilidade eventual de ocorrência de publicação com mais de um dos termos analisados, o que no caso da análise considerou-os igualmente para cada termo.

Figura 3 – Percentual normalizado dos principais termos de busca relacionados ao tema.



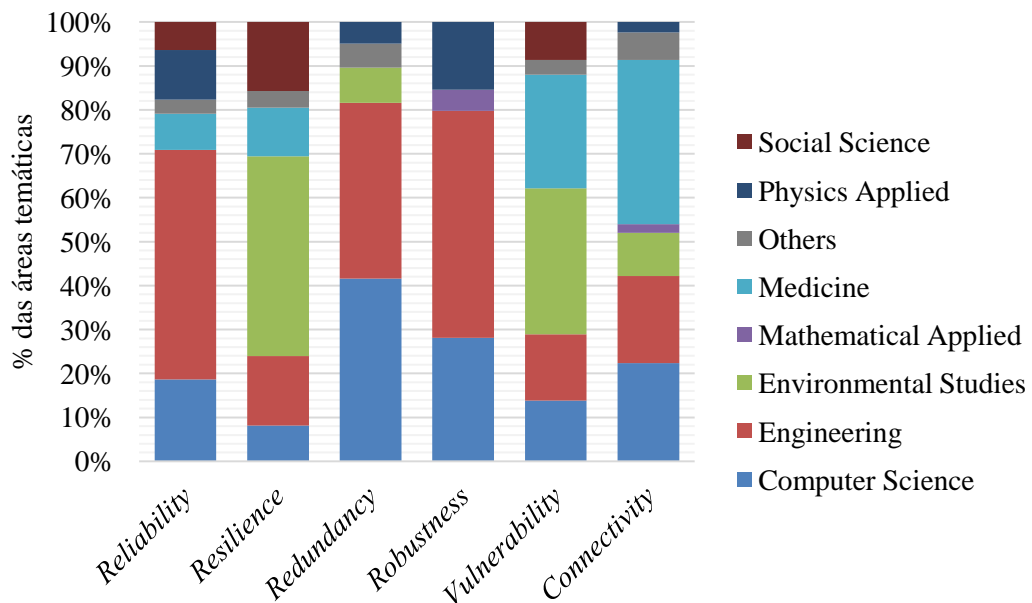
Fonte: Autor (2021).

Observando o Figura 3 , é possível observar a considerável maior ocorrência de publicações com a presença do termo “reliability”. Analisando de forma um pouco mais aprofundada a disparidade entre os documentos do termo em questão e os relacionados à outras áreas, por meio das ferramentas de análises de publicações implementadas nas próprias bases de buscas, a área de engenharia em ambas as bases é a mais fortemente correlacionadas. Esse percentual é perceptível a partir das Figuras 4 e 5, onde a predominância de estudos com

temática de engenharia chegam cerca de 50 % dos resultados obtidos dentro de um universo com cerca de aproximadamente novecentas mil publicações. Os dados expostos na Figura 3 estão normalizados com o tamanho total da base no intuito de evitar interpretações equivocadas do comportamento do uso dos termos.

Para delinear, mesmo que grosseiramente, as principais áreas do conhecimento que fazem uso de tais termos, optou-se pela realização de análises separadas entre as bases de busca principalmente em virtude do grau de refinamento de áreas de estudo considerada por cada uma. Com isso, na Figura 4 abaixo, é possível observar, para a base WoS, as áreas temáticas similares unificadas<sup>2</sup> para melhor compreensão das principais áreas.

Figura 4 – Principais áreas temáticas em relação a cada termo na base Web of Science (WoS).

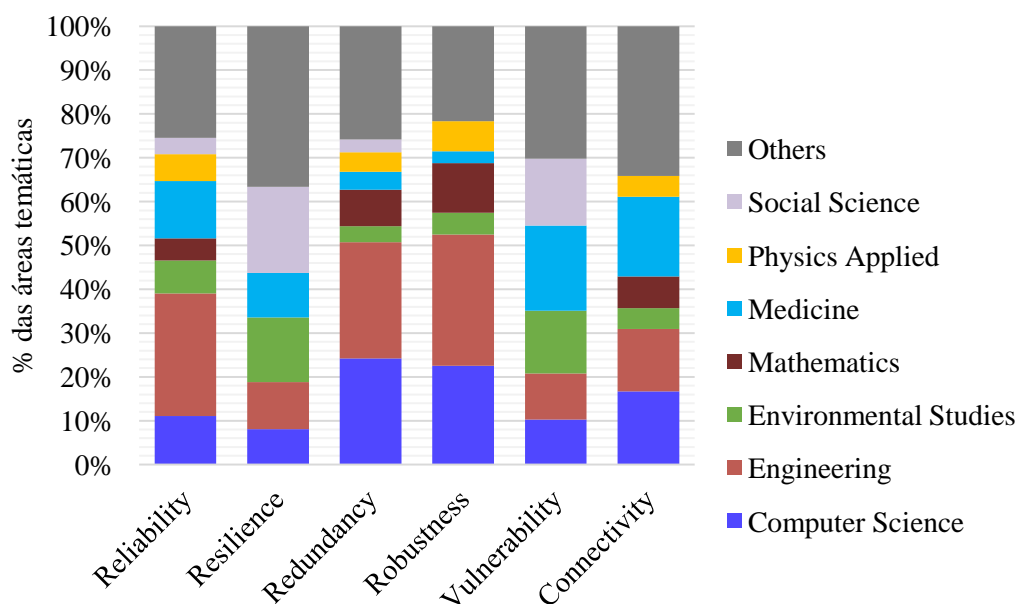


Fonte: Autor (2021)

No Figura 5, por sua vez, são apresentadas áreas temáticas relativas à base SCOPUS. Lembrando também que as informações a respeito destas proporções são com base entre os anos de 1920 e 2020.

<sup>2</sup> A unificação de áreas foi realizada para manter a clareza dos dados gráficos, sendo que, por exemplo, só para áreas relacionadas a ciências da computação existem cerca de onze linhas de pesquisa discretizadas pela WoS.

Figura 5 – Principais áreas temáticas em relação a cada termo na base SCOPUS.



Fonte: Autor (2021)

Ao analisar as distribuições representadas nas Figura 4 e Figura 5, acima, fica evidente que a área de engenharia desempenha um papel significativo em todos os termos de busca, sendo especialmente relevante nos termos de redundância, confiabilidade e robustez, respectivamente. A área de ciências computacionais é a segunda com maior presença, sendo significativa principalmente relativa aos termos de redundância e robustez. Apesar de não delineadas no Figura 4, as áreas de engenharia e ciências da computação, quando observadas com as análises de áreas temáticas da base WoS discretizadas, indica que o termo redundância possui maior ligação com estudos acerca de IA (Inteligência Artificial) enquanto que o termo robustez correlaciona-se mais com estudos em sistemas de informação. Para as áreas de engenharia, no entanto, é evidenciado a grande proporção de estudo em engenharia elétrica e eletrônica tanto para os termos de confiabilidade, redundância e robustez.

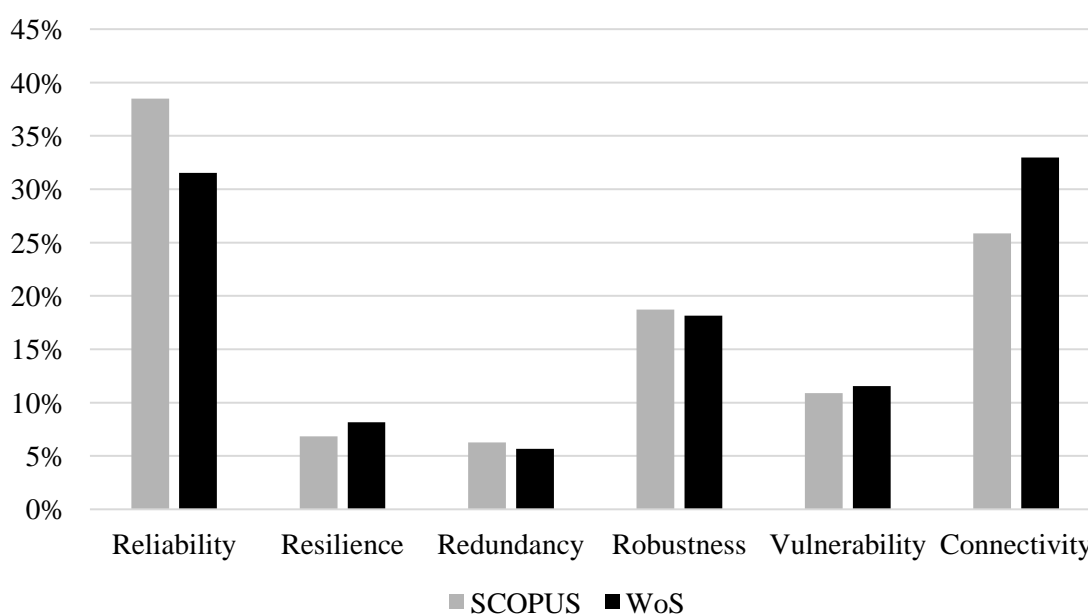
No caso do presente tema, os documentos de interesse estão alocados principalmente nas áreas de engenharia e ciências ambientais. No contexto das ciências ambientais, é possível observar maior relação com os termos de resiliência e vulnerabilidade em ambas bases. Por outro lado, a área de engenharia possui maior diversidade de estudo, sendo muito mais predominante na maioria dos termos, com destaque para confiabilidade, redundância e robustez. Portanto, é imprescindível salientar o caráter pouco profundo envolvido na presente análise quanto a aspectos qualitativos em relação a natureza mais específica dos estudos

presentes nas bases e que a correlação direta entre uma área de estudo com determinado termo não implica exatamente na existência de trabalhos adequados ao escopo do presente estudo e o termo em específico. Além disso, é importante considerar a possibilidade da existência de mais termos chave adequados, bem como elucubrar na medida do possível, dada a amplitude de áreas temáticas no que tangem metodologias de aferição de resiliência e suas variantes, o rico arcabouço teórico que ainda existe e potencialmente pode ser extrapolado ao setor de abastecimento de águas no aprimoramento e criação de novas e refinadas métricas e técnicas.

### 3.3.2 2º Grau: contexto de água e redes.

Com o afunilamento das buscas para os termos analisados no tópico anterior que sejam relacionados ou a redes (*network*) ou a água (*water*), os seguintes percentuais de buscas foram observados na Figura 6, abaixo.

Figura 6 – Associação de cada termo em função da *string* de busca de 2º grau.



Fonte: Autor (2021)

Como é possível observar na figura acima, os termos *reliability*, seguido por *connectivity*, *robustness*, *vulnerability*, *resilience* e *redundancy* são os mais relacionados aos termos *network* ou *water*. Quanto as áreas temáticas correlacionadas a busca em questão, de acordo com as bases SCOPUS e WoS, mesmo com a discretização dos documentos em áreas temáticas com diferentes graus de especificação aos temas e apesar dos resultados da base

SCOPUS serem cerca de 43% maiores em relação a WoS, os percentuais das áreas temáticas mais expressivos indicam uma maior ocorrência do termo *network* aos termos principais. Tendo em vista também que aproximadamente 80 % do total de referências buscadas tiveram relação a áreas relacionadas a engenharia elétrica e eletrônica (23,8%), telecomunicações (14,3%), tópicos de ciências da computação (23,5%), neurociências (7,9%), inteligência artificial (6,4%) e controle de sistemas de automação (3,8%). Áreas relacionadas a ciências ambientais e a recursos hídricos contemplando 6,4 e 4,3% do total da base, enquanto outras diversas áreas em menores proporções representam cerca de 9,5% do restante das publicações. No entanto, é interessante ressaltar que juntas, as áreas temáticas de ciências ambientais e recursos hídricos agregam um total de cerca de vinte e nove mil documentos e publicações.

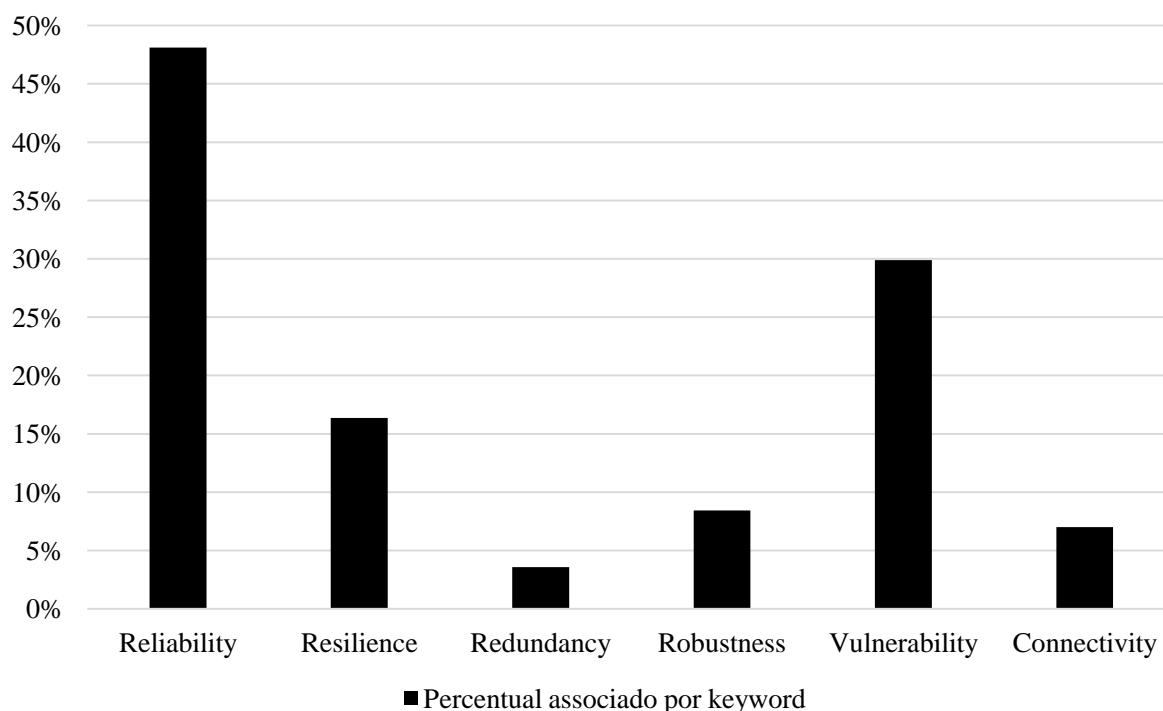
### 3.3.3 3º Grau: problema especificado.

Apesar de ser a *string* de busca com maior especificação, a base de dados foi consideravelmente grande, composta por cerca de 12.900 documentos. No entanto, a classificação posterior foi realizada a partir de filtragem de termos dos campos de título, resumo e palavras-chave de cada referência com auxílio de planilha de cálculo, permitindo ordenamento das publicações de maior relevância em função de diferentes palavras-chave<sup>3</sup>. Na Figura 7 abaixo, é possível observar, dentro do universo de publicações obtidos, as palavras com maior ligação à *string* de busca.

---

<sup>3</sup> Para classificação dos documentos, as seguintes palavras-chave foram adicionadas: *reliability, resilience, redundancy, robustness, vulnerability, connectivity, water supply, water distribution, water distribution network, index, optimal, review, entropy, evaluation e assessment*.

Figura 7 – Associação de cada termo em função da *string* de busca de 3º grau.



Fonte: Autor (2021)

Logo, por mais que o refinamento de 3º grau seja mais detalhado em relação ao escopo do presente estudo, a existência de estudos em outras áreas do conhecimento e da engenharia (e.g., grande quantidade de estudos na área de engenharia elétrica), era esperado em função da abrangência que o tema central resiliência tem e a grande correlação de áreas afins que acabam resultar em conjuntos de bibliografias tematicamente mais amplas. Por meio desta foi possível realizar a associação entre os termos e refiná-los à somente estudos ligados à área de redes de abastecimento e recursos hídricos (Tabela 1). Estudos relacionados à área de recursos hídricos em geral foram considerados em tal padrão de refinamento, no intuito de evitar vieses terminológicos tendo em vista a dualidade existente no termo “*water supply*” que possui forte associação tanto com trabalhos relacionados a redes de água como trabalhos relacionados à recursos hídricos fora do interesse do escopo do presente trabalho.

Tabela 1 – Correlação entre termos associados a redes de abastecimento e recursos hídricos

	Resiliência	Confiabilidade	Robustez	Redundância	Vulnerabilidade	Conectividade
Resiliência	674	-	-	-	-	-
Confiabilidade	94	2.743	-	-	-	-
Robustez	15	57	412	-	-	-
Redundância	09	43	03	138	-	-
Vulnerabilidade	133	144	22	01	1.531*	-
Conectividade	15	33	02	02	11	375

\* Grande proporção de trabalhos ligados à “water supply”, termo com grande quantidade de trabalhos ligados áreas não diretas a redes de água per se; Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 1, apesar a existência de possíveis trabalhos fora do escopo de interesse, já é possível traçar associações de força de correlação entre os termos utilizados. Destaca-se dentre os dados a grande associação entre o termo vulnerabilidade e os termos resiliência e confiabilidade. No entanto, considerando a também vultosa associação entre os termos resiliência e confiabilidade, e analisando as referências de maior peso geral obtidos a partir do refinamento, é possível deduzir que grande parte dos estudos de interesse se encontram relacionados a esses termos. Apesar de não ser possível, num primeiro momento, a análise dos grandes clusters (i.e., principalmente palavras associadas isoladamente) caso a caso para verificação mais exata tanto quantitativa como qualitativa, a análise das associações com menor número de publicações permite uma verificação qualitativa e, portanto, de um maior grau de refinamento com relação ao tema objetivo do presente estudo.

Zarghami e Gunawan (2020) também realizaram esforço semelhante de revisão sistemática bibliográfica de metodologias relacionadas à confiabilidade em redes de abastecimento de água e obtiveram a existência de dois grandes tipos de abordagens, sendo elas: hidráulica e topológica. No estudo em questão, destaca-se o fato de que o termo confiabilidade engloba os conceitos de resiliência, redundância, robustez e vulnerabilidade.

Assad e Bouferguene (2022), em sua revisão bibliográfica acerca da resiliência aplicada a redes de distribuição de água, dividiram o estado da arte da temática em três grandes clusters de diferentes abordagens. Sendo o cluster 1, formado por estudos relacionados a metodologias hidráulicas e medidas substitutivas; o cluster 2 por análises comparativas entre diferentes métricas substitutivas; e o cluster 3 sendo composto pelas metodologias topológicas de aferição de resiliência em redes de distribuição de água.

É interessante salientar que em ambos estudos citados acima, a recorrência de alguns autores que também permearam os resultados de buscas do presente estudo. A exemplo pode-se citar o trabalho de Todini (2000) como pioneiro.

### 3.4 ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL

O abastecimento de água, bem como as infraestruturas de esgotamento sanitário, drenagem, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos e águas pluviais, é parte integrante necessária na composição do saneamento básico. Esse, por sua vez, é essencial para a promoção da saúde e qualidade de vida da população, prevenção de doenças e preservação ambiental (ARAÚJO et al., 2022; BRASIL, 2020b). O saneamento é de tamanha importância para a sociedade que a Organização das Nações Unidas (ONU) em conferência para a construção da Agenda 2030 no ano de 2012, adereçou aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) a garantia de disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos (ODS nº 6) (ONU, 2012).

Araújo et al. (2022) aponta uma visível urgência no país na ampliação da segurança hídrica. O autor ainda verifica uma intensa atuação de agências reguladoras de saneamento infranacionais na ampliação da resiliência hídrica ao passo que um relativo pequeno número de entidades atuantes de maneira efetiva no objetivo da melhoria da resiliência hídrica. Tais agências infranacionais, no contexto de controle de redução de perdas de água, implementam mecanismos como incentivos tarifários, nível econômico de perdas e acompanhamento de indicadores.

De acordo com o Sisagua, instrumento utilizado principalmente pelo Sistema Único de Saúde (SUS) para prevenção e planejamento de ações acerca de doenças de transmissão hídrica, possui cadastro de três principais formas de abastecimento de água encontrados no país, sendo eles: os sistemas de abastecimento de água (SAA); soluções alternativas coletiva de abastecimento de água (SAC); solução alternativa individual de abastecimento de água (SAI) (VIGIAGUA, 2016). Destes sistemas cadastrados no Sisagua, cerca de 1,3 % da população nacional abastecida por SAA's, não possuem tratamento da água; para os SAC's aproximadamente 2,1% da população nacional não possui tratamento; enquanto que para os SAI's cadastrados, um total 0,9% da população nacional não possui tratamento (ARAÚJO et al., 2022).



A ADASA (Agência reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal) trata-se de uma destas agências infranacionais cuja estratégia para o controle de perdas de água é composta pela utilização de indicadores. No caso da ADASA, o sistema de abastecimento de água é aferido através de dezessete indicadores divididos em quatro dimensões: Prestação de serviços (6 indicadores); Sustentabilidade Infraestrutural (4 indicadores); Sustentabilidade Ambiental (4 indicadores) e Governança (3 indicadores) (ADASA, 2018).

Dentre os indicadores supracitados, cabe salientar os pormenores do indicador de sustentabilidade infraestrutural e sustentabilidade ambiental. Tais indicadores, para sustentabilidade infraestrutural, são: capacidade de reserva do sistema de água (dias); capacidade de tratamento do sistema de água (%); índice de substituição da rede de água (%); quantidade de vazamentos na rede de água (n./km/ano). Enquanto que para sustentabilidade ambiental, tem-se: utilização eficiente de energia (kWh/m<sup>3</sup>/100mca); índice de perdas na distribuição (%); índice de volume de água captado com outorga (%); índice de adequação ao destino final do lodo da ETA (%). Contudo, é importante destacar a necessidade de parcimônia ao analisar indicadores, principalmente isoladamente, pois, apesar de proverem informações importantes acerca do desempenho da rede, são inevitavelmente uma visão parcial da realidade não incorporando a complexidade do sistema em seu total (ADASA, 2018).

De acordo com diagnóstico realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) a respeito das condições dos sistemas de abastecimento de água no país, no ano de 2021, foram aferidos índices de macromedição por regiões de: 45,5% na região norte; 67,1 % na região nordestes; 83,8 % na região sul; 84,6 % na região centro-oeste e 88,2% na região sudeste (SNIS, 2022). Em relação aos dados de macromedição já é possível verificar a heterogeneidade das condições da distribuição de água do país e quiçá traçar paralelo com as condições socioeconômicas dessas regiões brasileiras e de regiões cujo abastecimento precário, infelizmente, é um dos fatores impeditivos para seu desenvolvimento sustentável. Com relação ao índice de perdas na distribuição, o mesmo diagnóstico aponta índices de perda na distribuição de cerca de 40,3%, tendo tido um fracionado aumento de 0,2% em relação a 2020. Nesse quesito novamente observamos valores maiores nas regiões menos desenvolvidas do país, sendo: 51,2% na região norte; 46,2% na região nordeste; 38,0% na região sudeste; 36,9% na região sul e 36,2% na região centro-oeste. O estado de São Paulo apresentou perdas da ordem de 34,5% (SNIS, 2022).

Por fim, é interessante salientar o projeto de nível nacional COM+ÁGUA iniciado em 2005 pelo governo federal e atualmente compondo o Programa de Modernização do Setor do Saneamento (PMSS) no propósito de consolidar e difundir metodologias nacionais e internacionais no gerenciamento de perdas de água em redes de distribuição de água e eficiência energética em redes de água. O projeto conta com um rico arcabouço de informações a respeito da gestão, manutenção e operação da rede e de técnicas para redução de perdas de água e aumento da eficiência do consumo de energia elétrica em redes de abastecimento de água (PMSS, 2022; SNIS, 2022). O projeto COM+ÁGUA certamente é um bom exemplo de iniciativas que abordam o problema das perdas de água como fenômenos que necessitam de abordagens para além de soluções pontuais e sim integrais.

### 3.5 RESILIÊNCIA E SUAS VARIANTES

Bettencourt; Kaiser e Kaur (2009) destaca que o processo de consolidação de uma determinada área do conhecimento é caracterizado por um conjunto de esforços isolados acerca de um tópico e de sua posterior unificação e consenso acerca das definições e metodologias. A métrica de resiliência e confiabilidade, bem como seus termos “adjacentes” (Vide Item 3.5) no emprego na análise de redes de água, aparentam seguir padrão semelhante, ainda possuindo em alguns casos definições difusas, características e com grande concentração de novas abordagens e aplicações de novas metodologias para diferentes cenários e falhas, sendo, portanto, fenômeno esperado que autores se debrucem sobre seus estudos tomando perspectivas diferentes.

#### 3.5.1 Resiliência

De acordo com Holling (1996), a resiliência pode ser definida a partir de duas abordagens distintas, de um lado, com foco na eficiência, constância e previsibilidade, sendo todos atributos mais correlatos a áreas de engenharia e de outro lado com foco em persistência, mudança e imprevisibilidade, sendo mais correlatos as áreas biológicas. Para engenharia, há a existência de princípios fundamentados na manutenção de um estado de equilíbrio, onde a resistência a distúrbios, velocidade de retorno ao estado normal e de equilíbrio, são bases para o estabelecimento de medidas essenciais ao comportamento de um sistema.

Com base na revisão de métodos realizada por Shuang; Liu e Porse (2019), bem como considerando as definições tomadas pelas políticas e manuais de governança para resiliência de infraestruturas críticas, as seguintes capacidades postuladas pelo referido autor, expostas na Tabela 2, resumem os principais aspectos da resiliência.

Tabela 2 – Aspectos fundamentais à capacidade de resiliência.

<b>Capacidade</b>	<b>Definição</b>	<b>Especificação</b>
<b>Absortiva</b>	Limite de operação do sistema, atrelado a dois limites principais:	Operação normal do sistema Limite de autorecuperação da mesma, onde as condições e eventos tornam-se mais severos.
<b>Restaurativa</b>	Resume-se na habilidade do sistema em se recuperar de um evento.	Grau de recuperação. Tempo de recuperação.
<b>Adaptativa</b>	Habilidade da rede de, a longo prazo, se adaptar as mudanças nas suas condições de operação.	

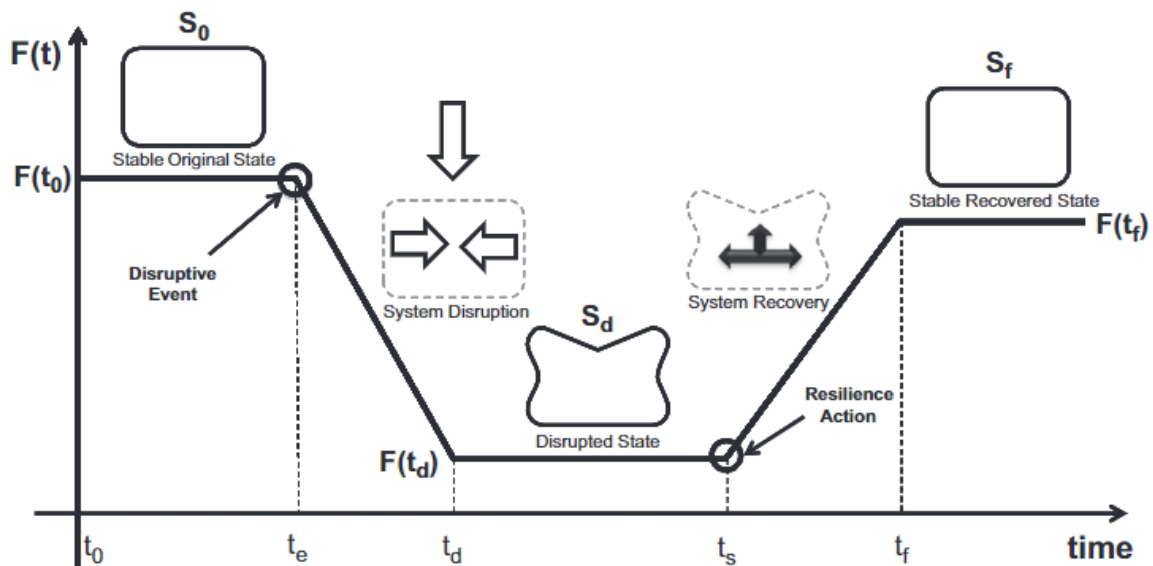
Adaptado de: (SHUANG; LIU; PORSE, 2019)

É interessante levar em consideração também que para cada capacidade de resiliência que um sistema possui, ainda segundo Shuang; Liu e Porse (2019), algumas estratégias podem ser primordialmente consideradas para seu aprimoramento. Como no caso das condições absorptivas, estratégias de reforço dos componentes principais, do monitoramento em tempo real da rede e aumento das condições de redundância da rede. Já para a capacidade restaurativa, a implementação de resposta de emergência, rápida e efetiva identificação e isolamento de falhas e alocação eficiente de recursos tenderiam a incrementá-la. Enquanto que para a capacidade adaptativa, a otimização dos componentes frente a condições de falhas, tornando-os mais resistentes às condições de interdependência sob quais a rede está submetida. A promoção de ações de avaliação periódicas da idade da rede são estratégias e ações levantadas pelo autor como princípios importantes para a manutenção destas capacidades cruciais a resiliência da rede (SHUANG; LIU; PORSE, 2019).

A conceituação da resiliência e de suas capacidades também pode ser traduzida graficamente através da curva PRF (*Performance Response Function*) ou curva de resposta a performance (ZHAO; CHEN; GONG, 2015). No entanto, essa conceituação gráfica apresenta diferentes formas sutis de observação, dependendo do aspecto analisado. De acordo com Hosseini; Barker e Ramirez-Marquez (2016), as medidas gerais relacionadas a resiliência

podem ser determinísticas, onde as métricas não incorporam incertezas, como a probabilidade de ocorrência de um evento; ou estocásticas considerando as incertezas e imprevisibilidades associadas ao sistema. Ambas perspectivas podem ser, com relação a dependência temporal da medida, dinâmicas ou estáticas. No caso do estudo de resiliência em redes de abastecimento de água, as métricas estáticas apresentam-se mais predominantes, e o delineamento mais aceito na literatura apresenta-se exposta na Figura 8. Primeiramente concebida por Henry; Emmanuel Ramirez-Marquez (2012) com base em revisões de diferentes abordagens de resiliência e procurando manter as prerrogativas conceituais da resiliência.

Figura 8 – Curva de Resposta a Performance (PRF)

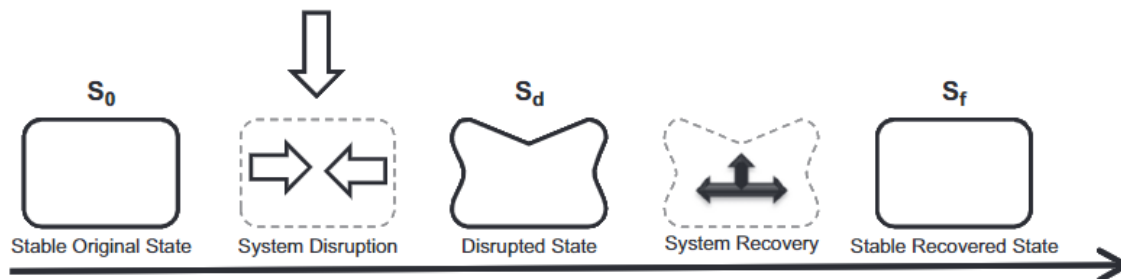


Fonte: (HENRY; EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ, 2012)

Pode-se caracterizar a Figura 8, partindo-se, primeiramente, da perspectiva do sistema (S), ou seja, o sistema em análise. Desse, podem-se extrair basicamente quatro estados sob o qual sistema S pode experienciar sob a ótica da resiliência. Primeiro, seu estado original (S0); seguido por sua condição de interrupção (Sd); posteriormente o estado recuperado (Sf). Além desses, dois estados transitórios de estado original (S0) à estado de interrupção (Sd) e estado de recuperação do sistema de Sd à Sf. O autor ainda destaca dois pontos chave para o comportamento como um todo, sendo eles o evento disruptivo (i.e evento que leva às condições de degradação do sistema) e a ação de resiliência (i.e ponto em que se inicia o evento de recuperação das condições do sistema) (HENRY; EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ, 2012). Na Figura 9, por sua vez, estão discretizadas mais claramente as diferentes fases do

processo correspondente à interrupção de um sistema por um evento e suas condições posteriores, processo esse que resume a característica não isolada temporal e espacialmente da resiliência.

Figura 9 – Fases de transição do comportamento resiliente



Fonte: (HENRY; EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ, 2012)

Na Figura 9 acima, além de serem expostas as condições de cada lapso temporal, como confiabilidade ( $t_e-t_0$ ) que também pode conter a capacidade absorviva. Um evento que dirime o sistema a uma performance menor ( $\varphi(t_d)$ ) ou estado de interrupção que precede a recuperabilidade do sistema, caracterizando a capacidade restaurativa da rede. A capacidade adaptativa no caso, como já descrito, se resume nas condições ao longo do tempo e na performance da rede em relação a superação desses eventos (HOSSEINI; BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2016; WAEL; NOORI; ZHAO, 2021; ZHUANG; LANSEY; KANG, 2013).

### 3.5.2 Confiabilidade

Algumas métricas consideraram o termo confiabilidade ao invés de resiliência em si, considerando usualmente essa última como uma das características abrangidas pelo termo confiabilidade. No entanto, não existe uma distinção clara e delimitada entre as diferenças de abordagens relativas à resiliência e confiabilidade. Estudos realizados por Gheisi e Naser (2014, 2015, 2013) e Gheisi; Forsyth e Naser (2016) acerca da confiabilidade a definem como sendo, de maneira geral, a capacidade da rede em funcionar tanto sob condições normais como anormais de operação da rede ao longo de um determinado período de tempo.

De acordo com Zarghami e Gunawan (2020), o conceito de confiabilidade em redes de abastecimento de água baseia-se primordialmente no princípio da continuidade do abastecimento. No entanto, dada a complexidade existente em sistemas de abastecimento de água como um todo e não somente a rede de distribuição de água, considerando desde sistemas de captação, tratamento, manutenção e gerenciamento, e dentre outros aspectos dela compostos,

a adoção somente desse princípio para tratar de confiabilidade de tal sistema torna-se demasiado simplificado, sendo necessária a atenção à outros aspectos, tanto qualitativos e quantitativos no suprimento da demanda diante da consideração das mais diversas circunstâncias, para assim tomar a mensuração da confiabilidade como uma medida de performance adequada e segura à aplicabilidade tanto no procedimento de projeto de redes como no gerenciamento das mesmas (GHEISI; NASER, 2014).

Um ponto interessante a ser salientado também é que as análises e abordagens de confiabilidade e aferição para redes de abastecimento de água estão fortemente atreladas as falhas as quais essa mesma está suscetível, podendo ser classificada entre três grupos principais: confiabilidade hidráulica, de qualidade da água e mecânica. A confiabilidade hidráulica estando atrelada com relação ao abastecimento das demandas; enquanto que a confiabilidade de qualidade da água relacionada ao fornecimento da água com uma determinada qualidade mínima e a confiabilidade mecânica a integridade estrutural da rede e de seus componentes (GHEISI; NASER, 2013).

### **3.5.3 Redundância e robustez**

Redundância, como medida em redes de abastecimento, pode estar atrelada, de acordo com Di Nardo et al. (2017), às características tanto topológicas como hidráulicas ou de entropia. Sendo as medidas ligadas a condições topológicas definidas principalmente pelo número de caminhos capazes de atingir um determinado nó, podendo ser compreendida também como uma condição de análise da “capilaridade” da rede entre seus nós e regiões. Enquanto que as condições atreladas a redundância hidráulica ou de energia da rede são atreladas à quantidade de energia (carga hidráulica) excedente, o que permite a rede maior resposta quanto à cenários de falhas em que há perda de energia e conseqüentemente perda de capacidade de abastecimento.

Behzadi et al. (2018) em suas pesquisas relacionadas à cadeia de suprimentos no agronegócio, possui uma definição bem clara entre robustez e resiliência. Sendo a robustez definida como a habilidade de um sistema suportar a falhas e perturbações, evitando também conseqüências mais sérias à infraestrutura através de redundância e caminhos alternativos ou, mais especificamente, pontos que não são usualmente utilizados à sua total capacidade. A definição considerada por Jung et al. (2014) também é muito semelhante, exceto pelo fato de

que nesse, é explicitada a robustez sendo definida como a habilidade do sistema manter suas funções sob a ocorrência de um conjunto determinado de possíveis falhas e perturbações. Apesar de muito semelhantes, é interessante considerar que Jung et al. (2014), considera, diferentemente do primeiro autor citado, a redundância do sistema como uma característica separada e não como componente da robustez.

### **3.5.4 Vulnerabilidade**

As condições de vulnerabilidade da rede são em suma, as condições opostas às definidas pelas métricas de confiabilidade e determinando a fragilidade da rede a partir das falhas e eventos em potencial que possam acometer o sistema. Enquanto que a confiabilidade avalia as condições dos elementos do sistema colapsarem ao serem acometidos por tais eventos (MURRAY, 2013). Usualmente, as condições de análise de vulnerabilidade levam em conta um cenário bem específico de eventos e metodologias mais atreladas a aferições estocásticas, sendo uma grande parcela de trabalhos considerando, por exemplo, eventos sísmicos (LAUCELLI; GIUSTOLISI, 2015).

Maiolo et al. (2018) desenvolve uma metodologia para a aferição da vulnerabilidade em redes de abastecimento através de uma abordagem topológica da rede. Entende-se a vulnerabilidade como uma métrica das consequências das falhas, em específico, do desabastecimento durante eventos de falhas em tubulações e, portanto, considerando tal como meio de avaliação da capacidade da rede de satisfação da demanda. Apesar das especificidades na formulação da metodologia do autor, algumas ressalvas de interesse são realizadas, como, por exemplo, a de que não necessariamente as tubulações de maior vazão diária são as mais vulneráveis. O autor faz tal alegação com base na existência de fatores de redundância e também no eventual equívoco que venham a ser abordagens que tragam análises que levem em consideração as tubulações como elementos isolados.

Ainda de acordo com Maiolo et al. (2018), em suma, para melhor caracterização da vulnerabilidade de um determinado trecho, considerando o uso de grafos direcionados e com peso, sendo a vazão que passa por tais trechos como os pesos atribuídos aos mesmos. A quantidade de nós que cada trecho capaz de atingir determinada tubulação em avaliação pelo método (i.e., chamados, pelo autor, de nós precursores) também é elemento importante à ser considerado visto que, dada uma condição de fluxo pré-determinada no sistema, uma eventual

falha em um determinado trecho, irá fazer com que o fluxo que passava pelo mesmo seja redirecionado por outro caminho, logo, havendo poucos nós precursores que possam atingir tal trecho em falha, o mesmo será de maior vulnerabilidade pois é consideravelmente mais difícil de se ser acessado pelo fluxo.

A metodologia desenvolvida por Maiolo et al. (2018), e descrita rapidamente acima, destoa de outras métricas pois faz uma abordagem do ponto de vista da vulnerabilidade dos trechos numa condição de observação dos caminhos de fluxo e também redundância e conectividade que ocorrem na rede. Por outro lado, também considera o fator de acessibilidade aos tubos pelo fluxo como fator preponderante para vulnerabilidade dos trechos no conjunto da rede e não isoladamente como o autor mesmo destaca.

### **3.5.5 Conectividade**

A métrica de conectividade é comumente associada na composição de métricas de resiliência para redes de abastecimento de água. Em aléneas gerais, pode ser definida como uma métrica de indicação das condições gráficas, principalmente pelas condições de centralidade média de um determinado nó, que é definida como o número total de traçados de rede que passam por um determinado vértice (SOLDI; CANDELIERI; ARCHETTI, 2015). Diferentes condições dessa métrica dão indicativos da estrutura da rede ao longo de sua área de abrangência e até mesmo de sua capacidade restaurativa.

Na área de redes de abastecimento de água, um dos primeiros trabalhos utilizando-se da conectividade como pivô para aferição da confiabilidade do sistema foi o desenvolvido por Yang et al. (1996), a metodologia desenvolvida foi alicerçada no conceito de conectividade entre demanda e fonte e observou a influência de falhas em trechos sobre essa métrica. Dessa forma, por sua vez, de acordo com o autor, a confiabilidade mecânica da rede poderia ser estimada.

Assim como a redundância, a conectividade, que por sua vez se complementam e por vezes até se confundem, também é considerada em muitos estudos como uma medida de aspectos topológicos de robustez e resiliência da rede (YAZDANI; JEFFREY, 2012a). Nas caracterizações topológicas realizadas por Yazdani e Jeffrey (2012), condições ótimas de conectividade da rede reduzem a probabilidade de falhas hidráulicas ou de componentes.



Ostfeld (2005) destaca a dualidade entre os termos conectividade e acessibilidade, sendo que o primeiro termo pode ser cunhado como a probabilidade de um determinado nó estar ligado à um reservatório; enquanto que o segundo refere-se à probabilidade de todos nós de demanda estarem conectados à reservatório(s).

Evidentemente, os conjuntos de métricas topológicas possuem uma maior proximidade com o conceito de conectividade. Devendo-se isso ao fato da existência de métricas como a conectividade algébrica, coeficientes de cluster e de malha, são exemplos de métricas topológicas que afetam diretamente as condições de conectividade da rede e conseqüentemente sua resiliência.

### 3.6 NATUREZA DAS FALHAS

Um elemento comum à grande maioria de definições de resiliência (e termos correlatos) é se referir à recuperação após uma falha ou evento extremo. Portanto cabe também o exercício de identificar quais, possivelmente, são tais falhas ou eventos no contexto amplo de sistemas de abastecimento e de redes de abastecimento de água.

Em termos de análise de potenciais ameaças que possam acometer infraestruturas críticas num âmbito geral, o Guia de Segurança de Infraestruturas Críticas e Resiliência estadunidense (DHS, 2019), por exemplo, elenca alguns eventos que podem afeta ICs. São elas relacionadas principalmente à eventos naturais (i.e., eventos climatológicos extremos como temperaturas anômalas, secas, queimadas, enchentes, entre outros; assim como eventos meteorológicos e geofísicos, e pandêmicos); ocorrência de acidentes, de natureza operacional, de gerenciamento e/ou manutenção como falhas estruturais, vazamentos de contaminantes, condições de idade avançada da infraestrutura, mal funcionamento de equipamentos e/ou, por exemplo, grandes eventos de 'apagão' em sistemas de energia. Outros eventos podem ser relacionados, por sua vez, a ataques intencionais à ICs, como por exemplo ataques terroristas, cyber ataques, roubo de informações e ataques a cadeias de suprimento (DHS, 2019). Tendo em vista a grande gama de potenciais eventos que possam ameaçar a integridade de uma infraestrutura crítica, além das complexas condições de interdependência existente, o entendimento básico das principais ameaças e riscos é fundamento primordial para o entendimento do seu funcionamento, da sua manutenção e, por conseguinte da avaliação de diferentes técnicas de aferição e métricas das condições de confiabilidade e resiliência em redes de abastecimento de água.

De acordo com o Conselho Nacional de Infraestruturas (NIAC, 2016), departamento governamental estadunidense, os serviços de abastecimento de água são cruciais pois possuem efeitos diretos em basicamente todos outros setores de serviços. Para delinear a importância dos serviços de água, ainda de acordo com o guia do NIAC, nos Estados Unidos, de doze principais serviços e sistemas, como é observável na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Dependência do setor de água e degradação dos sistemas por interrupção do fornecimento.

<i>Setor</i>	<i>Instalações com dependência com o setor de água</i>	<i>Média de degradação do sistema</i>	<i>Janela temporal*</i>
<i>Agricultura</i>	82%	83%	4 horas
<i>Transportes</i>	88%	50%	8 horas
<i>Indústria Química e de Materiais</i>	100%	83%	8 horas
<i>Financeiro e Bancário</i>	90%	50%	4 horas
<i>Tratamento de Esgoto Sanitário</i>	61%	17%	5 horas
<i>Manufatura Crítica</i>	93%	83%	4 horas
<i>Base Industrial de Defesa</i>	93%	83%	8 horas
<i>Serviços de Emergência</i>	75%	17%	4 horas
<i>Plantas de Geração de Energia</i>	82%	83%	4 horas
<i>Hospitais</i>	98%	83%	2 horas
<i>Instalações Comerciais</i>	94%	83%	3 horas
<i>Instalações Públicas</i>	96%	84%	5 horas

\* Tempo em horas após interrupção dos sistemas de abastecimento de água em que há maior parte da degradação do referido sistema. Adaptado de: (NIAC, 2016)

Apesar dos dados contidos na Tabela 3 não poderem expressar uma condição imutável em virtude da existência de inúmeros fatores que implicam em tais eventos ou permitirem diagnósticos mais precisos (e.g., dispersão geográfica destes serviços), já é possível notar uma intrínseca relação de interdependência e da importância do setor de águas como um todo no funcionamento tanto de serviços essenciais como de não essenciais.

Outra questão sempre em evidência em relação aos sistemas de abastecimento público de água são as consideráveis taxas de perdas de água nas redes, sendo certamente o problema mais imperativo dessas infraestruturas. As perdas de água podem suscitar em problemas que vão além das perdas materiais e econômicas à própria água, os vazamentos podem acarretar no solapamento e erosão do solo levando ao desabamento de pavimentos ou ruas e até mesmo danos à edificações de terceiros (GONÇALVES; LIMA, 2007).

Barton et al. (2019), ao identificar possíveis fatores de influência sobre a falha de tubulações como forma de aprimorar a predição desses eventos, contextualiza tanto fatores mecânicos intrínsecos à hidráulica a mecânica dos condutos, como fatores ambientais geológicos e climáticos e componentes operacionais como gerenciamento de pressões e demanda. Havendo ainda a existência de predisposições maiores para determinados tipos de causas em detrimento do material e idade do conduto. Na Tabela 4, abaixo, estão destacados alguns destes fatores em relação ao tipo de material componente, bem como as vulnerabilidades típicas às quais cada conduto tem mais propensão a falhas.

Tabela 4 – Fatores e falhas por material de composição da tubulação

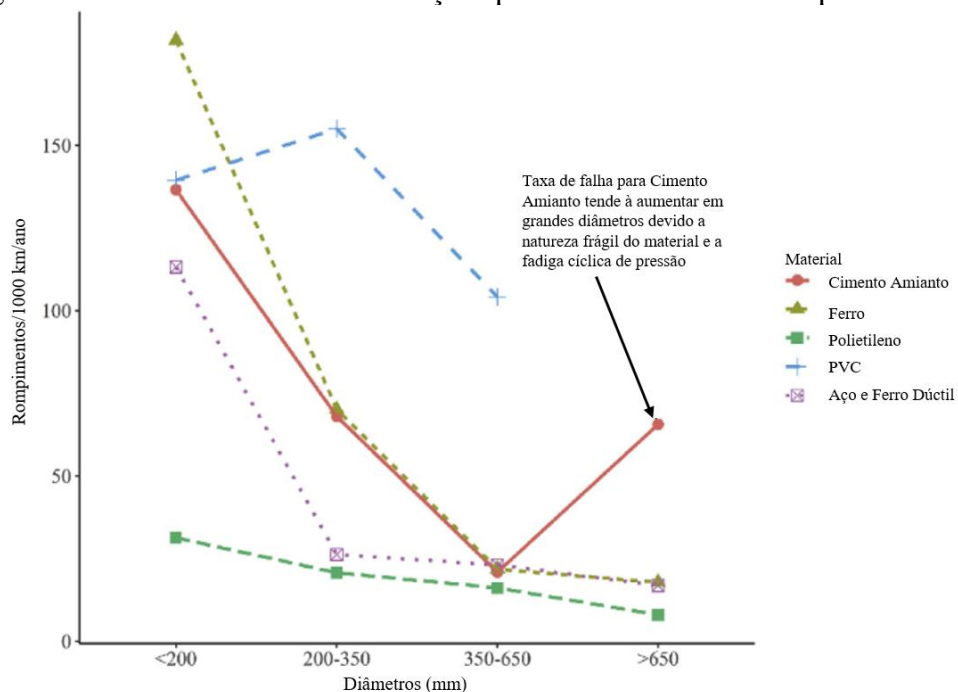
Material	Fatores			Vulnerabilidades típicas
	Intrínsecos ao conduto	Ambientais	Operacionais	
Ferro	Diâmetro	Temperaturas frias	Altas pressões	Fraturas verticais
	Grafitização	Congelamento	Fadiga progressiva às flutuações cíclicas de pressão	Fraturas em junções
	Defeitos de fabricação	Baixas temperaturas da água	Transientes hidráulicos	Fraturas longitudinais
	Proteção	Solos de alta corrosividade		Ataques químicos
	Rigidez de junções			
Aço e Ferro dúctil	Defeitos de fabricação	Solos de alta corrosividade	Altas pressões	Ataques químicos
	Proteção		Fadiga progressiva às flutuações cíclicas de pressão	Fraturas em junções
	Rigidez das junções			
Policloreto de Vinila (PVC)		Temperaturas quentes		
		Flutuações na umidade do solo		
	Material de baixa qualidade	Solos argilosos diminuem a maleabilidade do material	Altas pressões	Fraturas em junções
	Defeitos de fabricação		Fadiga progressiva às flutuações cíclicas de pressão	Fraturas longitudinais
	Armazenamento	Solos arenosos aumentam o desgaste do conduto		
	Resistência à cargas			
Polietileno (PE)			Altas pressões	Fraturas em junções
	Material de baixa qualidade		Fadiga progressiva às flutuações cíclicas de pressão	Fraturas longitudinais

Adaptado de: (BARTON et al., 2019)

Apesar de não ser possível inferir com acurácia os quantitativos e qualitativos do panorama brasileiro dos materiais das tubulações empregadas nas redes brasileiras, alguns dados indicam o prevalectimento, ao menos na região metropolitana de São Paulo-SP, de cerca de 95 % da rede composta por condutos de ferro (69 %), PVC (22 %) e PE (4 %) (MARCONDES, 2016). Contudo, é válido destacar que, mesmo havendo a pormenorização quanto ao comportamento dos condutos de acordo com sua respectiva composição, ainda assim prevalecem inúmeras variáveis que tornam as condições de previsibilidade de falhas na rede complexas não triviais.

Diante disso, vale destacar os comportamentos para taxas de falhas em tubulação de diferentes materiais observados por Barton et al. (2019) de acordo com seus diâmetros dispostos na Figura 10, abaixo. O autor observou uma intensa correlação de falhas com diâmetros menores que 200 mm, contudo havendo de se destacar que tais diâmetros são também os mais recorrentes. Todavia maior propensão à rompimentos podem estar associados também à menor resistência à movimentos e compactação de solo, corrosão ou até mesmo com eventuais distúrbios provocados na superfície ou por edificações adjacentes (KIMUTAI et al., 2015).

Figura 10 – Taxa de falhas de tubulações para diferentes materiais por diâmetros.



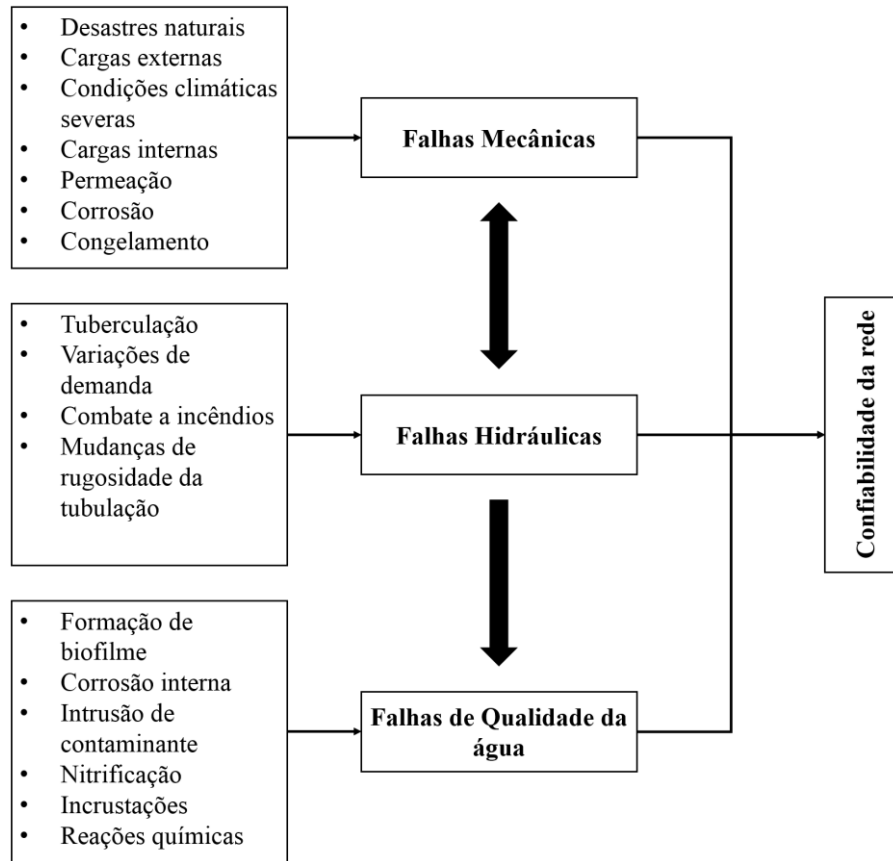
Fonte: (BARTON et al., 2019)

Além das averiguações dispostas nas curvas da Figura 10, Barton et al. (2019) também investigou taxas de rompimento de condutos de diferentes materiais e sua possível relação com variações térmicas derivadas da sazonalidade para o clima do Reino Unido. Nesse contexto observaram-se baixas taxas em relativamente todos materiais nos meses de primavera o que se justificou a priori em função das temperaturas amenas e de solos úmidos. Nos meses do verão, por sua vez, o autor observou incremento nas taxas para tubulações de PVC e cimento amianto e associou tais resultados ao comportamento do solo da região; ao passo em que para os meses de inverno, em virtude das consideráveis baixas temperaturas, as tubulações de ferro foram as que mais sofreram e apresentaram considerável incremento na taxa de rupturas. Evidentemente que, traduzindo-se essa condicionante à realidade brasileira em sua totalidade, podemos, em princípio, descartar potenciais consideráveis interferências variações térmicas abruptas em virtude do clima tropical e subtropical brasileira.

### **3.6.1 Riscos, ameaças e vulnerabilidades**

De acordo com Liu e Song (2020), de maneira geral, existem três tipos de riscos relacionados à redes de abastecimento de água, sendo esses: desastres naturais, no caso, comumente relacionados a eventos sísmicos; condições anormais de operação como cenários de falhas e vazamentos críticos em tubulações ao longo da rede e intrusão de substâncias, enquanto que o terceiro tipo se relaciona a dinâmica de expansão da rede, onde surge potencial ocorrência de desestabilização entre a demanda e a sua capacidade de suprimento da mesma. Gheisi; Forsyth e Naser (2016) elencam inúmeros distúrbios—Figura 11 abaixo— que podem acometer a rede de água com base na premissa das três principais categorias de confiabilidade por ele elencadas.

Figura 11 – Tipos de falhas em redes de abastecimento de água



Adaptado de: (GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016)

Como é possível observar na Figura 11, uma rede de abastecimento está submetida constantemente à inúmeras falhas que podem expor suas vulnerabilidades e levar a eventos e distúrbios catastróficos ou não. É interessante salientar também a relação de interferência entre os principais tipos de falhas. Como no caso, falhas mecânicas e hidráulicas possuem uma relação onde problemas decorrentes de uma natureza podem acarretar problemas em outra e vice-versa. Enquanto que para as falhas de qualidade de água, tanto características hidráulicas como mecânicas podem ser fatores de risco (GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016).

Macruz et al. (2017) destaca em sua análise a respeito do Planos Diretores de Abastecimento de Água (PDAA's) para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). O documento baseia-se nos conceitos de risco, prejuízos e resiliência, sendo que: risco corresponde a probabilidade de ocorrência de um ou mais eventos indesejáveis (e.g., acidentes de operação, falhas no abastecimento, condições de escassez hídrica, etc.) no horizonte do plano; sendo que tal risco, deve ser mitigado em função dos prejuízos que determinado evento possa acarretar. Já a resiliência, compreendida como a capacidade de recuperação após um

evento indesejável, é utilizada na operação de contingência, que em suma trata-se da supressão mínima das demandas até a completa volta à normalidade do sistema através do uso do sistema de interligação das redes via adutoras.

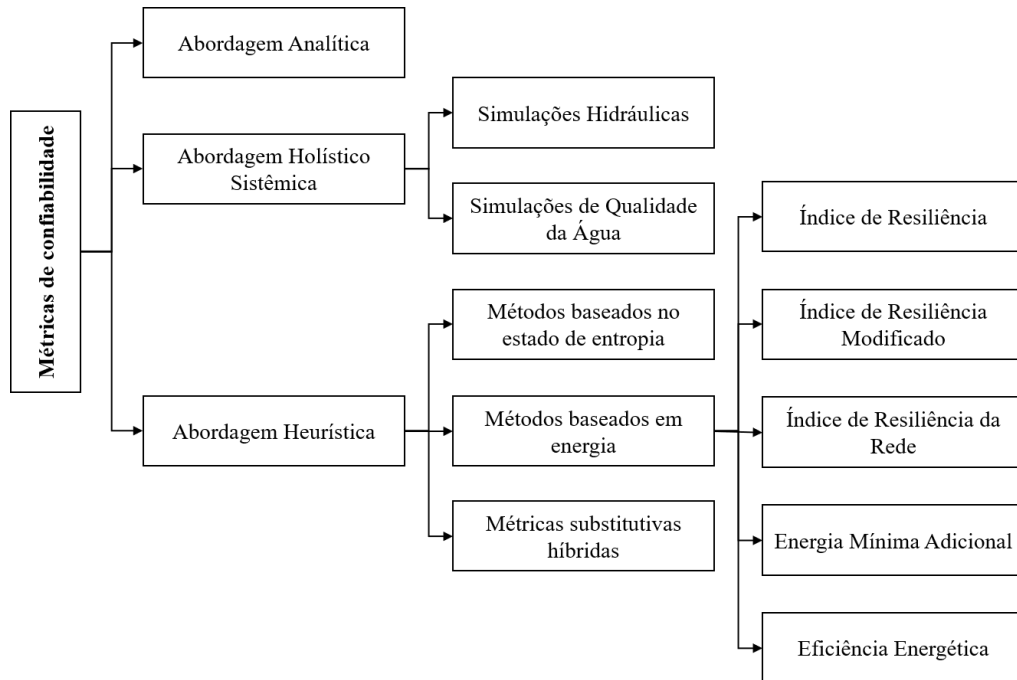
Os riscos e vulnerabilidades envolvidos em redes de água e no setor de água como um todo, estão estreitamente correlacionados ao gerenciamento e manutenção da rede, aos seus componentes e recursos disponíveis, também em certo grau ao tamanho da rede e sua idade (NIAC, 2016). Portanto, ter em destaque o fato de que, para uma dinâmica tão complexa como é a realização do abastecimento de água, com, por exemplo, a necessidade da manutenção contínua de padrões e parâmetros, dependência do funcionamento de outros setores (e.g., setor energético), é fator primordial para análise de quaisquer técnicas ou métodos que possam colaborar com a melhoria da sua resiliência.

### 3.7 CLASSIFICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE MEDIÇÃO DE RESILIÊNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Gheisi; Forsyth e Naser (2016) ao analisarem a literatura sobre as técnicas de medição de confiabilidade utilizadas comumente em redes de água, identificaram três principais abordagens: Analítica; Holístico-sistêmica e Heurística, como é exibido na Figura 12 abaixo.

A abordagem analítica ou chamada de abordagem por conectividade é fundamentada na análise da conectividade entre os elementos da rede como tubulações, bombas e reservatórios. Esses métodos analíticos, por sua simplicidade e por consequência aplicabilidade, acabam por serem métodos razoáveis para análises iniciais, estruturação e reconhecimento básico de um sistema de abastecimento de água. Tais métodos se baseiam principalmente na avaliação topológica e abordagem fundamentadas em teoria de grafos e redes complexas, desconsiderando, a priori, atributos hidráulicos e/ou de qualidade da água (GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016; WAGNER; SHAMIR; MARKS, 1988; YAZDANI; JEFFREY, 2011; YAZDANI; OTOO; JEFFREY, 2011).

Figura 12 – Critérios e métodos para medidas de confiabilidade em redes de água



Adaptado de: (GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016).

A abordagem Holístico-Sistêmica, ou também chamada de abordagem por performance tem como fundamento a simulação do funcionamento hidráulico da rede. As principais análises são realizadas no campo da modelagem analisando casos de falhas hidráulicas ou mecânicas, conduzindo simulações variadas, podendo principalmente ser orientadas pela demanda ou por pressão (GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016; TANYIMBOH; TABESH; BURROWS, 2001). As simulações de qualidade da água, por outro lado, têm sido menos consideradas nos estudos, comumente a confiabilidade com a manutenção de concentração residual de desinfetante ao longo da rede dentro de padrões aceitáveis. Contudo, falhas hidráulicas e mecânicas como pressões inadequadas, incrustações devido à idade e outras formas de contaminação são também potenciais degradantes das condições de qualidade da água na rede (GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016).

A abordagem heurística ou também de medidas substitutas abrange três linhas principais: métodos baseados na entropia da rede, métodos baseados em energia e métricas substitutivas hídras.

A abordagem de entropia da rede, que se fundamenta na distribuição do fluxo ao longo da rede para determinar condições de confiabilidade. Características como redundância, (ou seja, maior formação de caminhos para o fluxo) e uma distribuição mais uniforme das vazões



ao longo dos trechos da rede tendem a elevar as condições de entropia da rede gerando por consequência cenários de maior confiabilidade principalmente sob condições de falhas mecânicas (AWUMAH; GOULTER; BHATT, 1990; GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016).

A segunda abordagem dentre as chamadas heurísticas é baseada em métricas de energia que traz uma subdivisão entre cinco diferentes índices, é uma das mais exploradas e abrange algumas das metodologias mais difundidas na medição de resiliência. Dentre essas, o índice de resiliência criado por Todini (2000) que se fundamenta no excedente de energia na rede para superar ocasionais eventos disruptivos na rede. O autor define o índice de resiliência baseado na diferença de cargas de pressão em cada nó, considerando também as vazões, e foi apresentado como parte de uma metodologia para projeto otimizado de rede. Essas foram algumas das primeiras publicações com enfoque no tema de resiliência de redes de distribuição de água e é uma das metodologias mais exploradas (ASSAD; BOUFERGUENE, 2022).

O índice de resiliência modificado foi a técnica desenvolvido por Jayaram e Srinivasan (2008) com modificação do índice desenvolvido por Todini (2000), para considerar mais de uma fonte de abastecimento ou reservatório para a rede. O índice modificado é também apresentado como parte de uma otimização multiobjetivo de maximização do ciclo de custo de vida da rede e minimização do índice de resiliência ao longo da vida da rede. De acordo com o autor, o método permitiu superar específicas limitações existentes no método de Todini para redes com mais de uma fonte de abastecimento/reservação, maiores valores mínimos do índice modificado de resiliência foram mais adaptados ao aumento das incertezas provenientes do aumento da demanda e rugosidade com o envelhecimento das tubulações ao longo do tempo.

Prasad e Park (2004) desenvolveram o índice de resiliência da rede que considera três índices de resiliência, dentre eles o índice de resiliência de Todini (2000), com um índice baseado no somatório de energia excedente em nós de junção e o índice de energia mínima adicional baseado na maximização da energia excedente no nó mais distante como forma de incremento da confiabilidade. Contudo, o autor considera ainda o aspecto de redundância com base no número de trechos conectados à um nó e na uniformidade do diâmetro desses trechos. Por fim, o índice resultante considera fortemente o cenário de energia excedente na rede com a maximização dos três índices supracitados, considerando, no entanto, que a abordagem somente através desse aspecto não é suficiente para avaliação da resiliência ao adicionar uma avaliação da uniformidade de diâmetros na rede.

O índice de resiliência baseado em energia da rede criado por Dziedzic e Karney (2014), também convencionou os princípios de energia dada pelas fontes (i.e., reservatório, bombas, etc.) e considerando as condições de confiabilidade, vulnerabilidade, resiliência e conectividade estritamente através de métricas de energia. A métrica de conectividade, contudo, apesar de ser uma métrica topológica, foi considerada como sendo o percentual mínimo de vazão demandada que chega a um determinado nó durante a falha de um determinado trecho.

As considerações gerais principais das métricas baseadas na energia na rede são principalmente fundamentadas na análise da energia existente nos nós e na energia disponível inicial ou potencial da rede. Tem, de maneira geral, como principal empecilho a boa capacidade de identificação de falhas mecânicas em detrimento da fraca análise a respeito das condições topológicas da rede. Contudo, é uma das formas de medição e aferição de confiabilidade mais amplamente aplicadas e exploradas na literatura (GHEISI; FORSYTH; NASER, 2016).

Silva (2018) realizou análises avaliando a resiliência hidráulica de redes adutoras em condições de transientes hidráulicos tendo destacado, dentre os desafios de seu estudo, a inexistência de metodologias aplicáveis à esta problemática em específico em virtude da singularidade do problema envolvido à falhas por transientes hidráulicos em adutoras. As metodologias existentes encontradas pelo autor somente levavam em consideração sistemas cujo índice de resiliência se restringia a sistemas onde a pressão no ponto jusante tinha restrição de pressão mínima requerida (i.e., metodologias desenvolvidas sobre problemáticas relacionadas a redes de distribuição em específico). O autor lançou mão de preceitos levantados por Wang et al. (2014) com base em duas metodologias: maior fator de risco, obtido a partir da consideração do risco relacionado à valores máximos da pressão máxima; risco relacionado à pressão mínima; risco relacionado máximo volume de vapor e risco associado à força de transiente hidráulico; e risco global obtido através da combinação de pesos dados por esses riscos.

Jorge (2022), em sua análise qualitativa acerca da influência de cenários de seca frente a operação e manutenção da resiliência em sistemas de abastecimento de água também procura identificar eventuais pontuais melhorias no sistema de abastecimento de água. O procedimento avaliativo desenvolvido pelo autor foi projetado com base na aplicação de questionários, semelhante à metodologia aplicada por Arenales (2019), de percepção aos operadores de autarquias enquanto que a avaliação dos resultados foi embasado no método de pontos de alavancagem (MEADOWS, 1999). Essa metodologia, por sua vez, baseia-se na identificação

de pontos prioritários de melhoria no sentido de que esforços mínimos dentro do sistema possam gerar máximos resultados no sentido do objetivo desejado de aprimoramento.

As metodologias de medidas substitutivas híbridas, a terceira nas linhas consideradas na abordagem de heurística (Figura 12), são resultado da intenção de criar métricas mais compreensivas e capazes de representar melhor a realidade, tendo por característica básica serem a combinação de diferentes métricas. Raad; Sinske e Van Vuuren (2010) realizaram comparações entre técnicas híbridas e técnicas comuns, a técnica híbrida utilizada, por sua vez, foi uma normalização da entropia de fluxo da rede pelo índice de resiliência. Tal medida tem por vantagem a abordagem da redundância e uniformidade do fluxo considerados pela entropia do fluxo e da carga hidráulica excedente considerada pelo índice de resiliência. As análises feitas pelos autores foram realizadas sobre três redes e análises de otimização genética de multiobjectivo foram realizadas com cenários de demandas randômicas e de falha de tubulações com função de minimização de custos. A técnica de índice de resiliência não combinada apresentou resultados mais satisfatórios sob condições de variações randômicas, no entanto de maneira geral o estudo do autor não pode apontar uma técnica definitivamente mais adequada e considerando que a métrica mista de técnicas não apresentou grande melhora na eficiência da aferição mais adequada tanto em falhas mecânicas como hidráulicas.

### 3.8 REDES COMPLEXAS

A comunicação, como um processo de transferência e motilidade de informações entre diferentes elementos exerce papel fundamental desde as ciências sociais as exatas. E o que é essa incrível capacidade senão um veículo pelo qual algo é transferido de um local a outro no espaço, seja esse abstrato como uma ideia ou físico como a água, mercadorias, pessoas, etc. Ao extrapolar esse fenômeno tão natural, temos a formação de uma “teia”, que se comporta ao sabor das comunicações que realiza, de suas características e das leis naturais da física que a regem (NEWMAN, 2003).

Debruçando-se sobre a complexidade que são os problemas relacionados a esses complexos sistemas, Leonhard Euler (1707-1783) deu início à um vasto campo do conhecimento problema das pontes de Königsberg no ano de 1736<sup>4</sup>, sendo conhecido como o primeiro problema solucionado através da teoria de redes complexas. Desde então essa ciência tem sido aplicada à inúmeras áreas do conhecimento, das ciências sociais à rede mundial de computadores (NEWMAN, 2003).

Com a evolução do conhecimento, as abordagens acerca das formas de análises também se refinaram. O surgimento de novas tecnologias permitiu a investigação não somente da rede como um todo, mas também dos elementos que a compõe (i.e., vértices e ligações), aliando também métodos estatísticos às análises, os estudos que outrora se restringiam à sistemas relativamente pequenos com poucos elementos, agora podem comportar redes com centenas e milhares de vértices e trechos conectores das mais diversas complexidades (NEWMAN, 2003).

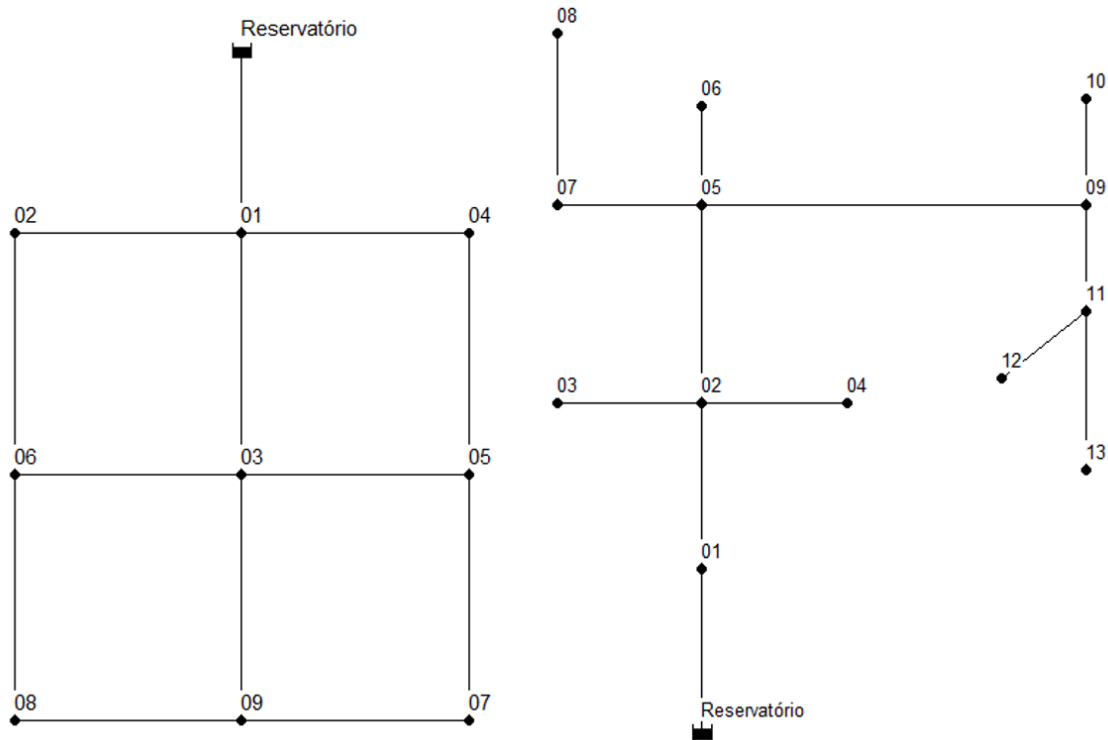
### 3.9 REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: MORFOLOGIA NO CONTEXTO TOPOLÓGICO

As redes de distribuição de água, em suma, são categorizadas entre ramificadas e malhadas, podendo as mesmas serem compostas em sua totalidade ou parcialmente por essas características, sendo essas últimas consideradas redes de traçado misto (Figura 13). Os aspectos determinantes dessas características estruturais usualmente são o delineado do arruamento urbano, o nível de desenvolvimento da região (e.g., existência de distritos urbanos específicos), topografia, localização de mananciais, plantas de tratamento de água e reservatórios (FORMIGA, 2005).

---

<sup>4</sup> Problema cujo objetivo era encontrar um caminho que cruzasse todas sete das pontes que conectavam ilhas na cidade de Königsberg e não repetissem uma das pontes. A resolução concebida apontou que cada ponto de conexão deveria ter um número par de pontes para que não houvesse o cruzamento de uma ponte mais de uma vez.

Figura 13 – Exemplo de traçado malhado (esquerda) e ramificado (direita).



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 13, é possível observar com maior detalhamento as diferenças conceituais entre ambas formas de rede. Sendo que, para redes malhadas, a presença de loops ou anéis que constituem, de certo modo, uma “malha” de traçados que são, por sua vez, comumente mais adequadas tecnicamente e possuem maior viabilidade técnico e econômica em regiões urbanas em virtude de sua maior redundância. Já as redes ramificadas, por constituírem-se essencialmente da existência de nós de fim de trecho e, diferentemente das redes malhadas, não possuem estrutura que proporcione redundância ao fluxo, tal morfologia são mais comuns em regiões pouco povoadas, onde tanto a existência de arruamento como de consumidores é escasso (FORMIGA, 2005).

Além disso, de acordo com Rowell e Barnes (1982, apud FORMIGA, 2005), estruturas com traçado malhado devem ser preferenciais em qualquer circunstância de abastecimento, quando averiguada sua viabilidade. Devendo isso ao fato de que tais formatações permitem a existência de redundância a dinâmica de fluxo em casos de falhas; diminuição da idade da água ao longo da rede e, portanto, melhoria das condições de decaimento de desinfetante residual; menor acúmulo de sedimentos nos condutos e maior facilidade na limpeza das tubulações.

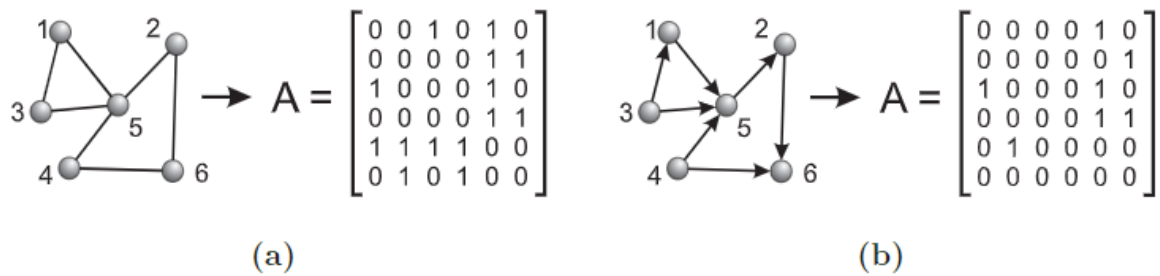
Os postulados anteriores possibilitam a verificação de certas condições associadas à redundância já consolidadas às boas práticas de projeto, planejamento e operação das redes de abastecimento de água. A existência de tendências morfológicas cujo um dos elementos pivôs é o incremento da redundância ao longo da rede é fundamental para balizar tanto o estado atual das técnicas consolidadas como auxiliar no planejamento do desenvolvimento de novas metodologias que permitam tanto incrementar tais técnicas como contemplar estratégias sobre condições e características mais específicas.

Nesse contexto, as redes de abastecimento de água são consideradas redes complexas por possuírem características como: comumente serem sistemas consideravelmente grandes, compostos por centenas ou milhares de nós e vértices; não serem infraestruturas de trivial monitoramento, principalmente por possuírem grande parte de seus componentes enterrados; possuírem diferentes formas de comunicação entre seus elementos; sua modelagem inclui equações não lineares sendo necessária à adoção de modelos numéricos mais sofisticados e, por fim, possuírem altas taxas de perdas de água (MAYS, 2000, apud DI NARDO et al., 2017b).

### 3.10 MÉTODOS DE ANÁLISES TOPOLÓGICAS

Para concepção topológica das redes de distribuição de água através de uma abordagem grafológica, é imprescindível fundamentar a teoria de redes complexas e suas principais noções. Os grafos (i.e., redes complexas) são compostos por nós/vértices (e.g., nós de demanda, uniões e reservatórios) e trechos/linhas (e.g. tubulações, bombas e válvulas). Matematicamente são representados como uma rede  $R = (V, E)$  onde  $V$  vértices/nós,  $V = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_V\}$  e  $E$  como um conjunto de trechos,  $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_E\}$  sendo “n” e “e” correspondente à identificação dos nós do conjunto  $V$  e trechos do conjunto  $E$  respectivamente. As conexões entre os vértices dada pelos trechos pode ser caracterizada como orientadas (Figura 14b) ou não orientadas (Figura 14a), ou seja, quando há ou não, respectivamente, a consideração do sentido dessas ligações (HERRERA; ABRAHAM; STOIANOV, 2016; MENG et al., 2018; RODRIGUES, 2007).

Figura 14 – Representação das redes complexas não direcionais [a] e direcionadas [b].



Fonte: (RODRIGUES, 2007)

Logo, um conjunto de nós da rede— $V(G)$ — tem suas distâncias caracterizadas por  $d_G(i, j)$  será o número de trechos do caminho mais curto entre os nós  $i$  e  $j$ . Nesse contexto, introduz-se o conceito de excentricidade de um grafo  $e_G(i)$ , sendo a distância do nó  $v$  à outro nó  $u$  do grafo  $G$  (DANKELMANN; GODDARD; SWART, 2004). Essa excentricidade, por sua vez, dá base para as métricas de raio e diâmetro, que são, respectivamente, as distâncias mínimas e máximas de um vértice em um grafo  $G$  e serão abordadas com mais rigor adiante no texto.

Na Figura 14, acima, é possível observar a forma de representação tanto de redes complexas não dirigidas (a) como das redes dirigidas (b) e suas respectivas matrizes de adjacência mais detalhadamente descritas abaixo.

Outro formato de representação de grafos é através de listas ou uma matriz de adjacência (A). Sendo que, no caso das listas, informações de pares de vértices ( $i, j$ ) podem ser armazenados e pesos agregados quando houverem. Para as matrizes de adjacência (Figura 14), as informações da relação entre trecho e nó são representadas binariamente, ou seja, dado um grafo simples  $G=(V,E)$ , não direcionado, com  $n$  vértices e  $m$  trechos, a matriz  $n \times n$ , na qual os inputs são iguais a 1 caso o nó  $i$  e o nó  $j$  sejam adjacentes ( $A_{ij}=A_{ji}$ ), e caso contrário serão iguais a 0 (MENG et al., 2018; RODRIGUES, 2007; SANTOS, 2010).

Além da matriz de adjacência, a matriz de Laplace também é utilizada por vezes em algoritmos de clusterização das redes ou mesmo como parâmetro de avaliação de métricas espectrais. A matriz de Laplace (L) de tamanho  $n \times n$  (i.e., tamanho da quantidade de nós  $n$  na rede), gera valores igual a -1 para vértices conectados entre si e sendo usualmente determinada a partir de  $L=K-A$ , onde  $K$  corresponde à matriz com os graus dos nós e  $A$  corresponde a matriz de adjacência (DONETTI; NERI; MUÑOZ, 2006).

Há também a eventual agregação de valores/pesos adicionais aos elementos da rede (e.g., comprimento dos trechos de tubulações no caso das redes de distribuição) como forma de adição de pesos, logo devendo a estrutura da rede apresentar também informações relacionadas a esses em forma de um conjunto  $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_E\}$  que representa o valor de cada um dos trechos (RODRIGUES, 2007).

### **3.10.1 Métricas topológicas de redes complexas.**

As métricas topológicas descritas a seguir são amplamente reconhecidas como medidas fundamentais na teoria dos grafos em geral. No entanto, nesta discussão, buscou-se explorar a relação e a capacidade analítica dessas métricas em redes de distribuição de água, considerando as bibliografias e aplicações existentes. Essas métricas desempenham um papel fundamental na análise topológica da rede de abastecimento neste trabalho, juntamente com a aplicação de metodologias específicas.

Contudo, é importante primeiro definirmos rapidamente o conceito de métrica e principalmente sua distinção do termo medida dentro do método científico. De acordo com Dutheil (1991, apud SANTOS, 2003), uma métrica trata acerca de um conjunto de dados finitos passíveis de aferição, mas que por sua vez se constitui pela existência de relações de semelhança ou não com outros fatores de grandeza igual ou diferente. Enquanto que uma medida é de caráter menos relacional com outros fatores e restringe-se à aferição dos dados e sua expressão através de uma grandeza. De maneira geral, as métricas são uma extrapolação das medidas de maneira que maiores informações sobre o objeto de estudo sejam incorporadas a ela.



### 3.10.1.1 Densidade dos trechos

A densidade dos trechos, corresponde a razão entre o número total de trechos possíveis  $m$  na rede pela quantidade de nós  $n$  (Equação (2)).

$$q = \frac{2m}{n(n-1)} \quad (2)$$

Essa variável indica a quão esparsa é a rede com base na densidade de conexões existentes. Logo, para a maioria das redes de distribuição de água o valor para a densidade dos nós tenderá a ser baixo. Contudo, em geral, há uma discrepância quanto a densidade de trechos e a constituição geral da rede, sendo que estruturas malhadas, pela maior existência de loops em sua constituição, apresentarão maior densidade em relação a redes ramificadas, cuja ligação entre os nós é menor (YAZDANI; JEFFREY, 2011).

A densidade de trechos é considerada uma das principais métricas básicas das redes complexas também pelo fato de caracterizar o aspecto de redundância existente na rede. Há uma correlação de tendência à métrica ser inversamente proporcional ao número de nós e inversamente proporcional à raiz quadrática do número de trechos (GIUDICIANNI et al., 2018; JAMAKOVIC; UHLIG, 2008).

Meng et al. (2018) verificou a existência de forte correlação entre a densidade de trechos da rede e duas métricas de performance de resiliência da rede (i.e., tempo para os danos ou resistência e tempo de duração da falha) indicando que redes cujos nós que possuem maiores conexões entre si respondem melhor frente à eventos disruptivos e, portanto, possuem melhor resiliência de modo geral.

### 3.10.1.2 Grau médio dos nós

O grau médio do nó também é uma das mais básicas métricas relacionadas a análise de redes complexas. Essa variável caracteriza-se por ser a aferição do valor médio de trechos  $m$  ligados aos nós  $n$  (Equação (3)).

$$\langle k \rangle = \frac{2m}{n} \quad (3)$$

Em termos gerais, essa métrica identifica primordialmente a comunicação entre os nós, e, portanto, também, o aspecto de conectividade da rede. Redes cujo  $\langle k \rangle \approx 2$  tendem a ter baixa conectividade, com quase nula existência de loops e indicando redes mais ramificadas e lineares, enquanto que valores maiores já indicam, gradualmente, a presença de mais estruturas malhadas na rede (GIUDICIANNI et al., 2018).

A determinação do grau dos nós e de sua distribuição permite a determinação, por exemplo, se as conexões de uma determinada rede são definidas de modo aleatório ou há alguma lei de formação imperando sobre sua estrutura. Essa análise foi, no princípio das investigações acerca das redes complexas, crucial para impelir a criação de metodologias mais sofisticadas e a modelagem de redes reais (RODRIGUES, 2007).

Além da aferição da média de conexões nos nós da rede de forma geral, a observação da distribuição do grau dos nós pode sugerir impressões acerca de possíveis heterogeneidades existentes na rede. Essa aferição, também denominada de Distribuição Empírica de Grau Nodal ( $P(k)$ ) é definida pela fração de nós com um determinado grau  $k$  na rede (Equação (4)).

$$P(k) = \frac{n_k}{n} \quad (4)$$

Em que  $n_k$  é o número de nós da rede com um determinado grau  $k$ . O que permite uma maior acurácia na avaliação das condições da rede quanto a sua conectividade estrutural (GIUDICIANNI et al., 2018; GIUSTOLISI; SIMONE; RIDOLFI, 2017).

### 3.10.1.3 Coeficiente de aglomeração

O coeficiente de agrupamento ( $c$ ) é, de acordo com Yazdani e Jeffrey (2011), uma importante métrica para caracterização dos conjuntos de ciclos (loops) de uma rede. Esse atributo permite, portanto, uma aferição das condições de redundância na rede que possam assegurar o suprimento da demanda de eventos de falha. A Equação (5), abaixo, expressa a forma de aferição do mesmo:

$$c = \frac{3N_{\Delta}}{N_3} \quad (5)$$

Em que o coeficiente de agrupamento ( $c$ ) é definido pela razão entre o número de triangulações presentes na rede ( $N_{\Delta}$ ) pelo número de conexões triplas ( $N_3$ ) ou ainda pela quantidade de nós de grau igual a três na rede. Contudo, tanto no problema em questão como análogos (e.g., processos de urbanização) dificuldades na utilização dessa variável se prevalecem no fato da existência de conexões em loop, ou seja, elementos com quatro vértices, que torna a utilização dessa métrica menos confiável. Logo, estratégias de utilização de outras formas de aferição tornam-se mais convenientes, como a utilização do coeficiente de malha (BUHL et al., 2006; YAZDANI; JEFFREY, 2011).

#### 3.10.1.4 Assortatividade

A assortatividade ( $\Gamma$ ) é uma métrica de aferição da tendência de vértices com mesmas características se conectarem dentro de uma rede complexa. Sua concepção permite essa aferição por meio do coeficiente de correlação de Pearson considerando as extremidades de um determinado trecho e é definida pela Equação (6, abaixo).

$$\Gamma = \frac{M^{-1} \sum_m i_m - [M^{-1} \sum_m \frac{1}{2} (i_m + j_m)]^2}{M^{-1} \sum_m \frac{1}{2} (i_m^2 + j_m^2) - [M^{-1} \sum_m \frac{1}{2} (i_m + j_m)]^2} \quad (6)$$

Na Equação (6, o termo  $M$  refere-se ao número total de trechos na rede enquanto  $i_m$  e  $j_m$  referem-se ao grau dos vértices que compõe as extremidades do trecho  $m$ . Os resultados dessa métrica se encontram dentro de um range  $[-1,1]$ , sendo que  $\Gamma > 0$  indicam probabilidades positivas para a ocorrência de conexões entre nós com condições avaliadas similares,  $\Gamma < 0$  demonstram tendências negativas (dessassortatividade) à ocorrência de conexões de nós com maior similaridade enquanto valores de  $\Gamma$  iguais a zero indicam completa aleatoriedade para ocorrência de conexões entre nós dada a condição observada (GAMA, 2020; NEWMAN, 2003).

Em termos práticos, a assortatividade pode descrever eventuais tendências de agrupamento e organização da rede. Além disso, caso pertinente, características diferentes do grau dos vértices podem ser adereçadas ao equacionamento e aferidas. Ash e Newth (2007) no que diz respeito à aplicação da métrica para observação de condições de resiliência, aplicaram-

na juntamente com outras métricas topológicas como parâmetro de avaliação de um algoritmo heurístico de construção de redes complexas mais robustas a falhas em cascata.

Analisando as características elementares dessa métrica, a assortatividade pode indicar condições de vulnerabilidade uma vez que elementos críticos dentro da rede também possuem tendência a reverberar estresse uns sobre os outros, bem como a propensão de elementos de maior vulnerabilidade de se conectarem entre si. Valores baixos de assortatividade, ou seja, de maior dessassortatividade, podem apresentar condições de menor intensidade de impactos negativos uma vez que não há uma tendência forte de agrupamentos de nós. Contudo, tal condição não impede, em vista disso, a ocorrência de danos mais esparsos ao longo da rede ou mesmo de falhas mais generalizadas espacialmente dada a maior dispersão dos nós de maior importância ao abastecimento (ABDEL-MOTTALEB, 2021).

#### 3.10.1.5 Coeficiente de malha

A métrica de coeficiente de malha trata-se de uma aferição estatística da topologia da rede e indica condições de redundância na rede (YAZDANI; JEFFREY, 2012b). A expressão dada na Equação (7), abaixo, define a forma de aferição para essa métrica:

$$R_m = \frac{m - n + 1}{2n - 5} \quad (7)$$

É importante salientar que, apesar de métricas como o coeficiente de malha proverem informações acerca das características de redundância do fluxo na rede, analisá-la isoladamente é equivocado e pode levar a interpretações imprecisas das condições de resiliência da rede.

De acordo com análises realizadas por Jung et al. (2016), o coeficiente de malha, juntamente com o grau médio dos nós, apresentou fortes correlações negativas com a maioria das métricas hidráulicas de confiabilidade de redes investigadas, indicando que tais métricas não apresentam uma boa tendência a representar a confiabilidade diante das observações realizadas.

Onde a expressão  $m-n+1$ , corresponde ao número de loops independentes dentro de uma rede com fonte única e  $m-n$  para redes com mais de uma fonte, enquanto que a expressão  $2n-5$  indica a quantidade máxima de loops independentes na rede. Ambas expressões seguem

embasamento na fórmula de Euler para grafos planares (BUHL et al., 2006; YAZDANI; JEFFREY, 2012b).

### 3.10.1.6 Excentricidade dos grafos

O diâmetro, como já anteriormente destacado, é caracterizado como sendo a distância (i.e., aqui distância entendendo-se como número de trechos entre os vértices e não como métricas euclidiana) máxima mais curta entre todos os nós e permite indicar a coesão estrutural da rede e a excentricidade máxima do grafo (Equação (8)). Quanto a excentricidade de um vértice é determinada pela sua maior distância entre em relação a outro dado vértice, sendo, portanto, o raio e o diâmetro de um grafo determinados pela menor e maior excentricidade de um grafo (DANKELMANN; GODDARD; SWART, 2004).

$$D(G) = d_{ij} \quad (8)$$

Em que  $D(G)$  é definido como o menor caminho entre os nós  $i$  ao nó  $j$  e computado como o número de trechos que os conectam, sendo que, no entanto, caso não existirem caminhos entre tais, a distância é assumida como infinita (YAZDANI; JEFFREY, 2011). Essa caracterização, no entanto, não leva em consideração como se dá o fluxo nos trechos, logo, havendo aí, assim como em outras métricas topológicas, lacunas de importância para análises completas de redes de abastecimento de água em específico pela perspectiva topológica.

O conceito de raio pela perspectiva de excentricidade do grafo, como já comentado anteriormente, trata-se da distância mínima ou excentricidade mínima do grafo. Logo o raio geodésico de um grafo pode ser aferido através da seguinte Equação (9):

$$raio(G) = d_{ij} \quad (9)$$

De acordo com Swart (1996), o raio geodésico é uma aferição importante para a avaliação da eficiência da rede. Visto que, conceitos mais práticos, pode servir como uma grandeza auxiliar na avaliação para alocação de válvulas de isolamento ou outros elementos em trechos de relevância para o abastecimento e ou isolamento de determinados pontos de abastecimento.

Dankelmann; Goddard e Swart (2004) ainda elencam o conceito de vértice central ( $c$ ), sendo o mesmo considerado como tal se  $e_G(c) = \text{raio}(G)$  e  $C(G)$  o conjunto de todos nós centrais do grafo  $G$ . Além disso, o nó mais distante de um determinado nó  $i$  é considerado o vértice de excentricidade. Ambos conceitos podem ser aplicados ao caso das redes de abastecimento de água, tendo, por exemplo, o nó  $i$  determinante dos vértices de excentricidade como sendo estruturas de importância fundamental ao abastecimento, como reservatórios e entre outros.

### 3.10.1.7 Comprimento médio dos trechos

O comprimento médio dos trechos trata-se da quantidade média de trechos através do caminho mais curto entre todos os possíveis nós da rede de forma a permitir o grau médio de separação entre quaisquer pares de nós. Sendo que quanto mais altos os valores dessa métrica, maior é o indicativo de a rede ser fragmentada e, portanto, mais vulnerável ao desabastecimento. Na Equação (10, abaixo,  $d_{ji}$  é o número de trecho no caminho mais curto entre o nó  $i$  ao nó  $j$  enquanto  $n$  é o número de nós na rede.

$$APL = \frac{2 \sum d_{ji}}{n(n-1)} \quad (10)$$

Meng et al. (2018) trata tal medida como descritiva da eficiência do abastecimento da rede e salienta também a sua influência pelas características de conectividade da rede como longos trechos de tubulações e/ou reservatórios localizados distantes dos pontos de consumo. No presente trabalho a métrica APL será aferida em termos de distâncias euclidianas entre os nós, uma vez que a aferição de modelos capturando a contagem de unidades de trechos como resultado pode eventualmente causar distorções na interpretação dos resultados.

Outra versão dessa métrica que será observada é o comprimento médio dos trechos até o reservatório (APLe). Informação que, no contexto de rede de abastecimento de água pode ser de interessante utilidade uma vez que permite determinar a condição média da relação dos nós com seu reservatório de abastecimento em questão.

### 3.10.1.8 Centralidade média

A centralidade média, tanto dentre os estudos de aplicações topológicas em redes de água como sobre outras redes complexas, têm uma aparente considerável maior recorrência em relação às outras métricas. Tal relevância tem origem com os estudos de Freeman (1979) sobre aspectos de centralidade topológica em rede de pessoas, cujos resultados indicaram uma significativa maior sensibilidade às variações grafológicas em comparação às outras métricas aferidas pelo autor. Contudo a definição e as formas de determinação da centralidade dos vértices dentro de uma rede complexa são um tópico por vezes divergente dentre os diferentes estudos considerando teoria dos grafos (BOLDI; VIGNA, 2014). Idealmente, cada vértice exerce uma função importante na manutenção da coesão estrutural e funcional da rede, contudo, a partir de mesmo uma breve análise do funcionamento tanto de redes de água como outras redes complexas, podemos intuitivamente apontar que tais componentes possuem importância distintas entre si. Logo, a centralidade média tem por propósito estabelecer uma maneira adequada de aferir a influência de cada vértice na performance da rede por meio de uma determinação numérica como indicador dos elementos de maior influência dentro da rede (LAWYER, 2015).

Diferentemente da abordagem de relação nó com nó permitida pela métrica de grau dos nós, a centralidade média possibilita a aferição da relação nó com pares de nós, o que amplia sua aplicação como medida topológica (BELL, 2014). De acordo com Zarghami; Gunawan e Schultmann (2018b), o uso recorrente dessa métrica topológica em estudos do gênero dá-se principalmente pela sua capacidade matemática de relacionamento com outras medidas.

Essa métrica fundamenta-se na ideia de que um dado nó é central caso o mesmo encontra-se entre vários outros nós. Logo, a centralidade média de um nó  $i$  é definida pelo número de caminhos mais curtos entre dois nós. Essa condição se expressa matematicamente da seguinte maneira pela Equação (11) abaixo.

$$C_B(i) = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \sum_{s \neq r} \frac{n_{s,r}(i)}{n_{s,r}} \quad (11)$$

Onde  $n$  é o número de nós da rede,  $n_{(s,r)}(i)$  é o número de caminhos mais curtos entre os nós  $s$  e  $r$  que passam pelo nó  $i$ , enquanto que  $n_{(s,r)}$  representa o número de caminhos mais curtos entre os nós  $s$  e  $r$ . A centralidade média é caracterizada por valores entre 0 e 1 sendo maior sua centralidade conforme aproxima-se de 1, sendo o valor máximo quando todos os

caminhos mais curtos entre dois nós passam pelo nó  $i$  (CADINI; ZIO; PETRESCU, 2009). Logo, condições de centralidade média mais próximas de 0 tenderão, no contexto de redes de distribuição de água, indicaria uma maior homogeneidade no fluxo da água ao longo dos nós, que, por conseguinte tenderia a representar pressões mais uniformes ao longo da rede e uma distribuição mais adequada.

### 3.10.1.9 Centralidade média de trechos

A centralidade média de trechos é uma métrica primeiramente adaptada da centralidade média por Girvan e Newman (2002) no intuito de desenvolver uma metodologia que permitisse hierarquizar os elementos de um grafo, utilizando-se dos valores da métrica para decomposição iterativa de grafos. Tendo em vista a averiguação de casos em que métodos baseados no comprimento médio dos trechos ou do número de trechos entre dois vértices (i.e., métricas comparadas pelos autores), forneciam, em alguns casos, condições de exclusão de determinados nós de maior excentricidade. Di Nardo et al. (2018) oportunamente, em seu estudo acerca da identificação de redes primárias para o melhoramento do planejamento de operações na rede, aplicou tal métrica como índice topológico local e fator de escolha na averiguação das condições da rede após fechamento de determinado trecho e aproximação heurística da rede primária.

Na Equação (12, abaixo, é descrita em termos matemáticos o princípio de apuração da métrica.

$$C_{eb}(m) = Lmin(i, j | m) \quad (12)$$

Como é possível identificar, a centralidade média de um trecho  $m$  ( $C_{eb}(m)$ ) é dada pela quantidade de caminhos mais curtos ( $Lmin$ ) entre um par de nós  $i$  e  $j$  que passam pelo mesmo. Por definição, a centralidade média dos trechos é uma extensão direta da centralidade média dos nós. Ela é definida pelo número de caminhos mais curtos que passam por um determinado trecho (BRANDES, 2008a; DI NARDO et al., 2018a).

Outra métrica análoga, mas menos comumente citada é a razão de pontes ( $b_r$ ), que consiste essencialmente na razão de trechos cuja falha venham a ter alto potencial de acarretar o isolamento ou fragmentação total ou parcial da rede pelo número total de trechos existentes



na rede (YAZDANI; OTOO; JEFFREY, 2011). Logo, quanto menos comum a presença de tais trechos dentro do conjunto total da rede, por conseguinte menor será a tendência da rede à existência de vulnerabilidade pontuais que possam acarretar danos em cascata ao longo da rede (WANG et al., 2023).

### 3.10.2 Teoria espectral dos grafos

A teoria espectral dos grafos é uma área da matemática combinatória que busca, através da união entre conceitos de álgebra linear e teoria dos grafos, estudar os sistemas a partir da análise das matrizes associadas a esses. Essa metodologia tem, desde os anos 1990, sido amplamente aplicada em diversas áreas, como: estudos topológicos da internet, mineração de dados, reconhecimento de padrões, balanço de carga e interconexão de rede de multiprocessadores, disseminação de informações, redes sociais e entre vários outros campos (DI NARDO et al., 2018b; SANTOS, 2010).

#### 3.10.2.1 Auto Lacuna (*Eigengap*)

A auto lacuna em uma tradução livre do termo em inglês *Eigengap*, é uma métrica a priori especificamente desenvolvida para o procedimento de particionamento (i.e., clusters). A determinação desta métrica ocorre a partir da consideração prévia do autovalor da matriz de Laplace da rede (DI NARDO et al., 2018b; GIUDICIANNI et al., 2018). Também podendo, a caracterização prévia desse autovalor ser relacionada ao número de clusters pelo qual se considera a rede no procedimento de particionamento espectral (STRANG, 2019).

$$\Delta^L(s) = \lambda_{s+1}^L - \lambda_s^L \quad (13)$$

Na Equação (13, acima, o termo  $\Delta^L(s)$  corresponde à auto lacuna para o autovalor  $s^{\text{th}}$  previamente designado, enquanto que  $\lambda_{(s+1)}^L$  corresponde essencialmente à um autovalor de referência que por padrão será relativamente grande em relação ao autovalor ( $\lambda_s^L$ ). Partindo dessa premissa, em princípio, quanto maiores os resultados da diferença dada pela autolacuna, mais adequada seria a configuração do grafo com o número de clusters ( $s$ ) selecionados (DI NARDO et al., 2018b; FIEDLER, 1973).

### 3.10.2.2 Raio Espectral ou maior autovalor

O raio espectral ou maior autovalor ( $\lambda_1$ ), é calculado através da determinação do conjunto de autovalores da matriz de adjacência do grafo, como é simplificado pela Equação (14, abaixo. O primeiro equacionamento representa a determinação dos autovalores de um grafo a partir da diferença sua matriz de adjacência (A) pelo produto de um possível autovalor ( $\lambda$ ) pela respectiva matriz identidade da matriz de adjacência.

$$\begin{aligned} \det (A-\lambda I) &= 0 \\ \therefore & \\ \lambda_1 &= \max (|\lambda|) \end{aligned} \tag{14}$$

Sendo o conjunto de autovalores da matriz adjacência aqueles cujo resultado for igual a zero, o raio espectral ( $\lambda_1$ ) é então identificado como o maior valor absoluto dentre os mesmos. A determinação dessa métrica desenvolve um importante papel na concepção da modelagem da propagação de substância na rede. Essa capacidade se dá pois tal métrica leva em consideração não somente os trechos conectados à um determinado vértice, mas também aos trechos conectados aos vizinhos desse. Em estudos realizados a respeito da disseminação viral digital, a robustez de uma rede de computadores contra a disseminação do vírus tendeu a ser inversamente proporcional ao raio espectral ( $1/\lambda_1$ ), ou seja, quão menor o raio espectral, maior a robustez da rede. Essa relação expõe a capacidade da métrica de inferir sua relação com a quantidade de trechos entre os vértices. Sendo que quanto maior a quantidade de trechos, mais intensa a capacidade de mobilidade de uma substância e maior sua disseminação, enquanto que quanto maior o raio espectral, melhor a comunicação entre os vértices da rede (DI NARDO et al., 2018b; GIUDICIANNI et al., 2018; YANG WANG et al., 2003).

### 3.10.2.3 Lacuna Espectral

A lacuna espectral, por sua vez, é definida pela diferença entre o primeiro ( $\lambda_1$ ) e o segundo ( $\lambda_2$ ) autovalor da matriz de adjacência do grafo. É costumeiramente utilizado como indicador da magnitude em que se encontram as condições de conectividade em uma rede. Sendo que valores baixos dessa métrica indicam, por conseguinte, uma quantidade menor de trechos a serem removidos para a completa separação entre conjuntos de elementos da rede.

Contrariamente, valores relativamente mais altos tendem a indicar uma estrutura menos compartimentada, não ficando tão explícitos possíveis trechos chave entre a conexão de conjuntos de elementos da rede (DONETTI; NERI; MUÑOZ, 2006). A partir da presente relação, pode-se inferir também as eventuais dualidades que possam vir a ocorrer sobre redes de abastecimento de água em específico, considerando primeiramente o fato de que, ao passo em que a presença precisa de trechos chave entre sub-regiões da rede permite com maior facilidade o traçado de um planejamento e operação de isolamento de setores, a existência de dessas condições impossibilita uma maior condição de conectividade, robustez e por fim de resiliência da rede (DI NARDO et al., 2018b; GIUDICIANNI et al., 2018). Logo, nesse sentido, pode-se dizer que a topologia de uma rede de abastecimento de água, bem como de sua dinâmica hidráulica e resiliência, poderão ser consideradas vantajosas ou não a depender também do planejamento da concessionária responsável e de seu corpo técnico operacional.

#### *3.10.2.4 Conectividade algébrica*

A conectividade algébrica ( $a(G)$ ) de um grafo, é definida pelo segundo menor autovalor da matriz laplaciana do grafo e tende a corresponder à força entre as conexões da rede. De modo geral, quanto maior sua grandeza, mais dificilmente a rede terá propensão a fragmentar-se. O número de vértices e trechos mínimo que necessitam ser removidos para que haja alguma desconexão total entre conjuntos de elementos da rede é chamado de conectividade de vértices e conectividade de trechos respectivamente (GIUDICIANNI et al., 2018; SANTOS, 2010);

### 3.11 LIMITAÇÕES DAS ANÁLISES TOPOLÓGICAS

A existência de determinadas limitações na aferição da resiliência em redes de distribuição de água utilizando-se de técnicas puramente topológicas é um meio parcial de aferição das condições de resiliência da rede. Dedutivamente podemos aferir que muitas dessas restrições são, logicamente, em virtude do fato de tais análises observarem somente o aspecto de localização e situação dos pontos no espaço e em relação aos outros componentes do conjunto formador da rede, e que em princípio, aspectos hidráulicos, mecânicos, operacionais

e de consumo na rede são desconsiderados. Evidentemente que tal abordagem tenderá ao equívoco caso tais aspectos de tamanha importância não sejam considerados. Contudo, as técnicas topológicas se adaptam bem e podem ser uma ferramenta de grande utilidade em análises e estudos primordiais acerca das condições de resiliência de uma rede de água, visto que, diferentemente de métodos mais refinados e robustos, elas não requerem uma grande quantidade de informações e dados para aplicação (MENG et al., 2018; TORRES et al., 2017; YAZDANI; JEFFREY, 2011, 2012b; YAZDANI; OTOO; JEFFREY, 2011).

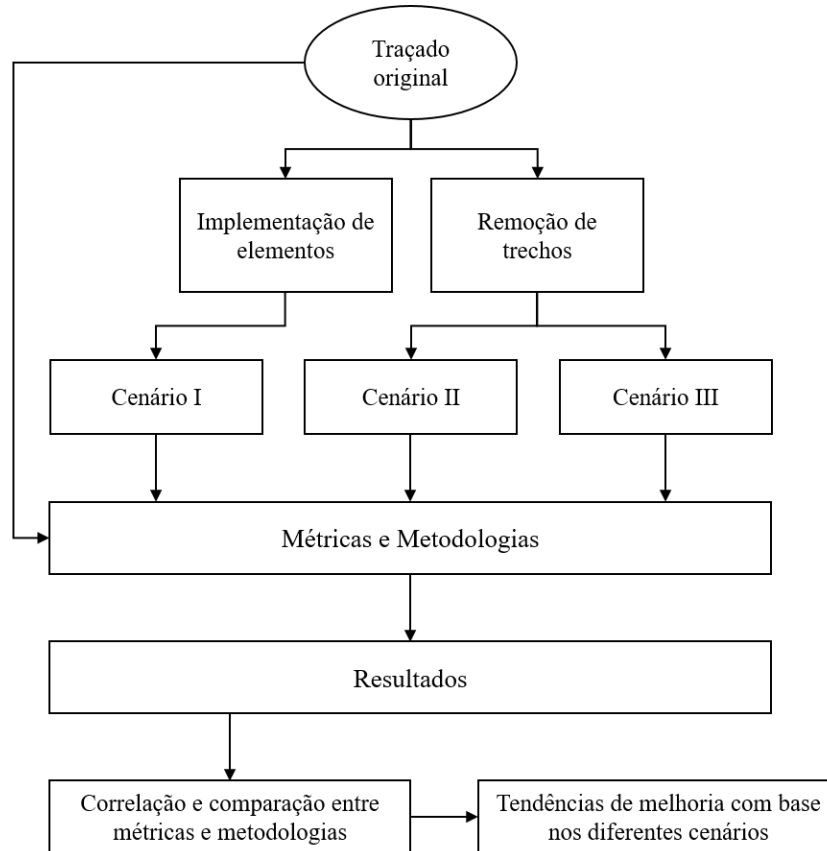
No entanto, vale ressaltar que os estudos acerca da utilização de métricas topológicas em análises de resiliência de redes de abastecimento ainda são consideravelmente menores que estudos que se utilizam estritamente de abordagens hidráulicas, fato que mantém em discussão ainda muitas das correlações entre métrica e resiliência (SHUANG; LIU; PORSE, 2019).

Por fim, há também de se considerar a necessidade de esforços no sentido de integração dessas diferentes abordagens para concepção da resiliência tanto de uma forma dinâmica e que corresponda tanto às condições existentes na própria rede como as condições em seu entorno (e.g., capacidade do corpo técnico operacional, infraestrutura, objetivos de planejamento, etc.). Além disso, cabe ressaltar a problemática das perdas de água tão comuns e expressivas pelas redes de abastecimento brasileiras, sendo que a consideração desse problema aos esforços relacionados de aumento da resiliência, certamente terá potencial ainda mais benéfico ao abastecimento de água com mais qualidade e eficiência.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a ilustrar de maneira simples o processo de execução da metodologia do presente estudo, a Figura 15, abaixo, traz um fluxograma indicando tanto das diferentes interferências (i.e., cenários) ao qual o modelo numérico da rede será submetido como o tratamento, através de correlação de dados, que serão feitos sobre os resultados obtidos.

Figura 15 – Fluxograma de aplicação dos cenários.



Fonte: Autor (2022)

É oportuno destacar que além do protocolo de procedimentos expresso na Figura 15, a discussão dos resultados, de modo a permitir o enriquecimento da análise, trazem abordagens paralelas que não se restringem somente à análise correlativa dos dados aferidos. A exemplo disso, destacam-se as observações realizadas afim de observar eventuais relações entre grau de nós e vazões ocorrentes nos trechos. Para tal, primeiramente foram calculados pesos para os trechos ( $km_{ij}$ ) baseados na soma do grau de seu nó de montante ( $k_i$ ) e nó de jusante ( $k_j$ ) e, por conseguinte uma análise posterior determinando o produto do peso  $Km_{ij}$  de cada trecho pela vazão média diária encontrada no respectivo trecho ( $qm_{ij}$ ).

A análise dos resultados contou também com a verificação de potenciais equívocos em virtude de observar principalmente instantes de mínima e máxima demanda, o coeficiente de variação (CV), disposto na Equação (15, resume-se na razão entre o desvio padrão ( $\sigma$ ) pela média ( $\mu$ ), foi determinado para todos instantes do dia afim de verificar eventuais resultados anômalos.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (15)$$

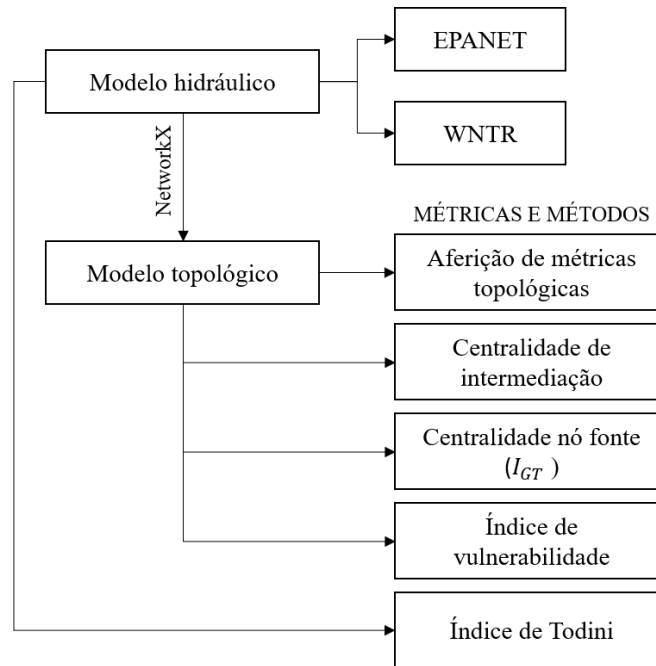
O setor estudado corresponde a uma parte de um sistema real, atualmente em operação, para o qual é completada a interpretação e construção de um modelo topológico a partir de um modelo hidráulico. Com ele, é possível a caracterização topológica da rede e a aplicação das principais metodologias de medição de resiliência encontradas na literatura e interpretadas como as mais adequadas. Alterações que envolvem mudanças na configuração da rede são então simuladas, criando os diferentes cenários de análise, e os indicadores são novamente avaliados. Os resultados são então avaliados para conhecer o grau de correlação entre os indicadores, sua variabilidade nos diferentes cenários, e demais análises possíveis em relação à resiliência da rede. Todos esses passos são detalhados no capítulo a seguir, onde é apresentada a metodologia utilizada para o estudo de caso.

#### 4.1 AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA

Mugume et al. (2015) foi um dos pioneiros na utilização da curva de performance para análise de redes de drenagem urbana e destaca a capacidade do método em alternar da aferição de probabilidade de falha, para avaliação do efeito da ocorrência de diferentes tipos de falha e sua respectiva extensão, independentemente da sua probabilidade de ocorrência.

Para facilitar a compreensão em relação aos procedimentos a serem realizados, a Figura 16, abaixo, elenca o fluxograma com as métricas e métodos e seus respectivos modelos de base.

Figura 16 – Fluxograma de modelos e métricas.



Fonte: Autor (2022)

Como é possível observar na Figura 16, o modelo hidráulico da rede é modelado e interpretado através de duas ferramentas. Primeiramente o software EPANET 2.0 (Item 4.2.1), amplamente utilizado na modelagem de redes de distribuição de água por sua capacidade de cálculo e representação de diversos componentes da rede como bombas, reservatórios e entre outros. Já o pacote WNTR (Item 4.2.2) trata-se de uma biblioteca em linguagem Python para modelagem hidráulica de redes de abastecimento de água, capacidade de interpretação de modelos em EPANET e ferramenta principal na leitura e interpretação para aspectos matemáticos e topológicos dos componentes, valores e resultados de simulação hidráulica da rede.

As metodologias ou indicadores foram escolhidos por sua simplicidade de forma de aplicação, clareza metodológica, relevância na área, e baixo custo computacional. Tais critérios foram adotados tanto com relação à possibilidade de construção de uma discussão mais rica sobre os resultados, como pela maior facilidade que tais métodos teriam, caso comprovada sua capacidade e correlação com condições de resiliência por estudos futuros, de serem aportados às práticas técnicas de planejamento e operação por concessionárias de saneamento.

#### 4.1.1 Índice de Resiliência de Todini ( $I_r$ )

O Índice de Resiliência de Todini foi selecionado para ser base de comparação para os demais índices escolhidos, visto que é um índice bastante utilizado e serviu de base para criação de outras metodologias (e.g., JAYARAM; SRINIVASAN, 2008; PRASAD; HONG; PARK, 2003; RAAD; SINSKE; VAN VUUREN, 2010). Também é um dos métodos implementados no pacote WNTR, o que facilita a aplicação desta métrica para o estudo de caso.

A metodologia de Todini não considera aspectos topológicos da rede e fundamenta-se no excedente energético na rede. Tal premissa é justificada pelo efeito que falhas ou aumentos de demanda têm no aumento do consumo de energia na rede, logo, a não previsão de excedentes de pressão tender a tornar inevitável o desabastecimento, e conseqüentemente comprometer a capacidade do sistema em superar eventos disruptivos (TODINI, 2000).

O autor propõe o índice de resiliência ( $I_r$ ) descrito abaixo pela Equação (16, onde o numerador corresponde a energia dispendida em cada nó  $i$  para satisfazer sua demanda ( $q_i^*$ ) considerando a diferença entre a pressão existente ( $h_i$ ) e a pressão mínima para o abastecimento ( $h_i^*$ ) do nó.

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{n_r} Q_k H_k + \sum_{j=1}^{n_p} (P_j / \gamma) - \sum_{i=1}^{n_n} q_i^* h_i^*} \quad (16)$$

O denominador da Equação (16, por sua vez, é composto pela diferença entre a energia disponibilizada por cada reservatório  $k$  da rede representado pela razão entre sua vazão ( $Q_k$ ) e carga hidráulica ( $H_k$ ), e a energia requerida por cada nó da rede para o suprimento da demanda e pressão. No caso de eventual existência de bombeamento despendendo energia ao sistema, adiciona-se à Equação (16, o somatório das suas cargas de pressão no qual  $P_j$  representa a energia incrementada por uma bomba  $j$  dividido pelo peso específico da água ( $\gamma$ ). É importante salientar que, para o presente estudo, a rede de distribuição de água analisada não apresenta conjunto (s) de bombeamento ou booster, e, portanto, o termo  $P_j$  não é considerado nos cálculos.

Partindo das proposições do método recém descritas, o autor também propões à análise a aferição de um índice de falha ( $I_f$ ):



$$I_f = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} I_{fi}}{\sum_{i=1}^{n_n} q_i^* h_i^*} \quad I_{fi} = \begin{cases} 0 & \forall i: h_i \geq h_i^* \\ q_i^*(h_i - h_i^*) & \forall i: h_i < h_i^* \end{cases} \quad (17)$$

Na Equação (17), acima, o índice de falha ( $I_f$ ) é composto pela razão entre o índice de falha em cada nó ( $I_{fi}$ ), sendo que o mesmo é considerado quando a condição entre as pressões existente é menor que a mínima desejável, e a energia mínima esperada no nó. Apesar de uma adequação simples para verificação de pontos com potencial vulnerabilidade com base exclusivamente em aspectos energéticos da rede. O índice de falha constitui uma adequação simples para verificação de pontos com potencial vulnerabilidade com base exclusivamente em aspectos energéticos da rede (TODINI, 2000).

No presente trabalho, o Índice de Resiliência de Todini será aplicado tanto no sentido de parâmetro comparativo com os demais métodos cujo fundamento é topológico, como para determinação de cenários de implementação de falhas e alterações para a análise.

#### 4.1.2 Centralidade de intermediação

Para conceituar a metodologia desenvolvida por Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017), primeiramente, é importante destacar o que levou os autores até a proposição desta metodologia. Agathokleous e Christodoulou (2016) analisaram dados históricos de cerca de sete anos (2003-2010) de operação de uma rede de distribuição intermitente observando a taxa de ocorrência de falhas em tubulações antes, durante e após períodos de intermitência. O caso estudado averiguou uma política estratégica de racionamento, que por sua vez propunha racionamento de 12 horas para cada setor da rede, com o objetivo de averiguar tanto as diferenças de consumo, perdas e possíveis correlações com falhas de tubulações e a aplicação das políticas de racionamento. De acordo com análises de sobrevida sobre a ocorrência de falhas nas tubulações, houve significativo incremento de probabilidade de falha principalmente em tubulações de diâmetro maior.

A partir do modelo topológico da rede aferido, a matriz de adjacência da rede foi determinada, bem como a centralidade média dos nós da rede sem sobreposição de pesos com a vazão nos trechos.

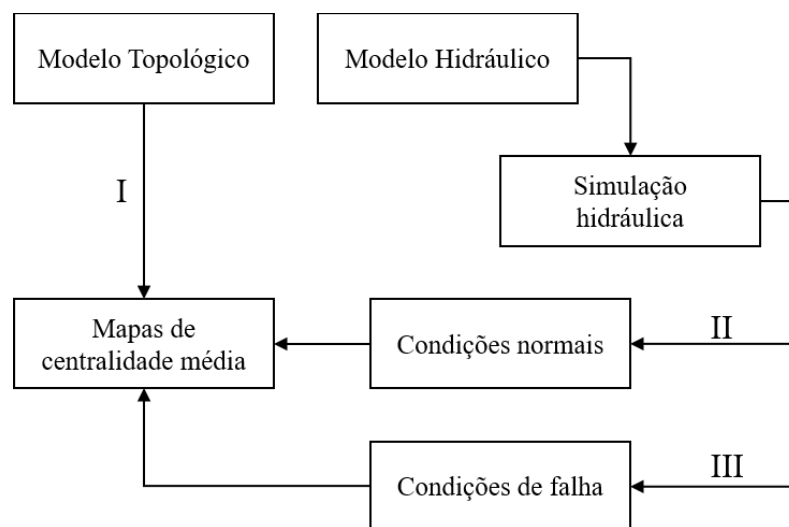
I Análise topológica da centralidade média dos nós da rede e plotagem do mapa de centralidade média basilar do modelo.

II Simulação hidráulica do modelo sob condições contínuas e normais de abastecimento. Seguido pela aquisição dos dados de vazão nos trechos no instante de maior vazão para posterior agregação desses valores como pesos de trechos em modelo topológico para aferição da centralidade média com base na vazão dos trechos.

III Simulação hidráulica do modelo sob condições anormais de abastecimento. Seguido pela aquisição dos dados de vazão nos trechos no instante de maior vazão para posterior agregação desses valores como pesos de trechos em modelo topológico para aferição da centralidade média com base na vazão dos trechos.

Na Figura 17, abaixo, estão descritos os procedimentos utilizados pelo método interpretação da centralidade média associada à diferentes condições de abastecimento (II e III) e a centralidade média do modelo topológico sem nenhuma associação (I).

Figura 17 – Fluxograma de implementação do procedimento de centralidade média ponderada



Fonte: Autor (2022)

Para o cenário de racionamento e abastecimento intermitente da rede, o autor subdividiu o setor estudado em quatro diferentes áreas, cada uma com abastecimento de 12 horas a cada 48 horas. Ao longo dessa operação, a formatação da dinâmica do abastecimento sofreu alterações bem como a centralidade média dos nós. Ainda com aplicação de um histórico de incidentes de falhas (i.e., vazamentos) no setor em estudo, permitiu à averiguação da distribuição espacial e a correlação destes incidentes, assim como sua alteração ao longo da

alteração da operação da rede em situação de intermitência (AGATHOKLEOUS; CHRISTODOULOU; CHRISTODOULOU, 2017b). No presente trabalho, em virtude das nuances da rede em estudo, tanto os cenários de falha como a concepção de diferentes condições de operação serão elaboradas a partir, principalmente da caracterização topológica da rede e de suas condições hidráulicas.

É interessante apontar que a metodologia em questão, postulada por observações de Agathokleous; Christodolou e Christodoulou (2017b), também adere a análises de correlação espacial com o histórico de localização de eventos de vazamento ao longo da rede com a centralidade ponderada de intermediação tendo obtido uma significativa correlação entre ambos dados (i.e., aleatoriedade abaixo de 3 % para condição contínua e 1 % para operação intermitente).

Possíveis observações da métrica com eventuais trabalhos que tenham aplicado a métrica são limitadas, tendo em vista que, pela análise cienciométrica inicialmente apresentada, uma relativa considerável quantidade de publicações acadêmicas (e.g., ALBARAKATI; TASSADDIQ; KALE, 2021; ASSAD; BOUFERGUENE, 2022; DI NARDO et al., 2018b; GIUDICIANNI et al., 2021; IZADI; YAZDANDOOST; RANJBAR, 2020; MAIOLO et al., 2018; MENG et al., 2018; SHUANG; LIU; PORSE, 2019; SIMONE; DI CRISTO; GIUSTOLISI, 2022; WÉBER; HUZSVÁR; HŐS, 2023; ZARGHAMI; GUNAWAN, 2019, etc.) fazem menção ao método e a aplicação do autor porém não foram encontradas publicações que efetivamente lançassem mão da técnica.

As premissas que impeliram a constituição do método de centralidade de intermediação fundaram-se na capacidade de determinação de regiões de maior vulnerabilidade topológica na rede em um curto período de tempo, sem a necessidade de profundas inferências teóricas ou manejo extensivo de dados para além das interpretações topológicas e hidráulicas básicas (AGATHOKLEOUS; CHRISTODOULOU; CHRISTODOULOU, 2017a).

### 4.1.3 Índice de resiliência por centralidade média do nó com a fonte ( $I_{GT}$ )

Desenvolvido por Herrera; Abraham e Stoianov (2016), a metodologia propõe uma adaptação da métrica de comprimento médio dos trechos através da aferição dos caminhos mais curtos entre os nós até a fonte tanto em um setor de uma rede de abastecimento de água como em uma rede com diferentes setores de abastecimento. Assim o autor estabeleceu procedimento para aferição da resiliência tanto em um setor isolado da rede como para a rede de abastecimento como um todo utilizando-se tanto da centralidade média dos nós para com a fonte como do fator de atrito dos trechos que compõe o caminho mais curto até o reservatório.

$$I_{GT}(i) = \sum_{s=1}^S \left( \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{r(k,s)} \right) \quad (18)$$

Na Equação (16, acima, é descrito o cálculo de aferição de resiliência da rede para um nó  $i$  da rede em relação à uma ou mais fontes  $S$  e número de trechos do caminho mais curto  $K$  até a fonte. Na Equação (19, abaixo,  $r(k,s)$  representa a estimativa da perda de energia do caminho mais curto  $k$  com  $M$  trechos até o reservatório, pela inserção do fator de atrito  $f(m)$  para cada trecho de comprimento  $L_m$  e diâmetro do conduto  $D_m$  (CHRISTENSEN, 2009, apud HERRERA; ABRAHAM; STOIANOV, 2016).

$$r(k,s) = \sum_{m=1}^M f(m) \frac{L_m}{D_m} \quad (19)$$

A aferição de todos os caminhos possíveis entre os nós e a(s) fonte(s) é matemática e computacionalmente custoso. Como alternativa, a abordagem adota a metodologia de determinação dos caminhos mais curtos como uma solução viável. Ou seja, do ponto de vista hidrodinâmico, dos caminhos cuja perda energética tenderá à menor resistência (Equação (19). Herrera; Abraham e Stoianov (2016) ainda realiza análise para validação de seu método através da aplicação na rede C-Town (OSTFELD et al., 2012) e utiliza um princípio intitulado como nós de transferência crítica.

Tal princípio tem por premissa a identificação topológica dos nós, com a consideração de seu fluxo, cuja importância na distribuição é consideravelmente alta, sendo considerados, num primeiro momento, aqueles pertencentes as tubulações tronco da rede e nós com grande centralidade (HERRERA; ABRAHAM; STOIANOV, 2016). A Equação (20, abaixo, apresenta

a equação proposta pelo autor para validação de seu método, sendo essencialmente o inverso da equação de resistência de suprimento em cada trecho do caminho mais curto (Equação (19)).

$$g(K: i, s) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{r(k)} \quad (20)$$

Herrera; Abraham e Stoianov (2016) ainda utilizou a variação do número de trechos  $K$  ( $K+1$ ) para verificação da variação da centralidade entre dois nós, sendo um deles pertencentes aos nós de maior centralidade média da rede. Tal aplicação permitiu a observação de que a diferença (i.e.,  $g(K+1) - g(K)$ ) tinha variação significativa conforme  $K$  tendia à um e menores variações dessa diferença em valores de  $K$  maiores que 30.

Determinar tal comportamento entre diferença de nós e incremento ao número de caminhos mais curtos ( $K$ ) tem como principais vantagens: a consideração da existência, mesmo que não computados de maneira mais precisa, de caminhos alternativos entre cada nó ao nó fonte; ao passo em há um aumento do número de trechos, verifica-se a diminuição da diferença entre os valores entre os nós com maior e menor centralidade comparados (HERRERA; ABRAHAM; STOIANOV, 2016).

#### 4.1.4 Índice de vulnerabilidade por entropia (VIE)

Partindo do caráter indissociável da vulnerabilidade para com a resiliência, Zarghami; Gunawan e Schultmann (2018b) realizaram uma interessante abordagem da importância da centralidade média na análise topológica de vulnerabilidade em redes de abastecimento de água. A partir da aferição da centralidade por meio da Equação (11 (Item 3.10.1.8), os autores utilizaram-se da aferição da entropia de Shannon (Equação (21) para a realização do ranqueamento e averiguação da centralidade média dos nós da rede.

$$H = - \sum_{i=1}^{n_d} PC_B(i) \log_2 PC_B(i) \quad (21)$$

Na Equação (21, que descreve a constituição essencial da entropia de Shannon, o termo  $H$  corresponde ao valor de entropia do conjunto de informações,  $PC_B(i)$  é o valor normalizado

da centralidade média resultante da Equação (11, sendo interpretado como a probabilidade associada ao elemento  $i$ ,  $n_d$  corresponde ao número de possíveis resultados.

Recapitulando o conceito básico de centralidade média sobre a interpretação da relativa importância de um nó sobre outros com base na frequência que o mesmo é parte do caminho mais curto entre dois outros quaisquer nós da rede. Tomando-se a mesma como parâmetro para aferição da entropia do sistema ( $H_c$ ) pela Equação (21, o autor propõe o parâmetro para estimativa da máxima entropia de um sistema com  $n_d$  (número de nós).

$$H_{c,max} = \log_2 n_d \quad (22)$$

A Equação (22 é proveniente do princípio da entropia de Shannon de que em uma dada rede, a entropia das trocas entre os vértices tenderá a ser máxima quando todos vértices tenderem à probabilidades iguais de receberem informações (SHANNON, 1948). Logo, de maneira análoga, tal conceito pode ser extrapolado para a análise de redes de abastecimento de água e centralidade média, com essa servindo de parâmetro de análise da entropia do sistema como feito por Singh e Oh (2015) e Zarghami; Gunawan e Schultmann (2018b).

Com base em preceitos expostos por Singh (2013) acerca da aferição da vulnerabilidade para análises de risco utilizando princípios de entropia, Zarghami; Gunawan e Schultmann (2018b) propõe um índice de vulnerabilidade ( $VI_E$ ), descrito na Equação (23, abaixo, para redes de abastecimento de água.

$$VI_E = 1 - \frac{H_c}{H_{c,max}} \quad (23)$$

Os resultados do índice se estabelecem entre 0 e 1, sendo que ao se aproximar de 1, indicam aumento das discrepâncias de centralidade média entre os nós da rede, tornando-a mais suscetível ao desabastecimento em caso de falha (i.e., principalmente nos nós de maior centralidade). Por outro lado, valores de  $VI_E$  tendendo a 0, expressam maior homogeneidade em termos de distribuição da centralidade ao longo dos vértices sugerindo uma possível maior robustez do abastecimento ao longo da rede (ZARGHAMI; GUNAWAN; SCHULTMANN, 2018b).

Portanto, partindo dos pressupostos postulados acima e reiterando a condição indissociável da resiliência com suas variantes, condições para mitigação da magnitude de eventos de falha na rede estariam relacionadas tanto a dispersão espacial como com a disparidade dos valores de centralidade média ao longo dos nós da rede. Essa observação, pode

ser pouco associável, a priori, com os princípios da entropia de Shannon, que, por sua vez, é caracterizada por uma função decrescente do conjunto de dados obtendo seu valor máximo quando todos valores imputados são igualmente de mesmo valor (MASZCZYK; DUCH, 2008, apud ZARGHAMI; GUNAWAN; SCHULTMANN, 2018b).

## 4.2 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

### 4.2.1 EPANET

O programa EPANET é um software de domínio público com capacidade para realização de simulações hidráulicas e de qualidade da água em redes de abastecimento de água sob períodos estendidos. Compreendendo-se com isso a possibilidade de inclusão de mudanças no controle dos elementos sob simulação (e.g., alterações em status de válvulas, tubulações, bombas e reservatórios a partir de controles e padrões). Além disso há a possibilidade de extração dos dados e resultados da rede em diferentes formatos, como relatórios, gráficos do comportamento hidráulico ou de qualidade em um ou mais elementos ao longo do tempo, bem como a visualização e modificação do traçado dos elementos da rede (ROSSMAN et al., 2020).

O software foi desenvolvido inicialmente por Rossman e Van Zyl (2010) com suporte da U.S. Environmental Protection Agency (EPA) no National Risk Management Research Laboratory, principal unidade da EPA responsável pela exploração e desenvolvimento de técnicas e metodologias de gestão da redução de riscos associados à saúde humana e ambiental. No Brasil, o Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) realizou tanto a tradução como o incremento de capacidade de modelagem de dimensionamento econômico de redes (Lenhsnet) (GOMES et al., 2020). No presente estudo, a versão utilizada do software foi a EPANET 2.0 Brasil que conta com as implementações feitas pelo LENHS em seu build 2.00.12.

A modelagem hidráulica implementada no EPANET é fundamentada no princípio de balanço hidráulico da rede, que envolve, em suma, a resolução da equação de conservação de massa para cada nó e a relação de cargas hidráulicas e perdas de carga entre os trechos. A execução da simulação é possível por meio de duas formas: modelagem orientada pela

demanda, que se baseia no princípio de satisfação de demanda independentemente dos resultados de pressão e vazão que são gerados pela modelagem, sendo essa uma alternativa clássica, porém passível de resultados com pressões negativas e não factíveis; outra abordagem é a modelagem orientada por pressões, que por sua vez considera a pressão ocorrente nos nós como dependente ao suprimento da demanda, sendo a principal alternativa diante da menor aproximação da realidade do primeiro método (ROSSMAN et al., 2020). Todas modelagens e simulações hidráulicas realizadas no modelo estudado foram de caráter pressão-demanda dependentes (WAGNER; SHAMIR; MARKS, 1988).

#### **4.2.2 Pacote WINTER/EPA (Water Network Tool for Resilience)**

O pacote WINTER ou WNTR, também desenvolvido pela EPA, trata-se de um pacote para linguagem Python para execução de simulações e análises de determinados aspectos da resiliência em redes de abastecimento de água. O pacote possui um conjunto de ferramentas que permitem a geração de modelos de redes de água tanto por input direto de dados como pela leitura de arquivos de redes na extensão .INP (EPANET). Além disso, é possível a realização de modificações na estrutura e operação da rede; adição de eventos disruptivos e estratégias de resposta e mitigação; realização de simulações hidráulicas e de qualidade da água; execução de simulações probabilísticas; computo da resiliência com base em aspectos topológicos, hidráulicos, de qualidade da água e/ou métricas econômicas; bem como também a geração de gráficos e plotagem da rede (KLISE et al., 2020). No presente estudo, utilizou-se a versão 0.4.2 do pacote WNTR.

##### *4.2.2.1 Métricas de resiliência inseridas no pacote*

Das métricas hidráulicas encontradas no pacote WINTER para avaliação da resiliência o índice de Todini (TODINI, 2000) e uma de suas principais modificações, realizada por Jayaram e Srinivasan (2008) fazem parte do conjunto de ferramentas. O pacote possui capacidade para: geração de modelos de redes a partir da inserção de nós e trechos, sua



modificação estrutural e de operação; adição de eventos disruptivos (e.g., dano à reservatório, válvulas, bombas, vazamentos, desabastecimento de energia, injeção de contaminantes e mudanças ambientais); adição de estratégias de resposta e mitigação de impactos; simulação hidráulica e de qualidade; realização de análises probabilísticas; computo da resiliência pelos métodos incrementados; análise dos resultados e geração de gráficos (KLISE et al., 2020).

Outras métricas associadas ao pacote partem de premissas apresentadas por Ostfeld; Kogan e Shamir (2002) em sua análise de confiabilidade da rede. Sendo esses compreendidos por:

- 5 **Pressão:** determinação do número de nós abaixo ou acima de uma determinada pressão ao longo do tempo;
- 6 **Demanda:** determinação do número de nós abaixo ou acima de uma determinada demanda ao longo do tempo;
- 7 **Disponibilidade de serviço:** métrica baseada na razão entre demanda servida e demanda esperada;
- 8 **Entropia:** concebida como uma métrica de incertezas, pode ser utilizada para averiguação para aferição de caminhos alternativos em cenários de falha de componentes;
- 9 **Demanda esperada:** é essencialmente a demanda de cada nó em um determinado espaço temporal considerando a demanda dada ao nó, o padrão de demanda e fatores de multiplicação. Da mesma forma é obtida a **demanda média esperada** de cada nó por dia.
- 10 **População impactada:** esse elemento é uma componente interessante do pacote pois ela permite a estimativa da quantidade de pessoas afetadas por um determinado evento de deterioração do abastecimento na rede. Tal resolução é feita a partir da inserção de um volume de consumo médio per capita diário.

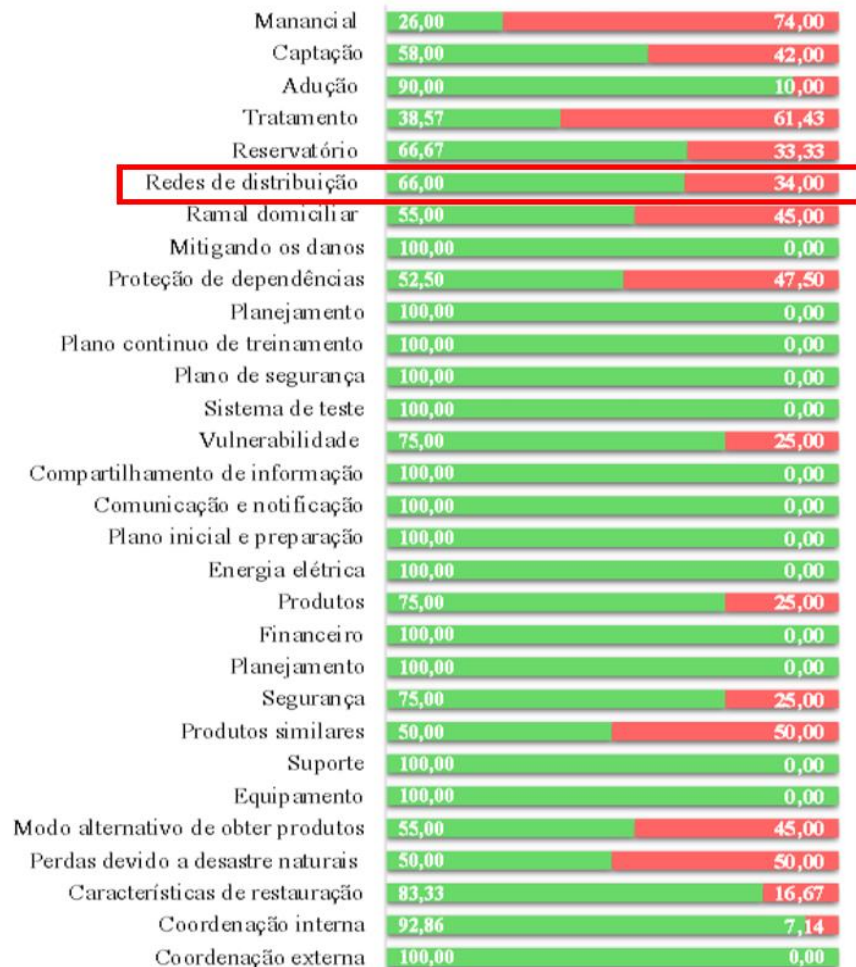
É evidente que o pacote em questão é uma ferramenta de grande relevância e avanço no tema, principalmente ao incorporar, até o momento, as técnicas mais consolidadas no meio científico. Contudo é importante salientar que, mesmo com significativos avanços das fronteiras científicas acerca do tema, ainda é considerável o caminho à ser trilhado tanto no aperfeiçoamento e criação de novas abordagens e estratégias, bem como na consolidação de tais práticas pelo corpo técnico responsável pelas redes de abastecimento, e, principalmente, no aporte do conhecimento e expertise desses no refinamento das metodologias.

## 10.1 ESTUDO DE CASO: SETOR MARTINEZ – ARARAQUARA/SP

### 10.1.1 Estudo de caso do sistema de abastecimento de Araraquara acerca de sua resiliência frente às mudanças climáticas.

Arenales (2019) adaptou o modelo ANLRI (Argonne National Laboratory Resilience Index) ao serviço de abastecimento de água no município de Araraquara/SP considerando a resiliência da autarquia e sua infraestrutura em cenários de seca, e, através da aplicação de questionários e do cálculo da resiliência relativa da autarquia em quatro níveis de detalhamento. Na Figura 18, é possível observar os percentuais de relevância (i.e., positivos em verde e negativos em vermelho) de cada um dos variados componentes no abastecimento de água.

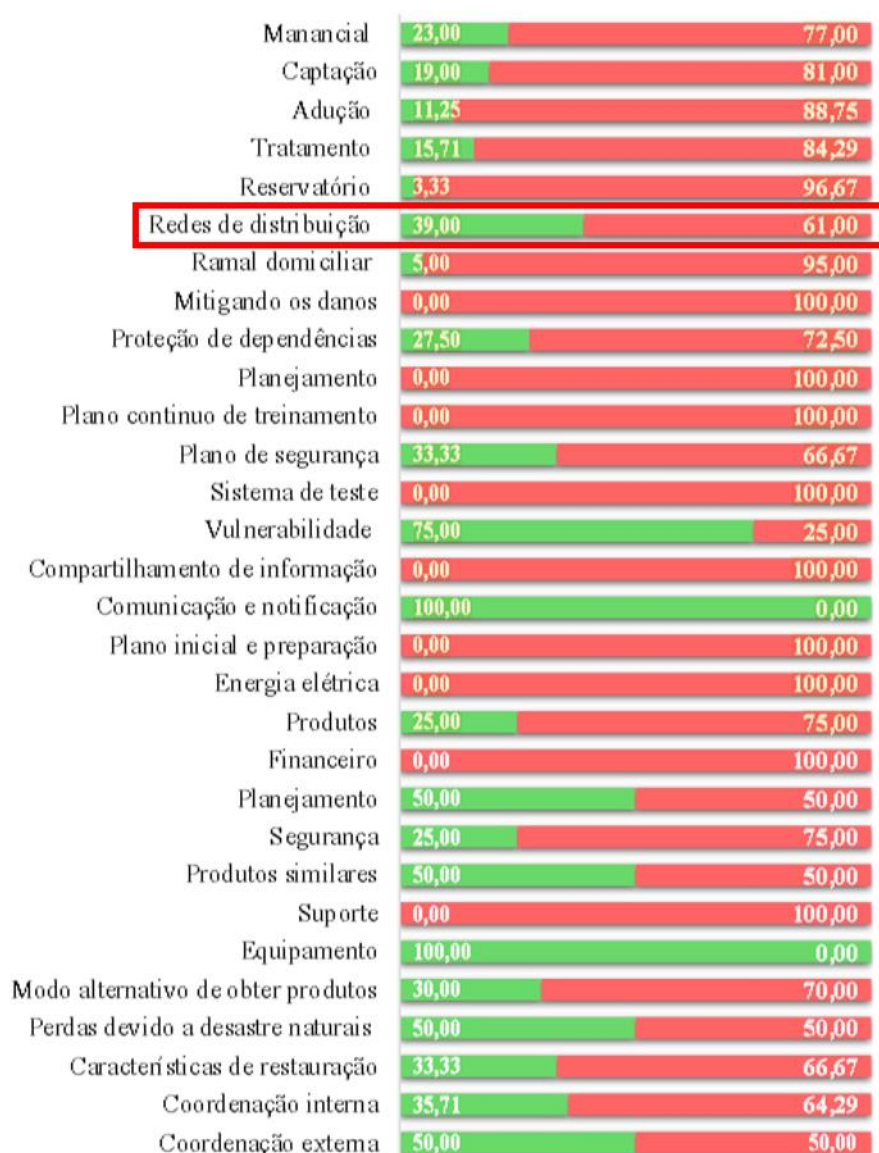
Figura 18 – Relevância percentual dos setores da autarquia de Araraquara/SP.



Fonte: (ARENALES, 2019)

A princípio, é necessário destacar a variedade de esferas das quais todo serviço de abastecimento de água é composto, sendo isso também uma condição que incrementa ainda mais a dificuldade da análise de resiliência. No quesito de rede de distribuição, em destaque na Figura 18, é possível verificar a relevância de 66%, por outro lado, salienta-se também a extrema importância de questões relacionadas à planejamento, comunicação e mitigação de danos. Já para observação do percentual final de resiliência de cada setor observado pela autora, na Figura 19, abaixo, é destacada a listagem com tais setores componentes do sistema.

Figura 19 – Percentual de resiliência dos setores da autarquia de Araraquara/SP



Fonte: (ARENALES, 2019)

No estudo realizado por Arenales (2019), quatro pilares principais foram elencados, sendo eles: pontos críticos à resiliência; princípios da sustentabilidade; políticas nacionais e internacionais e cenários de seca. No método ANRLI, três componentes da resiliência são considerados: robustez, capacidade de superação e recuperação e capacidade para abordagem de cerca de até 1500 variáveis divididas em cinco níveis hierárquicos, havendo também a inserção de pesos, por especialistas, à cada uma destas. O processo de aferição dos dados é realizado através da aplicação de questionários aos operadores da autarquia do município para aferição do nível de resiliência dos sistemas bem como das ações de aprimoramento das condições de resiliência.

Com a aplicação do modelo ANRLI, a autora ainda caracterizou a resiliência de cada um destes setores (Figura 19). Arenales (2019) destaca os fatores para os índices máximos de resiliência nos quesitos de “Equipamentos” e “Comunicação e notificação”, tendo em vista que, respectivamente, há uma contínua manutenção de equipamentos, bem como a existência de equipamentos sobressalentes; ainda, a existência de uma assessoria de comunicação para informar quaisquer problemas ou eventuais períodos de desabastecimento aos consumidores. Com relação à rede de distribuição, o índice de resiliência obtido pela autora foi de 39% obtido através da média ponderada entre o grau de importância de cada uma das perguntas e a resposta dada pela autarquia (Quadro 1).

Quadro 1 – Questões, importância e resposta da autarquia

		Grau de importância da pergunta (0 a 10)*	Realizam tais ações (0 a 1)**
Redes de distribuição	A empresa realiza reparos proativos?	5	1
	Possui um plano de controle sobre as perdas de água distribuída?	5	1
	Existe o monitoramento da pressão?	5	1
	É possível manter a pressão constante durante um evento extremo?	9	0,5
	Possui mais de um tipo de fonte de energia? (e.g. solar, biogás)	9	0

\* Sendo 0 nenhuma importância e 10 muita importância.

\*\* Sendo 0 não se realiza nenhuma ação e 1 realizam-se todas ações.

Adaptado de: (ARENALES, 2019)

Ainda acerca do Quadro 1, é importante o destaque para o fato de que em relação à existência de um plano de controle de perdas e monitoramento de pressões, ambas atendidas pelas autarquia e importante fonte de dados para aplicação de metodologias de determinação de resiliência atreladas à rede em si.

Como resiliência final, a autarquia do serviço de abastecimento de água de Araraquara/SP apresentou uma resiliência geral de 24,84%. A autora ainda reforça a importância da singularidade da aplicação do método, ou seja, para sua implementação e aferição da resiliência do sistema, há de haver adaptabilidade, principalmente dos questionários, para a realidade em questão (ARENALES, 2019). Portanto, esforços no sentido de avaliação e determinação de outros modelos e técnicas que tragam luz à elementos e/ou condições porventura existentes em nível de infraestrutura da rede e/ou setores de abastecimento de água, são ferramentas complementares de grande importância e que certamente auxiliariam no trabalho desenvolvido pela autarquia de Araraquara/SP.

### **10.1.2 Local do estudo**

O município de Araraquara/SP é um município brasileiro do interior do estado de São Paulo situado na região central desse estado. Localiza-se a 21° 47'40'' de latitude sul e 48° 10'32'' de longitude oeste e uma altitude de 664 metros. Possui uma estimativa populacional para o ano de 2021 de cerca de 240.542 habitantes (IBGE, 2021; PMA; WALM, 2014).

O DAAE (Departamento Autônomo de Água e Esgotos) de Araraquara é a autarquia responsável pela prestação dos serviços do sistema de abastecimento de água da captação à distribuição, bem como da coleta e tratamento de esgoto, resíduos sólidos e limpeza urbana. O município é abastecido por um sistema misto entre mananciais superficiais e subterrâneos. Já o sistema de distribuição de água da zona urbana possui cerca de 1.062 Km de extensão (PMA; WALM, 2014).

A reservação da água é feita por cerca de 38 reservatórios que juntos somam cerca de 60.000 m<sup>3</sup> de capacidade de reservação. O atendimento da rede urbana é de praticamente 100% com cerca de 80.000 ligações, espalhadas em 19 setores (PMA; WALM, 2014). Para o estudo de caso foi selecionado um dos setores da rede, localizado na área central do município e denominado Martinez, com área de aproximadamente 2,75 km<sup>2</sup> e mais de 6000 ligações, das quais aproximadamente 90% são residenciais. A água de um único poço é impulsionada por uma bomba vertical tipo turbina através de uma tubulação de 250 mm por aproximadamente 850 m, até os reservatórios.

O setor é abastecido por dois reservatórios apoiados interligados, com capacidade combinada de 2800 m<sup>3</sup>, cota de fundo 679,75 m e cota do nível d'água máximo de 683,95 m. As diferenças de cota entre nós do setor superam os 50 m. A rede de distribuição conta com aproximadamente 57 km de tubulação, principalmente de PVC, de diâmetros desde 50 mm até 250 mm, com alguns trechos de diâmetros maiores. Os trechos mais antigos da rede, com mais de 20 anos, são de ferro fundido, e em recentes substituições foram comprovadas incrustações que reduzem a área útil das tubulações (PMA; WALM, 2014).

O Plano Municipal de Saneamento Básico de Araraquara (PMA; WALM, 2014) ressalta também a intuito por parte do DAAE em realizar a correção de falhas existentes na rede de distribuição e sua setorização afim de melhorar as condições do sistema em casos de eventuais manobras e controle do consumo. É intento da autarquia também a implementação de micro setorização para melhora no gerenciamento pelo setor de engenharia. Convenientemente destaca-se aqui a contribuição do presente estudo ao acervo de esforços já realizados e futuros que vão de encontro a tais anseios da autarquia responsável pela rede.

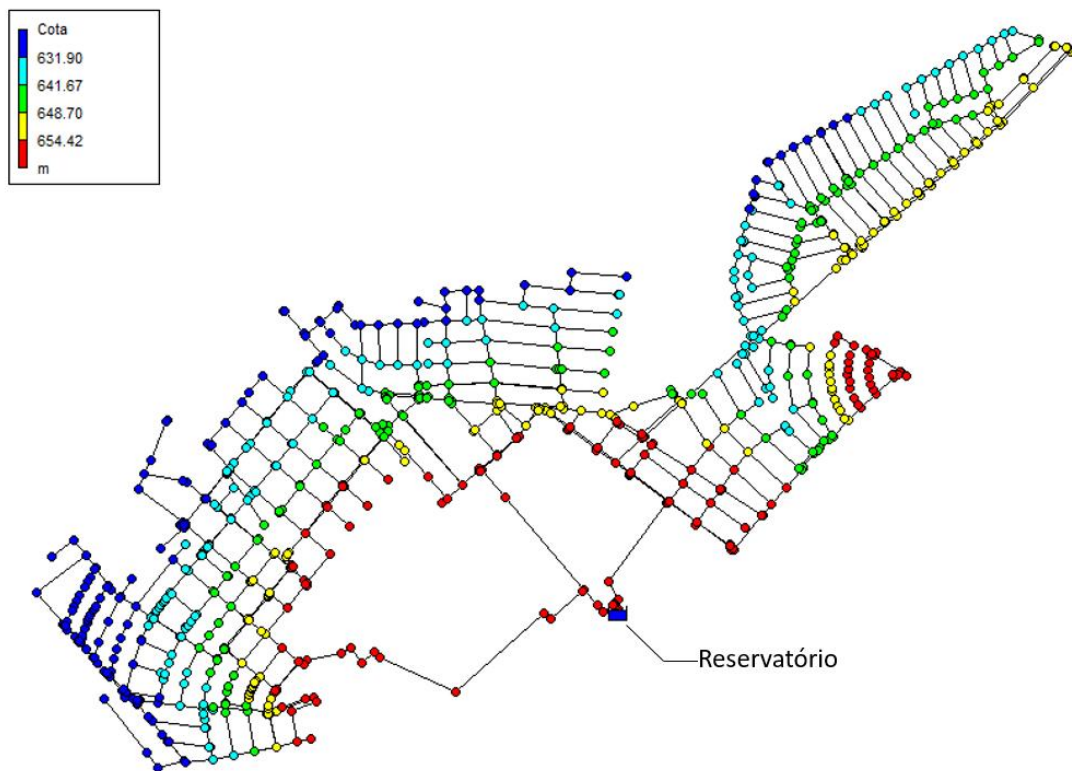
### **10.1.3 Modelo hidráulico**

O modelo hidráulico da rede de abastecimento do setor considerado está construído no EPANET e conta com a distribuição espacial dos nós e trechos com suas respectivas demandas, cotas, padrão de consumo, diâmetros e rugosidade. O modelo não conta, no entanto, com a presença de válvulas e o nó de fornecimento é configurado como RNF (Reservatório de Nível Fixo) cujo nível depende de um padrão de variação implementado. A determinação de caracterização de um RNF na alimentação da rede em estudo ser um setor da rede de abastecimento urbano de Araraquara-SP e cujo complexo de reservação que abastece o setor ter suas especificidades e suprir não exclusivamente o setor estudado. Em vista disso, o nível fixado no RNF é referente à pressão média encontrada a montante do conduto de abastecimento com variação descrita na Figura 26 (Item 10.1.3.3).

### 10.1.3.1 Elevação

Na Figura 20, abaixo, o traçado da rede é disposto juntamente com as cotas topográficas associadas a cada nó. As cotas possuem variação entre 678,98 metros (i.e., reservatório) e 607,74 metros, consolidando uma amplitude de aproximadamente 71 metros entre ambas extremidades topográficas.

Figura 20 – Modelo com cotas de nós do setor da rede



Fonte: Autor (2022)

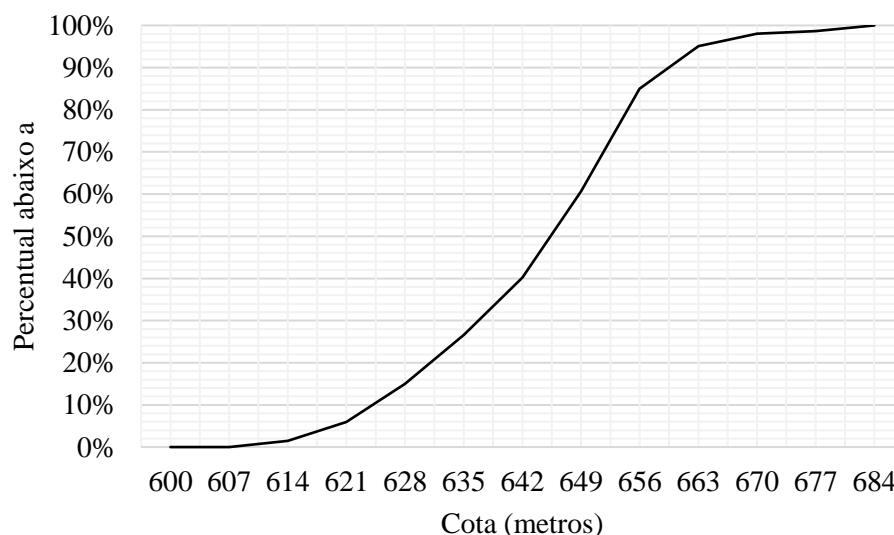
Em princípio, a observância das condições altimétricas expressas na Figura 20 não permite, por exemplo, a determinação de zonas de pressão visto que discrepâncias altimétricas situam-se em torno de 20 metros. Contudo, é importante salientar, como destacado por Azevedo Netto et al. (1998), que as delimitações de zonas de pressão devem manter-se com pressões dinâmicas mínimas entre 10 mca a 50 mca por zona.

Em virtude das diversas nuances a qual as diversas formas de determinação da resiliência estão sujeitas, algumas especificações devem ser destacadas no intuito de detalhar as condições do modelo sobre as quais as análises foram realizadas. O modelo utilizado foi

estruturado partindo de dados (e.g., traçado, nós, pressões, demanda, etc.) obtidos pelo LabSiN (Laboratório de Simulação Numérica) lotado no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e compõe o acervo do mesmo. Cabe destacar também a decisão de não observância do modelo topológico “simplificado”, que pode se estruturar a partir do processo de esqueletização (*skeletonization*, em inglês) e consiste na remoção de elementos de relativa baixa importância para determinados propósitos, como exemplo, trechos de final de rede, podendo ser caracterizados por nós com grau igual a um. Esse procedimento, apesar de viável para simplificação da topologia da rede, em virtude da baixa quantidade de elementos topológicos para a caracterização da rede do presente estudo, o que não torna custoso computacionalmente a manutenção de tais elementos, não foi realizado. Destaca-se, no entanto, que tal procedimento é interessante em casos de redes com quantidades muito grandes de elementos que possam vir a custar computacionalmente, quando não de interesse elementos de final de trecho.

No intuito de realizar um maior detalhamento acerca dessas condições de desnível, o Figura 21, abaixo, apresenta a distribuição de frequência da quantidade de nós por nível topográfico.

Figura 21 – Distribuição de frequências da altimetria dos nós da rede



Fonte: Autor (2022)

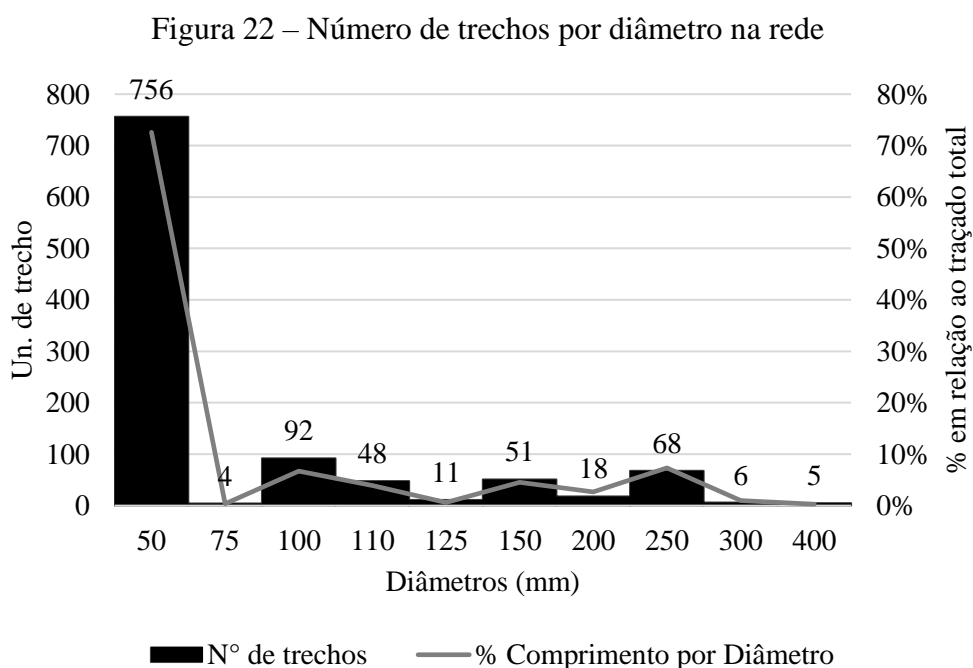
A partir dessa distribuição, observa-se que cerca de 75 % de todos nós da rede se concentram em altitudes entre 632 e 662 metros, enquanto cerca de 20 % e 5 % se concentram abaixo e acima desses limites respectivamente. Tais valores permitem, de maneira parcimoniosa, a existência uma relação adequada de energia topográfica para a distribuição



para grande maioria dos nós da rede. Contudo, tal aspecto é parcial e não possibilita a inferência de pormenores do comportamento hidráulico do modelo.

### 10.1.3.2 Diâmetros

Outro elemento considerado para caracterização do modelo hidráulico foi a quantidade de trechos por diâmetro encontrados na rede. Na Figura 22, abaixo, estão dispostos o número de trechos, bem como o percentual de seu comprimento em relação ao comprimento total do traçado da rede. Justifica-se o computo de tais dados a consideração de eventuais disparidades entre uma possível fragmentação dos trechos do modelo e a real grandeza de comprimento do traçado para cada diâmetro. Logo, o modelo da rede é composto por um total de 57.088,02 metros de traçado e essencialmente de tubulações com diâmetros relativamente pequenos, com cerca de 71 % de seu traçado sendo composto por diâmetros de 50 milímetros.

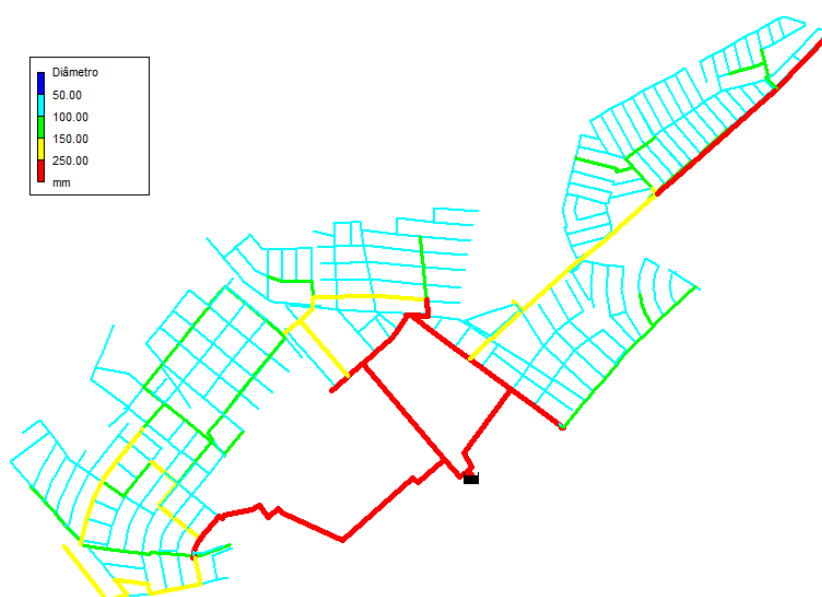


Fonte: Autor (2022)

Na Figura 23, abaixo, é exibido o traçado da rede com os específicos ranges de diâmetros em cada trecho. Na representação abaixo ainda é possível observar que três tubulações tronco realizam a distribuição para diferentes regiões do setor, no entanto é interessante evidenciar a existência da região localizada no quadrante nordeste do modelo cujo

abastecimento se dá por somente uma ligação feita por uma tubulação de 150 mm de diâmetro sucedida por outro traçado de 250 mm de diâmetro. Tal estruturação implica na existência de um gargalo dentro da rede e que, analisados primeiramente por Jacobs e Goulter (1989) e posteriormente por Yazdani e Jeffrey (2012a), aferiram fortes correlações com a vulnerabilidade da rede por sua condição de alta centralidade na rede e cuja desconexão implica em significativa fragmentação da rede.

Figura 23 – Distribuição dos diâmetros das tubulações ao longo da rede



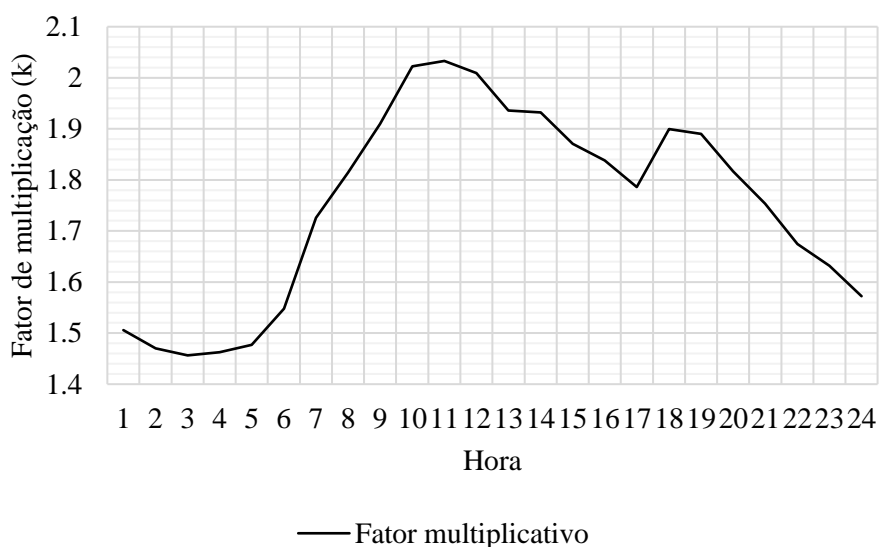
Fonte: Autor (2022)

Jacobs e Goulter (1989) ainda destaca a que a identificação de tais ponto de articulação podem não sempre ser tarefa trivial passíveis de determinação por inspeção visual. Redes com aparente boa redundância podem esconder tais gargalos identificáveis somente com análises mais detalhadas acerca da rede. Dentre as formas de identificação, tanto aspectos hidráulicos como análises de direção de fluxo, o uso de métricas topológicas como de lacuna espectral, cujos valores, quando baixos, tendem a indicar tais condições (ESTRADA, 2006; YAZDANI; OTOO; JEFFREY, 2011).

### 10.1.3.3 Vazões de demanda e pressões

As vazões de demanda da rede são definidas pela variação horária destacada pelo Figura 24, abaixo, sendo que, o pico de consumo ocorre as 11 horas da manhã ( $k = 2,033$ ), enquanto que o menor consumo ao longo do dia ocorre as 3 horas da manhã ( $k = 1,4564$ ).

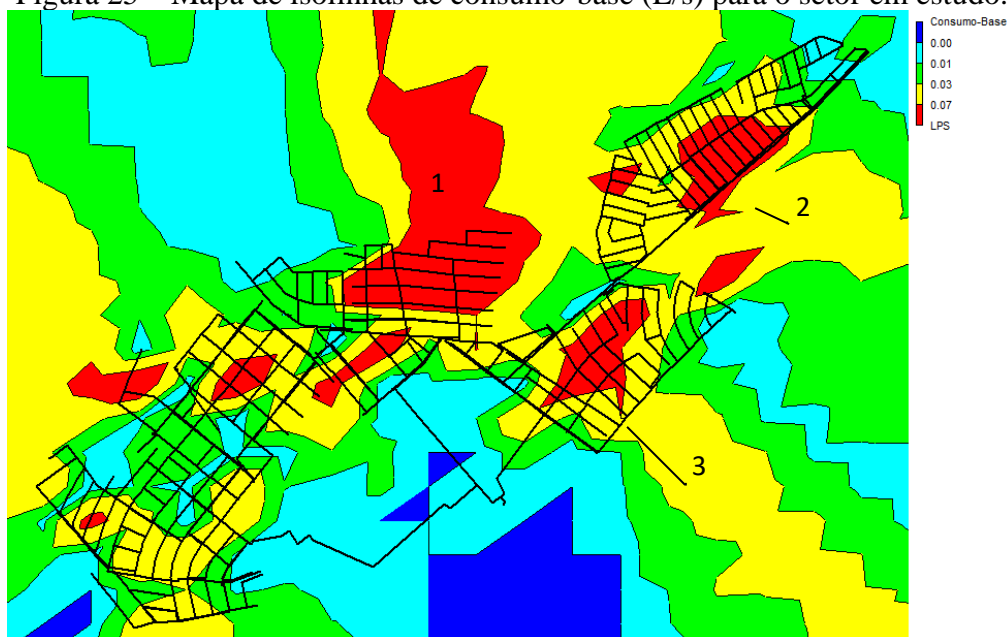
Figura 24 – Comportamento da demanda diária em fator multiplicativo (k).



Fonte: Autor (2022)

O nó com maior consumo base da rede possui vazão de consumo de cerca de 0,95 L/s enquanto que o mínimo consumo base é de aproximadamente  $4,85E-04$  L/s. Apesar da considerável diferença entre as extremidades do consumo, a média do consumo base 0,062 L/s ( $\sigma=0,0677$ ). Em totalidade, o modelo do setor de abastecimento tem consumo total diário de aproximadamente 130,6 m<sup>3</sup>/dia, com a distribuição espacial dos consumos base seguindo o mapa da rede representado na Figura 25, abaixo.

Figura 25 – Mapa de isolinhas de consumo-base (L/s) para o setor em estudo.



[1][2][3] – Regiões de maior consumo base mais significativas no setor

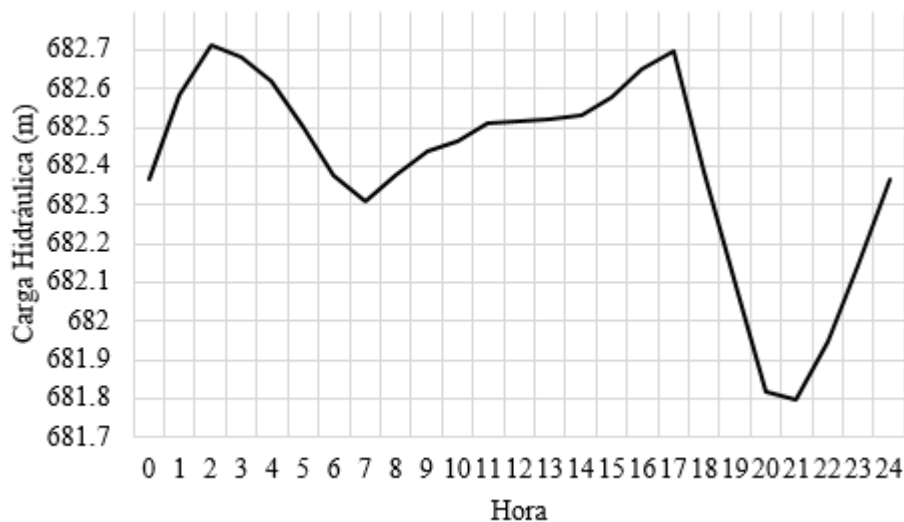
Fonte: Autor (2022)

Na Figura 25 é possível destacar visualmente a existência principalmente de três hubs de maior consumo cuja localização dá-se em regiões em que a rede, *a priori*, através de inspeção visual do traçado, tenderia a menores condições de redundância e conectividade, como na região 1 com a existência de maior ramificação e uma condição de malha menos compacta em comparação à outras regiões. A região 2, por sua vez, há de se destacar em detrimento de estar situada no conjunto da rede abastecida por somente uma tubulação, tornando toda região, inevitavelmente mais vulnerável como já exposto anteriormente. Da terceira mancha de maior consumo é possível verificar, apesar de não tão evidentes como na região 1, a existência também de uma maior desconexão entre as tubulações. Destacam-se também as outras regiões de maior consumo como de relevante interesse na análise, uma vez que também apresentam especificidades de semelhante condição das enumeradas. Tal conjunto de fatores, concomitantemente à diversos outros aspectos, podem contribuir para o incremento da vulnerabilidade do setor e conseqüentemente na deterioração da capacidade de resiliência da rede.

Outro padrão implementado ao modelo é o aplicado à variação da carga hidráulica em metros no RNF, cujo comportamento, ao longo do dia é descrito pela Figura 26, abaixo. Os valores observados para o conjunto, expressam uma variação diária de aproximadamente 0,91 metros, que ajustados para o comportamento da curva de demanda permite o ajuste do

comportamento das pressões e vazões ao longo da rede de acordo com os dados de campo utilizados para calibragem do modelo pela equipe do LabSiN.

Figura 26 – Comportamento de nível hidráulico do reservatório de nível fixo.



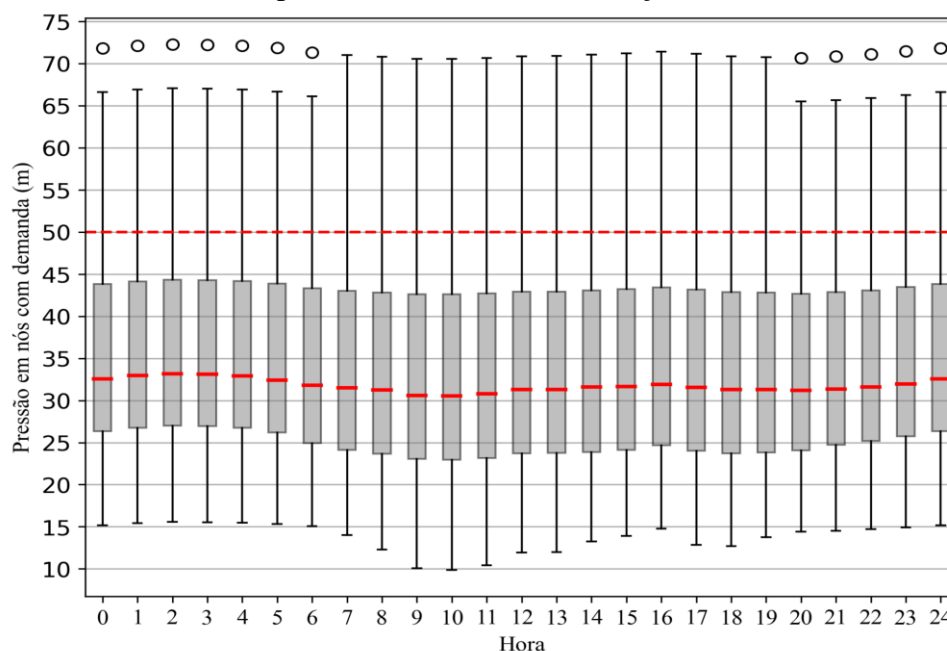
Fonte: Autor (2022)

Assim como na Figura 26, acima, onde a modelagem de um comportamento do reservatório busca estimar condições de operação real da rede no modelo, a Figura 29, abaixo, ilustra os valores limítrofes, médios e quartis para as pressões dinâmicas horárias dos nós com demanda da rede. A observação foi limitada à tais nós de modo a verificar as condições da rede para nós cuja importância ao abastecimento é maior em função de conter valores de demanda, bem evitar “*outlier*” como nós de adutoras que eventualmente não atendam valores tecnicamente aceitáveis e que são relevantes principalmente nos ramais de consumo.

Para os valores expostos na Figura 27, destaca-se a ausência de nós de demanda com pressões dinâmicas mínimas abaixo de 10 metros, indicando abundância energética na rede. Abundância essa que, por sua vez, é claramente observada no contingente de nós cujas pressões estáticas máximas ultrapassam 50 metros sugeridos pelas normativas vigentes (ABNT, 2017). Em termos numéricos, em média 72 nós com demanda apresentam tais valores acima do recomendado, os quais representam um percentual de aproximadamente 0,56 % da vazão total diária demandada pela rede. Contudo, é imprescindível apontar que apesar de em termos relativos uma parcela pequena da população pode ser diretamente afetada por tais condições, ponderações técnicas sobre o abastecimento devem objetivar o suprimento das demandas dentro das condições adequadas em sua universalidade. Logo, a adequação da viabilidade do

abastecimento dentro das pressões limítrofes seguras é tarefa não somente complementar como necessária para avaliações de resiliência.

Figura 27 – Comportamento das pressões em metros nos nós com demanda ao longo do período de um dia de simulação.



Fonte: Autor (2022)

Dadas todas as condições descritas acima acerca do modelo hidráulico da rede em estudo e pressões nos nós de consumo, é importante frisar que, em todos nós da rede, umas proporções de cerca de 75% dos nós estabelecem-se abaixo de aproximadamente 45 metros de pressão, 50% abaixo de 32,5 metros e 25% abaixo aproximadamente 25 metros.

Considerando os limítrofes de 10 metros para pressão dinâmica mínima e pressão estática máxima de 40 a 50 metros convencionados e sugeridos pela NBR 12.218/2017 (ABNT, 2017), cerca de 13% dos nós com consumo possuem pressões acima de 50 metros, chegando a máximas de até 71 metros. Logo, evidentemente a existência de válvulas de redução de pressão nos trechos condutores de maior vazão que abastece tais vértices faz-se procedimento necessário para além das premissas de resiliência per se, mas também para mitigação de perdas reais em função dessas pressões de grande magnitude.

#### 10.1.3.4 Trechos de fim de rede e trechos ponte

Por fim, refinando as características básicas do traçado da rede, aplicou-se utilizando o pacote WNTR uma análise acerca da existência de nós de fim de trecho (com grau de nó  $k = 1$ ) e trechos cuja vulnerabilidade, como já comentado anteriormente, é de maior sensibilidade. Diante disso, a aplicação da ferramenta permitiu a obtenção de um mapa do traçado da rede (Figura 28), com a distribuição dos condutos cuja baixa conectividade e redundância gera maior potencial de desabastecimento em caso de falhas.

Figura 28 – Trechos ponte e nós de fim de trecho (vermelho)



Fonte: Autor (2022)

Analisando os trechos destacados na Figura 28, acima, ao todo cerca de 106 nós (12 % de todos nós da rede) correspondem à nós de fim de trecho, e o comprimento total de condutos cuja jusante é um destes nós é de aproximadamente 8550 metros com cerca de 80 % destes tendo diâmetros iguais a 50 mm e 11 % com 200 mm. Os trechos de fim de rede representam uma vulnerabilidade pontual uma vez que eventuais falhas extremas de total interrupção do fluxo nesses não têm capacidade de fragmentar a rede e desestruturar o abastecimento.

## 10.2 MODELO TOPOLÓGICO

O modelo topológico utilizado nas métricas foi criado utilizando o pacote NetworkX em linguagem Python (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2008; KLISE et al., 2017). O mesmo também é integrado ao pacote WNTR, o que facilita a aquisição e integração de dados do modelo hidráulico ao grafo.

A estruturação dos grafos pelo pacote se dá através da entrada de listas de trechos, matrizes de adjacência ou listas de adjacência, sendo que cada forma de estruturação dos dados ocupa memória e tempo computacional distintos. No caso de redes reais, onde a proporção entre o número de trechos ( $m$ ) e vértices ( $n$ ) não é comum, o pacote implementa o processamento por listas de adjacência cuja formatação, resumidamente, tem os vértices como chaves e a eles são atribuídas, de modo binário, a conexão ou não com os trechos (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2008).

No caso da entrada e interpretação das redes de abastecimento de água com o uso do pacote WNTR, o arquivo em extensão INP é primeiramente compilado ao formato nativo de redes de água do pacote WNTR seguido da criação de um grafo direcionado com múltiplas linhas podendo, ou não, haver a admissão de pesos aos trechos e nós (KLISE et al., 2017). Em termos topológicos, os pesos são aspectos opcionais a complementação dos grafos, sendo que, em termos de redes de distribuição de água, podemos exemplificar pesos como sendo valores de vazão, diâmetro, fator de fricção e entre outras características associadas aos condutos até mesmo aquelas oriundas de aferições topológicas como centralidade; de mesmo modo para os nós/vértices do grafo também são diversos os aspectos que podem ser associados aos mesmos, a exemplo características como demanda, pressão, grau do nó, cota altimétrica e entre outros. É prudente apontar que a associação de tais características (i.e., pesos) é aspecto marcante para a aplicabilidade de técnicas topológicas em redes de distribuição de água e certamente em diversos outros campos de estudo. Após a criação do grafo, pode haver tanto a conversão para um grafo simples direcionado, conservando eventuais pesos atribuídos aos elementos, cuja manipulação e implementação a diferentes métodos é de maior praticidade, como para grafos simples não direcionados, esse formato, contudo, com menor utilidade em se tratando de redes de abastecimento de água.



Com a obtenção dos grafos, seguiu-se com a determinação das matrizes de adjacência, seus autovalores e autovetores, matriz de grau dos nós, e laplaciana. Em princípio, nenhum peso (e.g., comprimento de trechos, demanda de nós, diâmetros, entre outros) foi incorporado à criação das matrizes por serem raras as metodologias que usam dessas métricas.

### 10.3 CENÁRIOS E CONDIÇÕES DE DISRUPÇÃO

Dentre a vasta bibliografia encontrada por meio da revisão sistemática e bibliográfica exposta no Item 3, a curva de performance (Figura 8 – Item 3.5.1) apresentada para redes de abastecimento por Henry; Emmanuel Ramirez-Marquez (2012), aprimorada por Diao et al. (2016) para redes de água e aplicada por Meng et al. (2018) em análises de correlação topológica, representa o comportamento da distribuição de água diante de eventos disruptivos, e consequentemente de sua resiliência considerando a performance do abastecimento principalmente em termos de suprimento da demanda. Como representado na curva de performance, a resiliência está relacionada com eventos disruptivos, que no caso das redes podem ser de diversa natureza.

Considerando que na realidade brasileira é extremamente baixa a probabilidade de ocorrência de eventos sísmicos de grande magnitude, que tem considerável recorrência dentre os estudos encontrados, tais eventos não foram considerados neste estudo. Assim, os principais eventos disruptivos considerados são a ruptura de tubulações, independentemente do tipo de fenômeno que leve a essa condição. Cabe aqui ressalvas quanto ao termo “ruptura de tubulações”, que no contexto da modelagem realizada no presente estudo compreendeu-se como a parada completa do escoamento ao longo do trecho, o que não representa em sua totalidade o fenômeno ocorrente na realidade. Tal decisão foi determinada em virtude de os objetivos do estudo serem o entendimento das técnicas e métricas e não de pormenores relacionados aos eventos, entendendo-se, no entanto, que a consideração desses é de igual relevância, mas aquém do escopo do presente trabalho. Dados tais detalhamentos, há de se pontuar as premissas que embasar a elaboração dos cenários de disrupção. Primeiramente a simples inspeção visual do traçado da rede considerando princípios das métricas topológicas permitiram a percepção de condições cuja intervenção poderia proporcionar resultados potencialmente esclarecedores em relação ao comportamento das métricas e metodologias.

Outros, como o Cenário III, detalhado posteriormente, são similares à cenários encontrados na bibliografia, são em específico os cenários III-2,5 e III-5.0, que correspondem a ruptura simultânea de 2.5% e de 5% dos trechos de tubulação da rede, respectivamente, e é realizada também por Herrera; Abraham; Stoianov (2016). Maiores e mais detalhadas características de cada cenário são apresentados nos itens seguintes.

Adicionalmente julgou-se importante verificar o efeito que teriam, nas métricas de resiliência, intervenções na rede que são identificadas (mesmo intuitivamente) como importantes para sua vulnerabilidade ou robustez e, afinal, sua resiliência.

O cenário I corresponde a uma primeira intervenção para ‘reforço’ de trechos vulneráveis baseou-se na constatação feita nos Itens 10.1.3 e 10.2 relativo a existência de trecho de alta vulnerabilidade (i.e., trecho “ponte” (YAZDANI; JEFFREY, 2011) cuja vazão em relação ao consumo total da rede é de cerca de 26,25 % para o modelo em questão, um total de aproximadamente 34,27 m<sup>3</sup>/dia do total demandado diariamente. O cenário consiste na inserção de mais uma tubulação de aproximadamente 1.2km de comprimento o que por princípio incrementa a redundância do abastecimento de tal região.

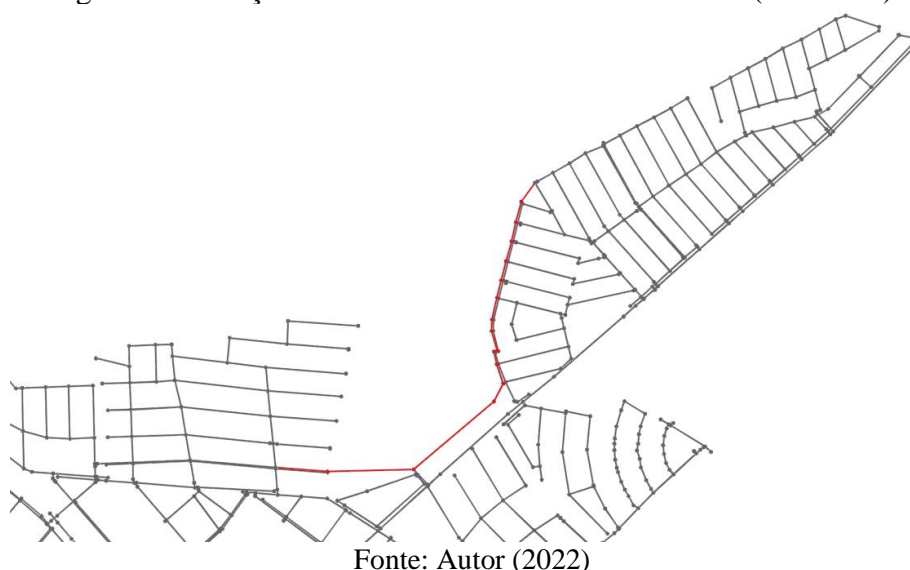
Os cenários II correspondem a situações em que alguma das três principais adutoras do setor é interrompida. O único reservatório do setor é ligado por essas três adutoras para diferentes subsetores interligados, de forma que na ausência de uma delas a demanda deveria ser atendida pelas restantes promovendo uma modificação significativa das vazões e pressões de grande parte do sistema. Segundo qual das adutoras fica interrompida, considerando seus nomes no modelo hidráulico, os cenários são chamados II-p24q II-p1p e II-p22e, e são detalhados no item relativo.

### **10.3.1 Cenário I: adição de tubulação**

Considerando a condição já anteriormente comentada a respeito do setor da rede cujo abastecimento é feito somente por uma tubulação, um traçado adicional—aquí denominada trecho paralelo auxiliar ou trecho PA— destacado em vermelho na Figura 29, abaixo, foi inserido ao modelo realizando um novo tronco de abastecimento para essa região. Essa intervenção, em princípio vai na contramão das caracterizações de cenários de impactos

negativos comumente observadas na literatura. No entanto, em se tratando da avaliação da capacidade de aferição das métricas e metodologias de determinação de resiliência, o presente cenário em nada dirime tais objetivos uma vez havendo alterações aferíveis. Além disso, por perspectivas mais hipotéticas, a resiliência, como característica e potencial ferramenta na análise de redes de distribuição de água, uma vez protocolada sua viabilidade técnica, eventualmente poderá auxiliar, por exemplo, tarefas de otimização de projetos e expansão das redes e não se restringir somente a seu objetivo primordial de relação à impactos e danos na distribuição.

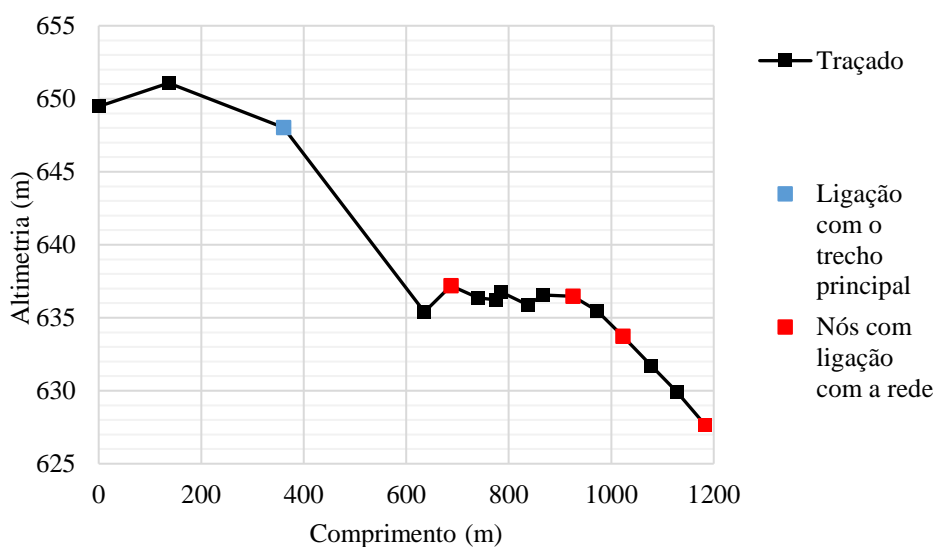
Figura 29 – Traçado do trecho PA adicionado ao setor (vermelho)



O delineamento do traçado da tubulação foi definido principalmente a partir de três critérios, sendo o primeiro a capacidade de abastecimento do subsetor ao após isolamento do trecho atual em qualquer instante do dia com vazões mínimas dinâmicas adequadas para o suprimento da demanda. Outro fator foi a existência do final de trecho de uma das tubulações tronco— com diâmetro de 250 mm— da rede a montante do início do traçado cujo diâmetro, por sua vez, ao longo de sua extensão, foi adequado conforme o diâmetro da tubulação ponte, sendo, portanto, modelado com 150 mm de diâmetro. Outro aspecto considerado fora a existência de condições mínimas favoráveis em termos topográficos para a existência de desnível geométrico, tendo o mesmo, entre o início e fim do trecho cerca de 21,84 metros de desnível favorável ao escoamento. Podendo esse valor ser indicativo de condições positivas energeticamente principalmente quando ponderado sobre os princípios de energia excedente de (TODINI, 2000).

O Figura 30, abaixo, destaca a altimetria e o comprimento do traçado adicionado ao traçado ponte para posterior observação do comportamento das condições topológicas e de resiliência da rede.

Figura 30 – Altimetria e comprimento do trecho adicional PA.



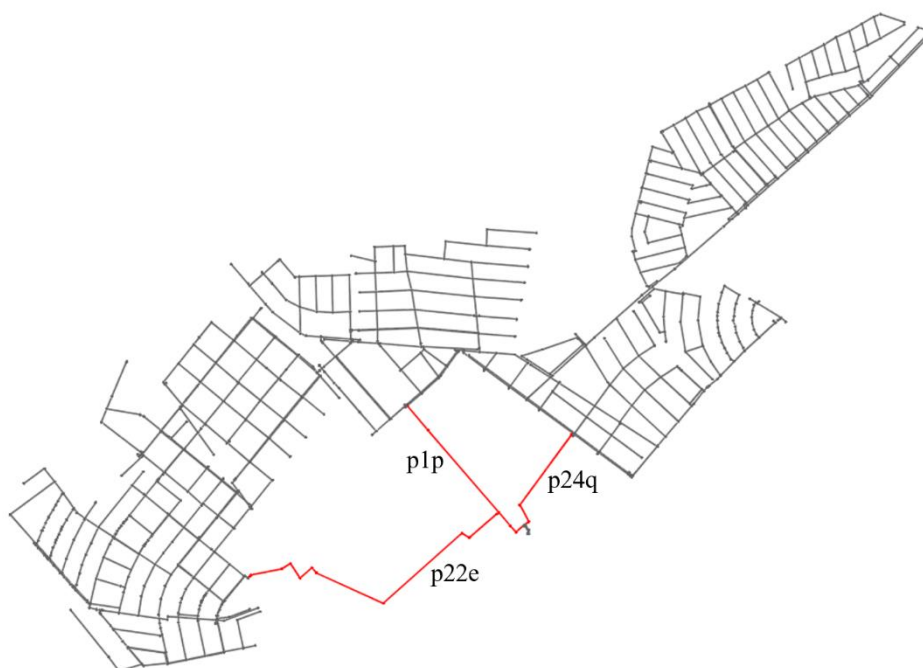
Fonte: Autor (2022)

O trecho paralelo auxiliar ainda se liga a outro trecho cuja montante é ligada ao trecho principal de abastecimento da região (i.e., destacado pelo ponto azul na Figura 30). Já na região paralela à trechos rede, cinco ligações foram feitas—duas ligações partindo do último nó—com o subsetor levando em consideração nós de consumo relativamente mais significativos próximos ou nos pontos de ligação, bem como o grau dos mesmos considerando que venham a ter maior conectividade com a rede.

### 10.3.2 Cenário II: isolamento de adutoras de água tratada

Considerando também a existência de três tubulações adutoras de água tratada responsáveis pelo abastecimento do setor—destacadas na Figura 31, abaixo—possuem evidente maior vulnerabilidade dada principalmente pela existência de somente um reservatório na rede.

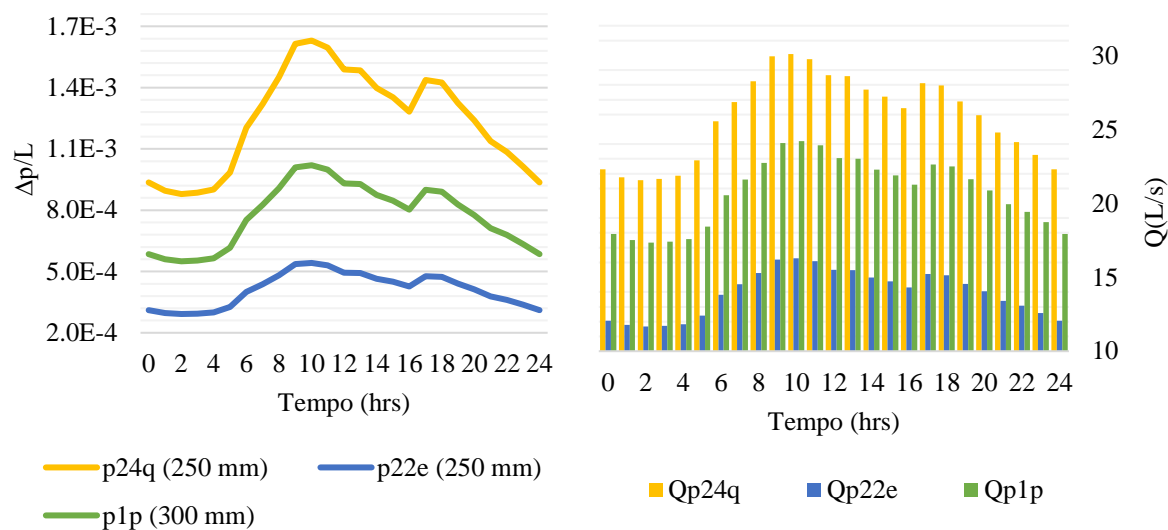
Figura 31 – Tubulações de adução de água tratada do setor (vermelho).



Fonte: Autor (2022)

A existência de três tubulações, de certo modo, pode ser considerada um aspecto de redundância e robustez da rede que, a princípio, podem ter capacidade de manter o abastecimento em condições mínimas de vazão e pressão mesmo com eventual falha completa na capacidade de uma, ou em menor probabilidade, dois destes condutos. Para avaliação primária das características de cada um destes traçados em relação à sua importância para o abastecimento nas condições originais do modelo, a Figura 32, abaixo, descreve o comportamento da perda de carga e das vazões de cada conduto ao longo de um dia.

Figura 32 – Perda de carga unitária (m/m) (esquerda) e vazões (L/s) (direita) ao longo do tempo para cada conduto.



Fonte: Autor (2022)

Como é possível observar através da Figura 32, o comportamento do fluxo entre as tubulações essenciais ao abastecimento da rede se dão principalmente através do conduto p24q e 250 mm de diâmetro com cerca de 42 % da vazão diária, seguida do conduto p1p de 300 mm de diâmetro com 34 % da vazão e por fim o tubo p22e conduzindo aproximadamente 23 % das vazões demandas diariamente. Evidentemente que somente através da aferição de tais proporções não é possível inferir a importância entre cada uma das tubulações para a vulnerabilidade e resiliência da rede, contudo, é interessante adereçar a não linearidade quanto ao diâmetro e a consequente maior resistência em condutos de menor seção e à vazão ocorrente. Indicando que, porventura, outros aspectos como, por exemplo, regiões de maior demanda ou maior área de abrangência podem ter relevância e, portanto, condicionarem a confiabilidade de determinados condutos para além de interpretações puramente mecânicas ou topológicas.

Por fim, dada a sucinta análise prévia das tubulações de adução de água tratada ao setor, o presente cenário terá por princípio a modelagem de condições de isolamento total de cada conduto e posterior condução de simulações hidráulicas. Mesmo considerando que esse não se trata essencialmente de um procedimento “invasivo” do aspecto topológico, as metodologias de resiliência, como o Índice de centralidade média (HERRERA; ABRAHAM; STOIANOV, 2016), assimilam aspectos hidráulicos e mecânicos às métricas topológicas e, portanto, tendo, a princípio, sensibilidade para aferição do comportamento da rede em tais cenários.

### 10.3.3 Cenário III: isolamento de tubulações

A modelagem da existência de falhas ao longo da rede são estratégias recorrentes na bibliografia para aferição do comportamento do fluxo na rede e avaliação metodologias e métricas de resiliência, estudos de Gheisi e Naser (2014), Shuang et al. (2017), Wéber; Huzsvár e Hos (2020) e Zhuang; Lansey e Kang (2013) são alguns exemplos dessa abordagem. Em termos de resiliência, muito do que se pode conferir a respeito do comportamento da rede sob o efeito de falhas randômicas é a sua condição de robustez, uma vez que essa variante deve ter uma boa capacidade de perpassar tais eventos e ser minimamente capaz de superar eventos de ataques estratégicos que podem ou não envolver elementos de grande relevância (e.g., reservatórios, adutoras, plantas de tratamento, etc.) (ALBERT; JEONG; BARABÁSI, 2000; ESTRADA, 2006).

No presente trabalho, a análise por meio do fechamento completo de tubulações seguiu gradações de fechamento semelhantes aos utilizados por Herrera; Abraham e Stoianov (2016) cujo estudo também debruçou-se sobre um setor de abastecimento. Com isso, afim de simular a completa interrupção da capacidade de abastecimento do conduto serão realizadas em duas etapas, a primeira com o fechamento aleatório de 2,5 % ( $\cong$  26 trechos) dos condutos com posterior sub cenário com fechamento de 5 % ( $\cong$  53 trechos) dos condutos do setor. É pertinente mencionar as inerentes discrepâncias observacionais presentes na modelagem de cenários de isolamento completo da tubulação com condições de campo. Uma vez que, por exemplo, eventos que levam a completa inoperância de um trecho não são habituais e sim condições de capacidade de escoamento parciais (e.g., perdas reais por vazamentos, etc.), condições essas que evidentemente serão distintas do isolamento completo que por sua vez tem por finalidade maior o entendimento dos comportamentos das métricas topológicas e metodologias derivadas que pormenorizar causas e características mais refinadas de deterioração da rede ou eventos disruptivos. Tal ponderação, em princípio destaca a complexidade do tema e a as demais variadas formas de análises não contempladas no escopo do presente estudo, mas que o complementam e aprofundam a discussão.

Diao et al. (2016) ao realizar a determinação de cenários para estruturação da curva de performance, lança mão de falhas randômicas baseadas no princípio de todos cenários possíveis de falha dentro do conjunto de componentes da rede, não adereçando à sua análise eventuais interferências de elementos estruturais da rede como características específicas de trechos,

reservatórios e outros. Motiee e Ghasemnejad (2019), no intuito de determinar modelos de predição de falhas em tubulações e histórico de falhas da rede de distribuição de Teerã, capital iraniana, conclui valiosas relações dimensionais com a aferição de modelos de regressão entre comprimento e diâmetro em relação à probabilidades de falha. De acordo com o autor, parte do potencial de vulnerabilidade se atrelam diretamente ao comprimento e inversamente proporcional ao diâmetro, além dessa relação, as análises do autor associam a idade dos condutos e seu material.

No presente estudo, dadas as considerações acima e considerando os dados disponíveis no modelo a respeito da rede, optou-se pela determinação da probabilidade considerando condições mecânicas e correlacionadas ao fluxo. Para isso, a aleatoriedade para seleção dos trechos partiu de preceitos também adereçados à equação de perda de carga de Darcy-Weisbach e também utilizado também pelo método de Herrera; Abraham e Stoianov (2016) (Item 4.1.3), considerando que mesma também possui as dimensões das grandezas de comprimento e diâmetro e ainda insere o fator de fricção que relaciona condições de rugosidade e fluxo nas tubulações. Para isso, na Equação (24, abaixo, é descrita a equação utilizada para a determinação das probabilidades de cada trecho  $m_i$ .

$$P(m_i) = \frac{f(m_i) \frac{L_{m_i}}{D_{m_i}}}{\sum_{i=1}^m f(m_i) \frac{L_{m_i}}{D_{m_i}}} \quad (24)$$

Na Equação (24, o termo  $P(m_i)$  se refere à probabilidade de fechamento de um trecho  $m_i$  dentro do conjunto de resultados, semelhantes aos termos da Equação (18 (Item 4.1.3), fator de fricção médio diário para um trecho  $m$  ( $f(m_i)$ ), pela razão entre o comprimento ( $L_{m_i}$ ) pelo diâmetro ( $D_{m_i}$ )).

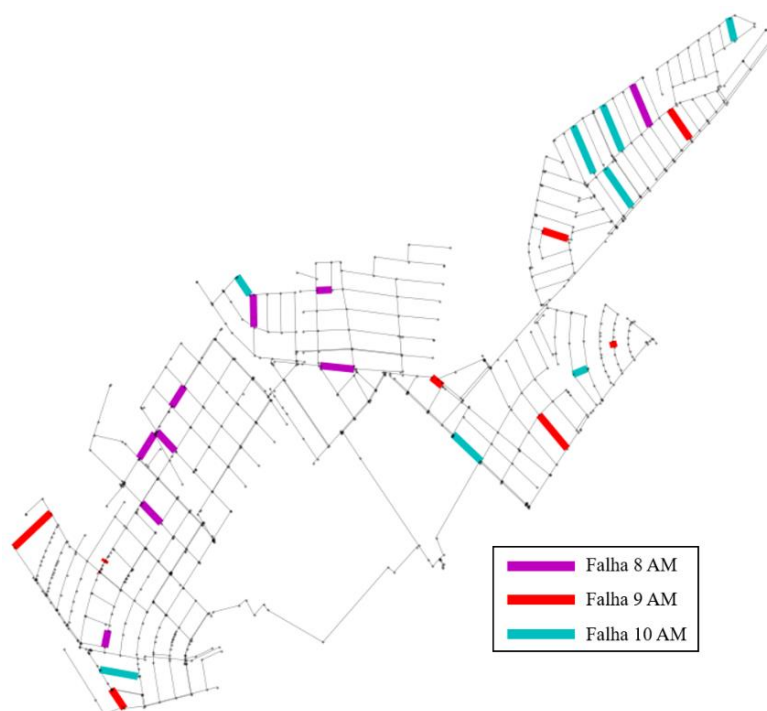
O fechamento dos condutos na modelagem ocorreu através da implementação de controles (Apêndice C) à rede e cada conjunto de gradações foram separados igualmente em três horários imediatos de falha, os eventos de falha iniciando-se às 7 da manhã até as 10 horas da manhã (i.e., horário de maior consumo). Com a retomada do funcionamento dos trechos ocorrendo gradualmente a partir das 14 horas e se estendendo até as 21 horas. Horários de falha foram determinados baseando-se primordialmente no comportamento da curva de demanda da rede (Figura 24). Enquanto que os horários de retorno dos trechos, por depender de diversas variáveis (e.g., tempo de detecção, tempo de resposta de equipe, recursos para execução de reparos, etc.), foram estimados com base na média do Indicador sobre Qualidade de Água e



Esgotos IN083 (SNIS, 2021) que representa a duração média dos serviços de reparo executados. Tal indicador, para o ano de 2021, apresentou dentre os municípios sob a hege de serviços de água e esgoto de direito público, uma média geral de 6,29 horas/serviço. Logo, considerando também os vários fatores envolvidos em tais procedimentos como recém exemplificados, optou-se por convencionar o tempo até a completa recuperação total dos trechos em falha uma amplitude de sete horas, iniciando-se as 2PM e gradualmente recuperando as tubulações até 8 PM com é possível observar na Figura 34.

Contudo é imprescindível frisar que tais amplitudes de horários foram definidas para fins de caracterização decenários e modelagem, havendo sempre de ser necessária a consideração de tais fatores tanto na observância para futuros estudos como para construção mais acuada de modelos que venham a compor tais prerrogativas em seu escopo. Na Figura 33, abaixo, é exibido o traçado da rede com as respectivas tubulações modeladas em falha e os respectivos instantes de ocorrência de falha nas mesmas.

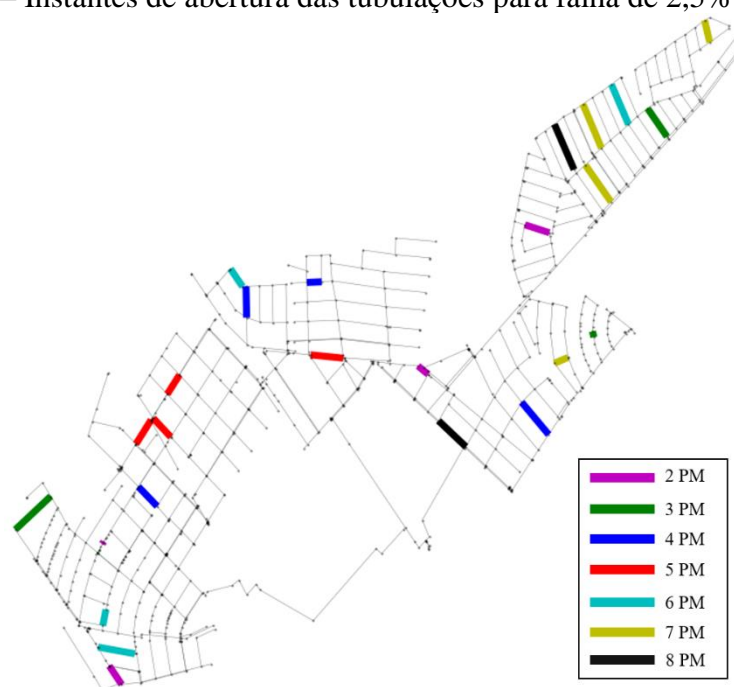
Figura 33 – 2,5 % dos trechos selecionados para falha.



Fonte: Autor (2022)

É digno de nota que o processo de escolha de trechos a sofrerem falhas se caracteriza como um procedimento semi-aleatório, uma vez que, como exposto na Equação (24), atributos como comprimento do trecho ( $L_m$ ), diâmetro do conduto ( $D_m$ ) e fator de fricção conferem “notas” de maior ou menor probabilidade de ocorrência de falha. A sequência de horários de falha ocorreu com 9 trechos as 8AM; 9 trechos as 9AM e 8 trechos as 10AM; enquanto que a sequência de retomada de trechos ocorreu com o retorno do funcionamento de 4 trechos a cada hora entre 2PM e 7PM e 2 trechos as 8PM. Também em virtude da implementação conhecida de instantes de falha, não permite postular tais ataques como de caráter aleatório e sim estratégicos e direcionados. Sendo que tais procedimentos, tanto randômicos como intencionais são igualmente importantes para a aferição das condições de resiliência das redes de água (ESTRADA, 2006). Para os instantes de retorno ao funcionamento normal das tubulações, o fechamento das tubulações ocorreu de acordo com a Figura 34, abaixo, e distribuídas entre os instantes 2 PM e 8 PM.

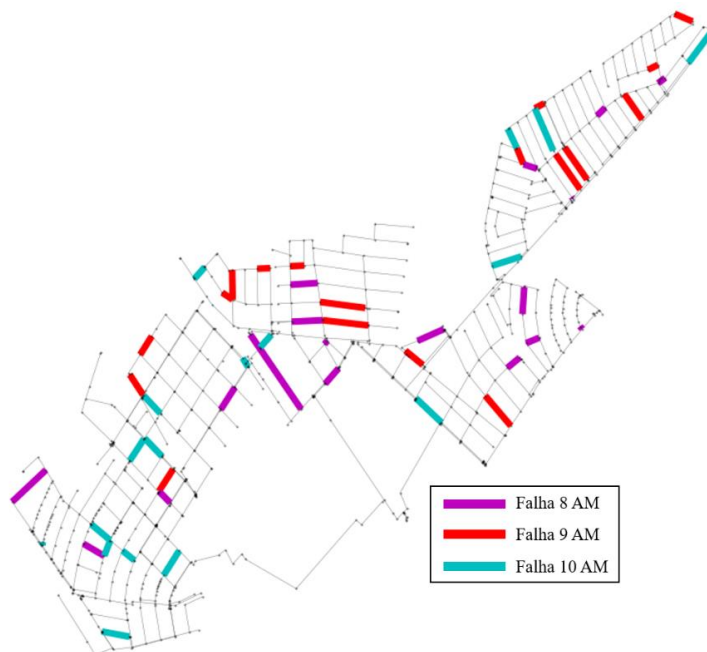
Figura 34 – Instantes de abertura das tubulações para falha de 2,5% das tubulações.



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 35, abaixo, temos as tubulações selecionadas para a falha sobre 5 % das tubulações e os respectivos horários de falha de cada uma (Apêndice D). Tendo nesse caso a falha ocorrido na sequência de 18 trechos as 8AM, 18 trechos as 9 AM e 17 trechos as 10AM.

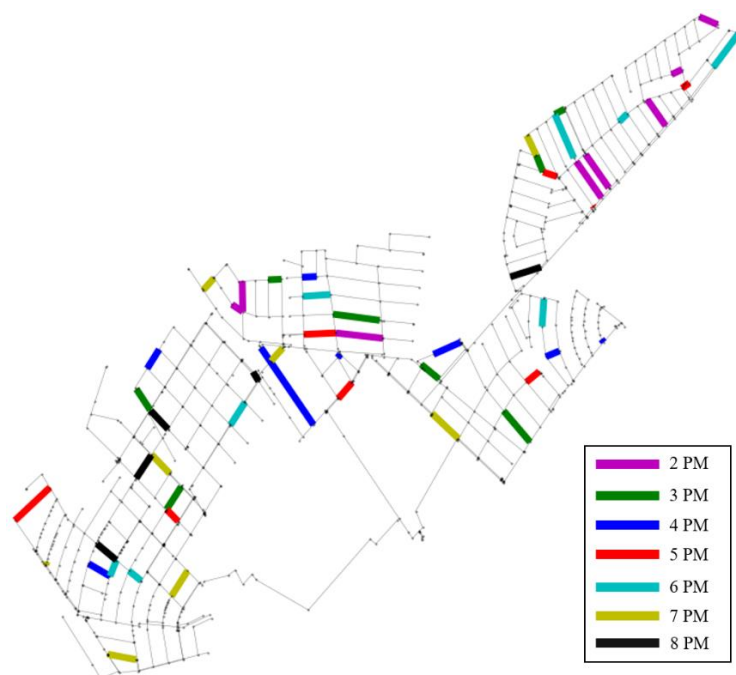
Figura 35 – 5 % dos trechos selecionados para falha.



Fonte: Autor (2022)

Para os instantes de retorno ao funcionamento dos trechos em falha, na Figura 36, abaixo, estão destacados no traçado da rede os respectivos condutos com seus respectivos horários de retorno de funcionamento. Para tal, os reparos ocorreram na sequência de 8 trechos por hora das 2PM às 7PM e 5 trechos reparados às 8PM.

Figura 36 – Instantes de abertura das tubulações para falha de 5% das tubulações.



Fonte: Autor (2022)

Lembrando que a determinação da ordem de restauração dos trechos sucedeu-se na mesma ordem do conjunto randomicamente selecionado para falha no intuito de indicar uma relação direta entre sequência de falha e sequência de início de procedimentos de reparo. Por fim, apesar das características do cenário recém descritas, é importante salientar, assim como detalhadamente observada por Barton et al. (2019) (Vide Tabela 4 e Figura 10 no Item 3.6), a existência de um complexo e intercambiável conjunto de fatores intrínsecos aos elementos da rede e externos como a interdependência entre os setores dentro da autarquia como observado por Arenales (2019).

## 11 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observando a pertinência da realização de uma análise sistêmica e integral dos resultados dos diferentes cenários no objetivo de identificar as sensibilidades, tendências e correlações entre as métricas e metodologias, os resultados serão apresentados concomitantemente à sua análise.

### 11.1 MÉTRICAS TOPOLÓGICAS

Com os dados quantitativos de nós e trechos da rede já é possível adiantarmos algumas características topológicas a respeito da rede. Yazdani e Jeffrey (2011) destaca algumas medidas basilares que possuem relação com o formato da topologia da rede, dentre tais, a razão trecho por nó ( $e=m/n$ ), onde, para redes de abastecimento, os valores ficam entre  $e=1$  para traçados mais ramificados e  $e=2$  em redes cuja estrutura tende a ser mais redundante e malhada. É notável a similaridade entre a equação de determinação de razão trecho-nó ( $e$ ) e equação de determinação de grau médio dos nós (Item 3.10.1.2), onde para essa, o fator 2 associado ao numerador  $m$  (número de trechos) tem fundamentação no princípio topológico de que para cada aresta/trecho  $m$  contribui para no grau de dois vértices/nós. Portanto, a multiplicação do número de trechos por dois justificaria o propósito da equação de aferir o grau dos nós, enquanto que para a equação de razão trecho-nó a propositiva é avaliar unicamente a relação direta entre tais elementos.

No Quadro 2, estão dispostas as métricas elementares para o traçado original, do Cenário I e dos subcenários do Cenário II. Considerando a existência evidente de trechos de importância singular por se tratarem de gargalos de alta vulnerabilidade para o abastecimento (e.g., Item 10.3.1, existência de trecho ponte que levou à elaboração do Cenário I), a métrica de razão de pontes ( $b_r$ ) foi adicionada à rotina de aferições e adicionada e foi incrementada a rotina de dados aferidos.

Quadro 2 – Características topológicas e espectrais para o modelo original e Cenários I e II.

Métricas e características topológicas	Valores aferidos		Cenário II		
	Original	Cenário I	p22e	p1p	p24q
m	1059	1079	1049	1057	1052
n	879	894	870	878	873
q	2,74E-3	2,70E-3	2,77E-3	2,74E-3	2,76E-3
e	1,2048	1,2069	1,2057	1,2039	1,2050
$\langle k \rangle$	2,41	2,41	2,41	2,40	2,41
APL (metros)	1943,46	1844,81	1961,96	1949,33	1966,38
$APL_e$ (metros)	1659,17 ( $\sigma$ 527,28)	1634,27 ( $\sigma$ 533,47)	1795,80 ( $\sigma$ 643,02)	1765,40 ( $\sigma$ 541,99)	1966,19 ( $\sigma$ 627,17)
D	78	77	81	78	78
$R_m$	-0,10325	0,10499	0,10375	0,10279	0,10339
$\Gamma$	1,77E-2	2,27E-2	1,81E-2	2,14E-2	1,04E-2
$\underline{C}_b$	3,46E-2 ( $\sigma$ 6,46E-2)	3,17E-2 ( $\sigma$ 5,98E-2)	3,58E-2 ( $\sigma$ 7,91E-2)	4,49E-2 ( $\sigma$ 6,56E-2)	3,52E-2 ( $\sigma$ 6,90E-2)
$\underline{C}_{eb}$	2,96E-2 ( $\sigma$ 5,67E-2)	2,71E-2 ( $\sigma$ 5,20E-2)	3,06E-2 ( $\sigma$ 6,92E-2)	2,99E-2 ( $\sigma$ 5,76E-2)	3,01E-2 ( $\sigma$ 6,03E-2)
$\Delta^L$	4,01E-4	5,94E-4	3,41E-4	4,00E-4	3,70E-4
$1/\lambda_1$	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299
$\Delta\lambda$	0,0709	0,0709	0,0709	0,0709	0,0709
$a(G)$	1,19E-2	9,84E-3	1,19E-2	7,37E-3	1,19E-2
$b_r$	0,189	0,174	0,198	0,190	0,195

m: número de trechos; n: número de nós; q: densidade de trechos; e: razão trecho-nó ;  $\langle k \rangle$ : grau médio dos nós; APL: comprimento médio de caminhos entre nós;  $APL_e$ : comprimento médio mais curto até o reservatório (metros); D: diâmetro do grafo;  $R_m$ : coeficiente de malha;  $\underline{C}_b$ : média da centralidade média dos nós;  $\underline{C}_{eb}$ : Média da centralidade média dos trechos;  $\Delta^L$ : autolacuna;  $1/\lambda_1$ : raio espectral;  $\Delta\lambda$ : lacuna espectral;  $a(G)$ : conectividade algébrica;  $b_r$ : razão de pontes;  $\sigma$ : desvio padrão.

Fonte: Autor (2022)

No Quadro 3, abaixo, estão dispostos os resultados para as métricas topológicas aferidas para os dois subcenários do Cenário III (2,5% e 5% de falha). No intuito de sumarizar a análise, somente os horários em que os danos se iniciam e progridem foram contemplados no presente quadro. Contudo em observações posteriores instantes de diferentes instantes no tempo

simulado serão inspecionados para aferição também do comportamento de condicionantes hidráulicas e outros.

Quadro 3 – Características topológicas para os instantes de falha para o Cenário III com 2,5 % de trechos falha.

Métricas e características topológicas	2,5% de trechos fechados			5% de trechos fechados		
	8 AM	9 AM	10 AM	8 AM	9 AM	10 AM
m	1051	1042	1035	1041	1023	1004
n	879	879	879	879	878	873
q	2,72E-3	2,69E-3	2,68E-3	2,69E-3	2,65E-3	2,63E-3
e	1,19	1,18	1,18	1,18	1,16	1,14
$\langle k \rangle$	2,38	2,37	2,35	2,37	2,33	2,29
APL (metros)	1949,63	1952,36	1953,21	1962,84	1992,57	2012,14
$APL_e$ (metros)	1661,17 ( $\sigma$ 547,88)	1661,59 ( $\sigma$ 547,85)	1662,78 ( $\sigma$ 548,01)	1673,38 ( $\sigma$ 552,62)	1698,48 ( $\sigma$ 553,55)	1703,09 ( $\sigma$ 560,64)
D	85	85	85	80	94	96
$R_m$	0,09869	0,09356	0,08956	0,09298	0,08338	0,07582
$\Gamma$	1,89E-2	6,21E-3	5,31E-3	1,30E-2	1,81E-2	6,74E-3
$C_b$	3,48E-2 ( $\sigma$ 6,46E-2)	3,49E-2 ( $\sigma$ 6,54E-2)	3,50E-2 ( $\sigma$ 6,54E-2)	3,54E-2 ( $\sigma$ 6,65E-2)	3,62E-2 ( $\sigma$ 6,80E-2)	3,65E-2 ( $\sigma$ 6,66E-2)
$C_{eb}$	3,00E-2 ( $\sigma$ 5,70E-2)	3,03E-2 ( $\sigma$ 5,79E-2)	3,07E-2 ( $\sigma$ 5,81E-2)	3,08E-2 ( $\sigma$ 5,93E-2)	3,20E-2 ( $\sigma$ 6,08E-2)	3,27E-2 ( $\sigma$ 6,00E-2)
$\Delta^L$	3,98E-4	3,97E-4	3,97E-4	3,73E-4	3,71E-4	3,60E-4
$1/\lambda_1$	0,299	0,308	0,308	0,299	0,300	0,302
$\Delta\lambda$	0,0709	0,0276	0,0276	0,1164	0,1204	0,1906
$a(G)$	8,05E-3	1,18E-2	1,15E-2	1,10E-2	6,09E-3	5,88E-3
$b_r$	0,225	0,229	0,237	0,223	0,272	0,311

m: número de trechos; n: número de nós; q: densidade de trechos; e: razão trecho-nó ;  $\langle k \rangle$ : grau médio dos nós; APL: comprimento médio de caminhos entre nós;  $APL_e$ : comprimento médio mais curto até o reservatório (metros); D: diâmetro do grafo;  $R_m$ : coeficiente de malha;  $C_b$ : média da centralidade média dos nós;  $C_{eb}$ : Média da centralidade média dos trechos;  $\Delta^L$ : autolacuna;  $1/\lambda_1$ : raio espectral;  $\Delta\lambda$ : lacuna espectral;  $a(G)$ : conectividade algébrica;  $b_r$ : razão de pontes;  $\sigma$ : desvio padrão.

Fonte: Autor (2022)

### 11.1.1 Densidade de trechos ( $q$ ), razão trecho-nó ( $e$ ) e grau médio dos nós

Primeiramente, considerando as métricas de densidade de trechos ( $q$ ), razão trecho-nó ( $e$ ) e grau médio dos nós ( $\langle k \rangle$ ), tem-se uma condição indicando uma baixa robustez e redundância ao observar modelos (Vide Anexo A) cuja razão “ $e$ ” e  $\langle k \rangle$  são virtualmente indistinguíveis das do presente modelo, porém com discrepâncias da ordem de 140 % acima dos valores encontrados no traçado em estudo. De acordo com Giudicianni et al. (2018), apesar de haver uma forte correlação entre  $\langle k \rangle$  e a densidade de trechos, essa também é implicitamente influenciada pela quantidade de loops na rede.

Diante disso, constata-se que o valor para a densidade de trechos ( $q$ ) em todos os cenários e subcenários apresentados no Quadro 2 foi de aproximadamente 0,0027, o que, primeiramente, corrobora com a condição  $m \ll n^2$  e  $q \sim n^{-1,04}$  que caracteriza redes reais de caráter esparsas, ou seja, que possuem uma alta heterogeneidade topológica em relação aos seus componentes. Em se tratando de um setor de rede de distribuição, pertencente à um conjunto mais amplo não contemplado no presente estudo, a densidade de trechos aferida encontra-se em uma magnitude relativamente baixa de densidade global de trechos. Essa constatação vai de encontro com as observações feitas por Giudicianni et al. (2018) na qual o autor verifica a dependência da centralidade de trechos ao grau dos nós.

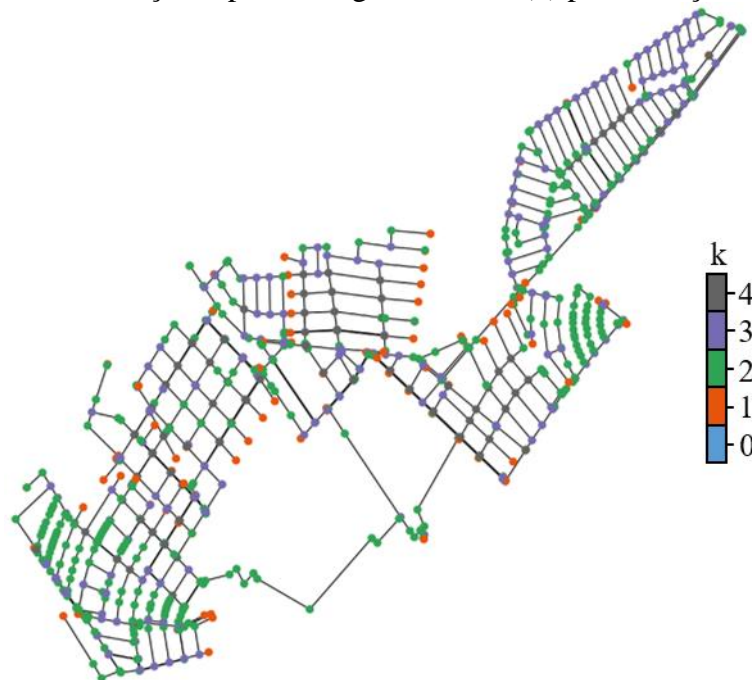
Em se tratando dessas mesmas métricas para os resultados dos subcenários do Cenário III no Quadro 3, observa-se, evidentemente, uma gradual queda em relação aos valores do cenário original para as três métricas. Para todas métricas observam-se taxas decrescentes ao longo dos três instantes, tanto para o subcenário III - 2,5% e III - 5%, muito semelhantes, o que logicamente é esperado uma vez que a mesma tem relação direta com a quantidade de trechos e nós na rede. Em virtude disso, é preciso salientar que métricas tão intrínsecas e fundamentadas essencialmente nos elementos grafológicas da rede não terão desempenho adequado no que concerne à aferição de resiliência, contudo sua implementação como técnicas de entendimento da topologia do traçado do sistema em etapas de projeto por exemplo, podem ser de grande valia e não devem ser puramente descartadas (DI NARDO et al., 2018a).

Na Figura 37, abaixo, os nós da rede estão destacados de acordo com seu grau de ligação nodal. Na mesma é possível perceber a predominância de nós de grau e mesmo sua



concentração em determinadas regiões, indicando condições de trechos longos e, portanto, menores condições de conectividade locais.

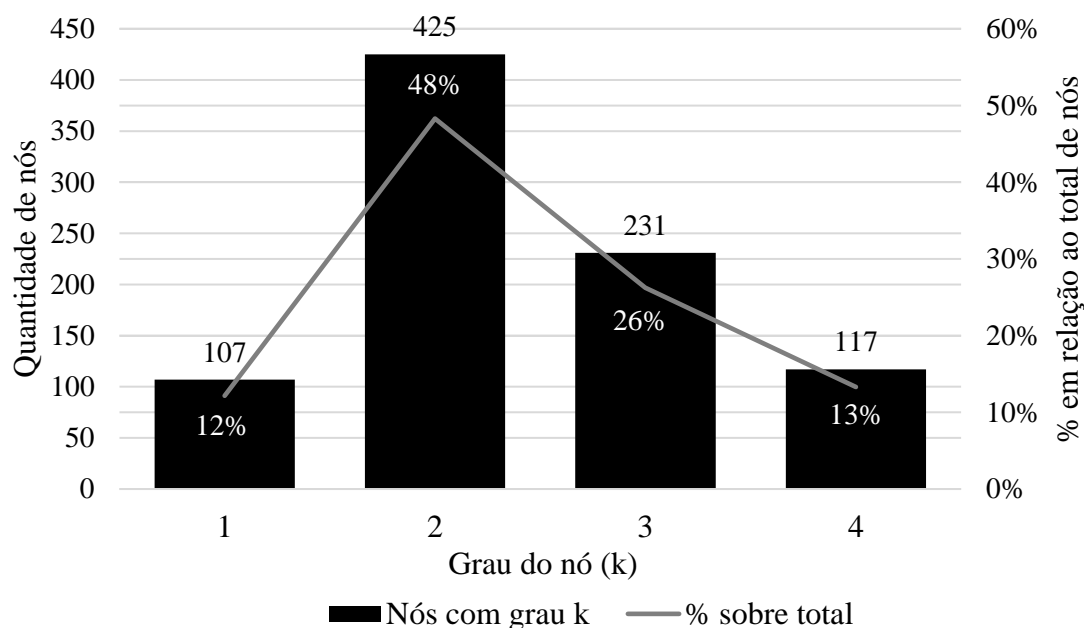
Figura 37 – Localização espacial do grau dos nós ( $k$ ) para o traçado em estudo.



Fonte: Autor (2022)

Nesse sentido, a distribuição quantitativa desses graus dispostos na Figura 37, indicam uma relativa baixa uniformidade entre os graus de nós evidencia a existência de condições esparsas e de uma rede com pouca presença de traçados em malha. O que é, em termos comparativos, semelhante a modelos como Matamoros (GIUDICIANNI et al., 2021) rede real com  $q = 0,002$  e  $k = 2,56$ , e definida pelo autor, através de comparações topológicas com outros modelos, como sendo de configuração mista entre malhada e ramificada. Logicamente que qualquer análise das métricas de forma desconexa e isolada das outras, ou mesmo de variáveis de outras dimensões, não possibilita uma definição razoável e definitiva das condições de resiliência e seus conceitos tangentes de uma rede ou setor.

Figura 38 – Distribuição quantitativa e percentual de grau dos nós para setor original



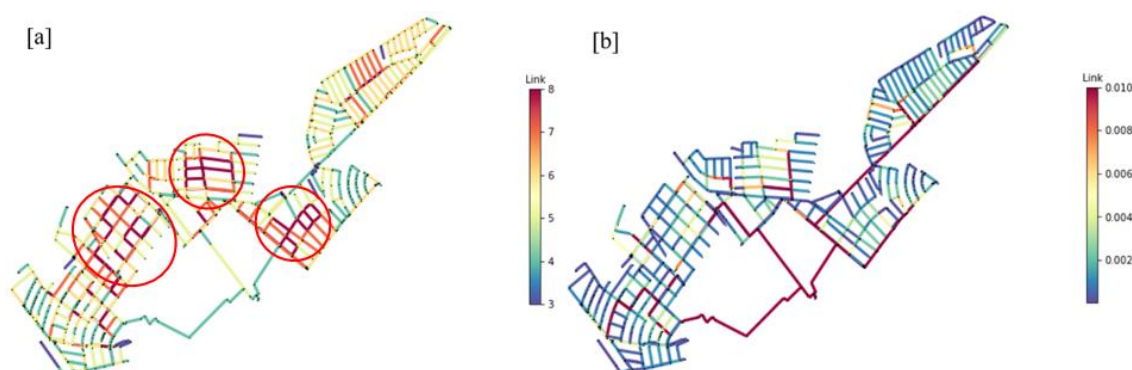
Fonte: Autor (2022)

Ainda analisando a Figura 38, acima, é possível observar a existência de aproximadamente 60% dos nós com grau 1 e 2 e 40% no somatório de nós com graus 3 e 4. Tais indicativos, por representarem, em termos de abastecimento de água, uma conectividade relativamente baixa a princípio, permitem inferir, de maneira preliminar, que a rede possui uma maior quantidade de nós com pobre capacidade conectividade o que, por conseguinte interferem na resiliência e demais aspectos correlatos. Deve-se salientar, no entanto, que tal observação é de caráter quantitativo e pode não traduzir as reais condições de resiliência em virtude também de fatores como a distribuição destes nós ao longo da rede. A existência de nós com grande centralidade, mesmo indicando inicialmente uma condição de baixa resiliência estrutural da rede, de acordo com Yazdani e Jeffrey (2012a), redes de abastecimento de água em geral comumente apresentam distribuições de grau com predominância de graus dois e três não ultrapassando valores acima de quatro. A existência de relativa homogênea distribuição de tal métrica, portanto, tende a mascarar a sensibilidade da rede perante falhas e conseqüentemente também inviabilizar a determinação de detalhes significativos para a caracterização da resiliência da rede.

Diante disso, no intuito de obter informações principalmente relativas à importância de condições de distribuição dos graus ao longo da rede e eventuais disparidades nessa distribuição, duas observações espaciais considerando o grau dos nós foram determinadas. Na Figura 39, abaixo, o traçado [a] indica o somatório do grau dos nós de montante e jusante de

cada trecho ( $km_{ij} = k_i + k_j$ ) viabilizando a observação da distribuição dos graus ao longo da rede considerando os condutos. Já na Figura 39[b], no esforço de obter uma aplicação simples e direta de indicação de potenciais trechos de mais relevância considerando também condições hidráulicas do abastecimento, ao somatório de graus de cada trecho ( $km_{ij}$ ) a multiplicação pela vazão média diária de cada trecho foi implementada.

Figura 39 – Agregado do grau dos nós de cada trecho ao longo da rede [a] e produto de graus agregados pela vazão média de cada trecho no modelo [b] para setor não alterado.



Fonte: Autor (2022)

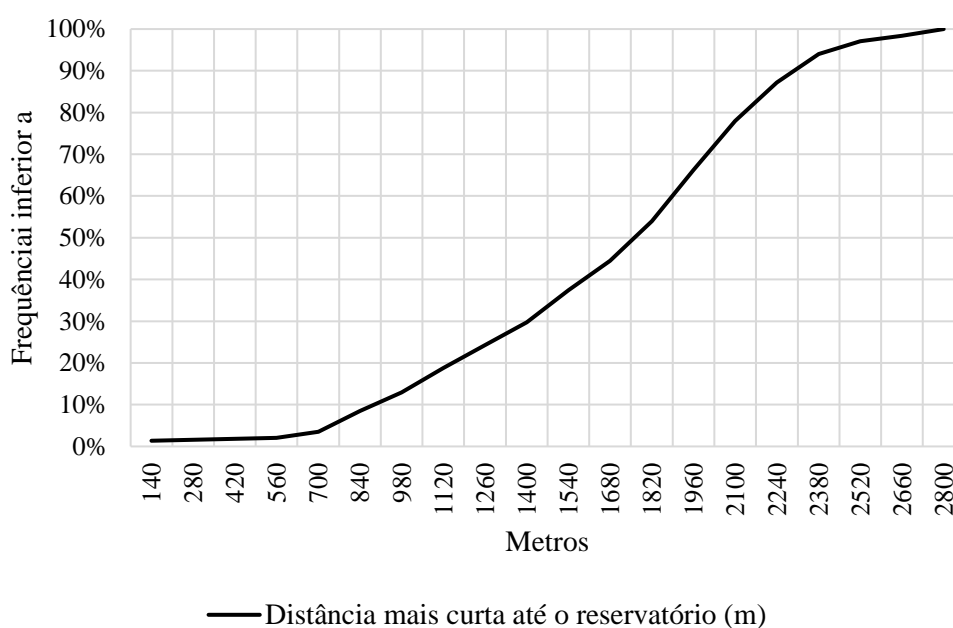
Com os dados de ambas análises dispostos na Figura 39[a], é evidente a existência de três aglomerados cujos trechos ligam-se à nós com maior grau e consequentemente maior conectividade ( $km_{ij} \approx 8$ ). Essas também são as regiões nas quais, por observação do traçado, identifica-se maior predominância de traçado em malha. Contudo, observando o resultado com agregação das vazões médias (Figura 39[b]) é possível observar uma disparidade em termos de relevância das mesmas (i.e., com exceção de condições de maior singularidade como trechos ponte), indicando, por meio de uma rápida verificação de correlação (Spearman = 0,26), a fraca existência para condições diretas entre trechos adjacentes à nós de maior grau e sua relevância para maiores vazões e consequentemente maior significância para o abastecimento. Evidentemente que uma variedade de outros parâmetros (e.g., diâmetro, rugosidade, demanda, declive, comprimento, etc.) podem interferir na vazão entre as tubulações, tornando não trivial a direta inferência de importância dos trechos com maior relevância como preceito único de ações de incremento da resiliência (YAZDANI; JEFFREY, 2012a).

### 11.1.2 Comprimento médio dos trechos (APL e APL<sub>e</sub>)

Para os resultados observados para comprimento médio dos trechos (APL) e APL<sub>e</sub>, realizando num primeiro instante uma elucubração partindo da extensão total da rede (aprox. 57088 metros), temos uma condição onde todos os nós se interligam e ligam-se ao seu reservatório de abastecimento, em média, por uma distância de cerca de 3,4 % da totalidade da rede. A princípio tal condição pressupõe, em termos estruturais, que existem condições favoráveis em questão de contorno das tubulações (i.e., maior presença de *loops* e, portanto, favoráveis à redundância), ou mesmo a existência de eventuais diferentes aglomerados que implicam em uma média menor. Contudo, considerando as observações a respeito da densidade de trechos cujo resultado sugere o oposto a predominância de *loops* e da condição de que se conhece visualmente o contorno do traçado da rede, não se concretizam elementos razoáveis para indicar impacto.

Na Figura 40, abaixo, é exibida a frequência acumulada para o caminho mais curto para APL<sub>e</sub>, que se refere à distância até o reservatório. No mesmo, observa-se uma relativa boa distribuição em relação a distância entre os nós e o reservatório, o que *a priori* possibilita a identificação de uma possível homogeneidade em relação a distribuição espacial dos nós da perspectiva posicional do reservatório.

Figura 40 – Frequência acumulada de comprimento médio mais curto (APL<sub>e</sub>)



Fonte: Autor (2022)

Em termos de resiliência, partindo-se do princípio elementar de que nós mais distantes tendem à maior vulnerabilidade ao desabastecimento em virtude da maior distância a ser percorrida, o setor, se observado somente por tal métrica, indicaria uma condição de neutralidade dado que há uma distribuição relativamente homogênea das distâncias. Contudo, há de se ressaltar que, por exemplo, o reservatório em questão se situa em condições relativamente adversas em função da sua localização mais afastada da rede, necessitando, invariavelmente de trechos relativamente longos para a realização da distribuição.

Quanto as variações de APL e APLe para o cenário I e subcenários do cenário II, em relação ao observado no traçado original, são observadas sutis alterações. Sendo perceptível uma queda de cerca de 5% e 1,5%, respectivamente, na distância média entre os nós e na distância média até o reservatório no cenário I em relação ao traçado original por conta do incremento de trecho e, portanto, aumento da possibilidade de trajetos. Já para o cenário a remoção de adutoras indicou quedas em relação ao cenário original de -0,95 %, -0,30 % e -1,18% para APL e -8,24%, -6,40% e -18,50% para APLe, respectivamente para os subcenários p22e, p1p e p24q. Essas variações corroboram em parte com os valores de vazões observados na modelagem para cada trecho.

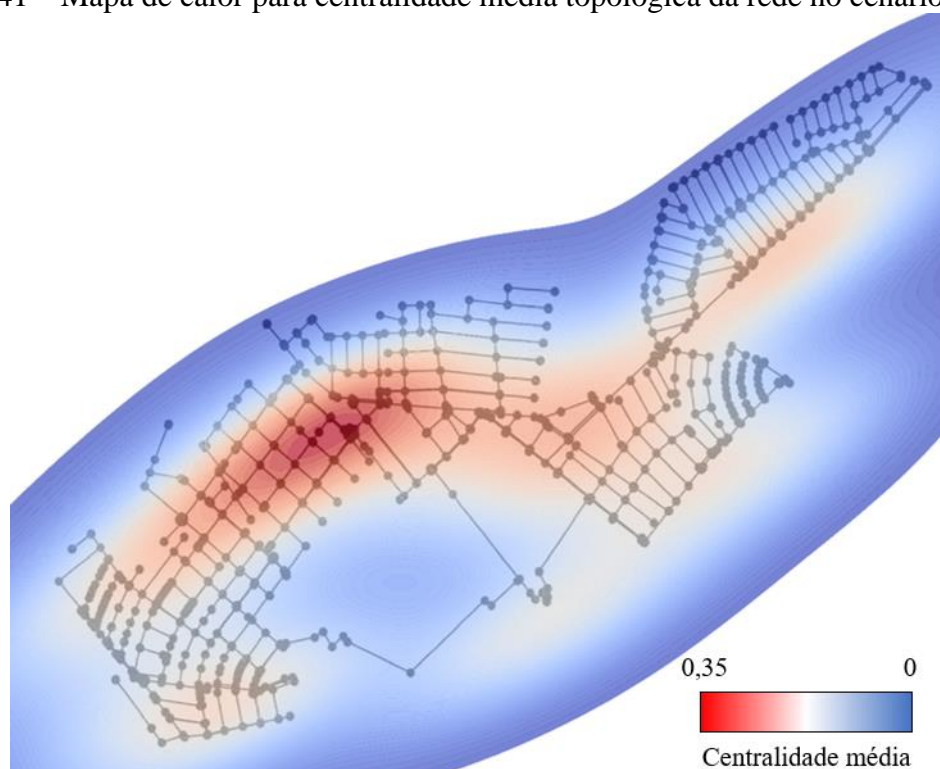
Nos casos do Cenário III, para 2,5% observou-se para APLe um incremento médio de distância em percentual de 0,16% ao caminho médio e 3,9% no desvio padrão, enquanto que para o subcenário de 5% a variação percentual foi de 1,96% em termos de distância e 5,37% para desvio padrão, todas variações em relação aos valores observados no cenário original.

Di Nardo et al. (2018c) observa que aspectos como comprimento médio mais curto (APL) e métricas correlatas possuem melhor sensibilidade à eventuais mudanças na rede em relação a métricas como grau médio dos nós ( $\langle k \rangle$ ) e densidade de trechos ( $q$ ), que não se fundamentam em aspectos e variáveis de grande complexidade. Logo, é importante salientar que pormenores da capacidade de tal métrica serão posteriormente observadas no Item 11.4 que trata do Índice  $I_{GT}$ .

### 11.1.3 Centralidade média de nós ( $C_b$ )

Para os resultados de centralidade média ( $C_b$ ), cujo resultado médio foi de  $3,46E-2$  com desvio padrão de ( $\sigma$ ) de  $6,46E-2$ , o que quando distribuído espacialmente, na Figura 41, abaixo, destaca no setor as áreas de maior centralidade (vermelho). Cabe salientar a presença de uma expressiva área de intensa centralidade relativa ao restante da rede seguido de outras áreas cuja análise visual indica uma maior correlação com condições de vazão em comparação à métrica de grau dos nós.

Figura 41 – Mapa de calor para centralidade média topológica da rede no cenário original.

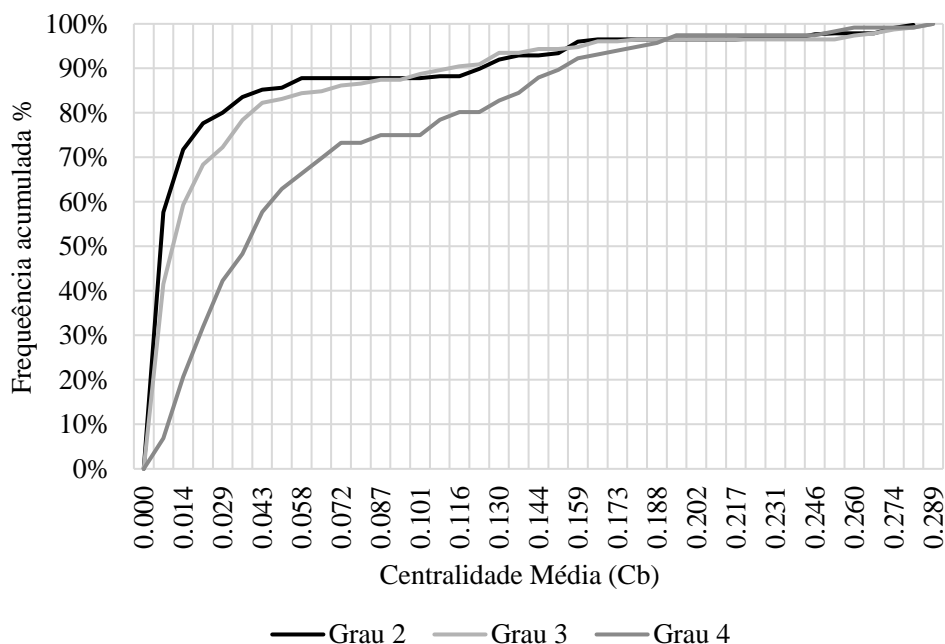


Fonte: Autor (2022)

Diferentemente, para o cenário I os valores de centralidade dos nós foram de  $3,17E-2$  com desvio padrão ( $\sigma$ ) de  $5,98E-2$ , indicando uma redução da ordem de 9 % e 8 % em relação aos valores médios e desvio padrão da rede original, respectivamente. Indicando que houve aprimoramento em relação tanto à redução de nós cuja centralidade e, portanto, vulnerabilidade sejam maiores ao mesmo tempo em que houve a ocorrência de menor discrepância entre do conjunto com a redução da centralidade.

Com base no Figura 42, abaixo, relacionando o grau dos nós com os resultados de centralidade média para os mesmos, é possível inferir a possível não existência de correlação linear entre a conectividade dada pelo grau de um nó com sua respectiva centralidade média.

Figura 42 – Frequência acumulada da centralidade média (Cb) em relação ao grau dos nós no cenário original.

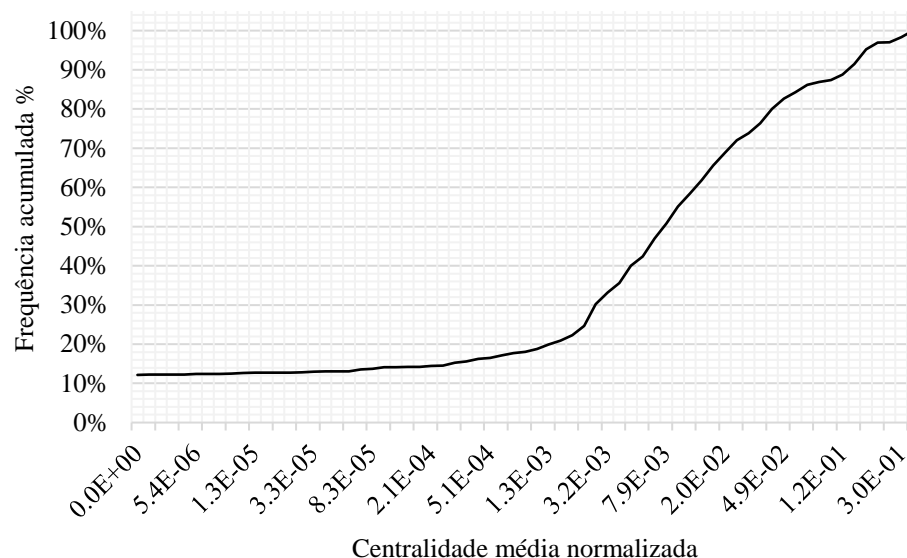


Fonte: Autor (2022)

Contudo, ao observar a correlação de Spearman ( $\rho$ ) entre a dispersão nodal exibida na Figura 42, indica uma correlação de  $\rho \cong 0,59$ . No entanto, é importante destacar que a existência de correlação não implica em causalidade, logo, mesmo havendo correlações, eventuais causalidades entre as variáveis podem tanto não serem diretas, como podem se modificarem em virtude de eventuais mudanças estruturais, topológicas e hidráulicas na rede. Uma melhor compreensão desse possível comportamento poderá ser obtida à medida que se analisarem os resultados dos demais cenários de forma mais detalhada.

Dadas tais ponderações, o conjunto de valores de centralidade média para todos nós da rede é descrito pela Figura 43 com as frequências acumuladas. Nesse, é mais evidenciado a composição de aproximadamente 12 % dos nós da rede cuja centralidade média é zero e cerca de 60% ficando abaixo de  $1,0E-02$ .

Figura 43 – Frequência acumulada dos valores de centralidade média normalizada.

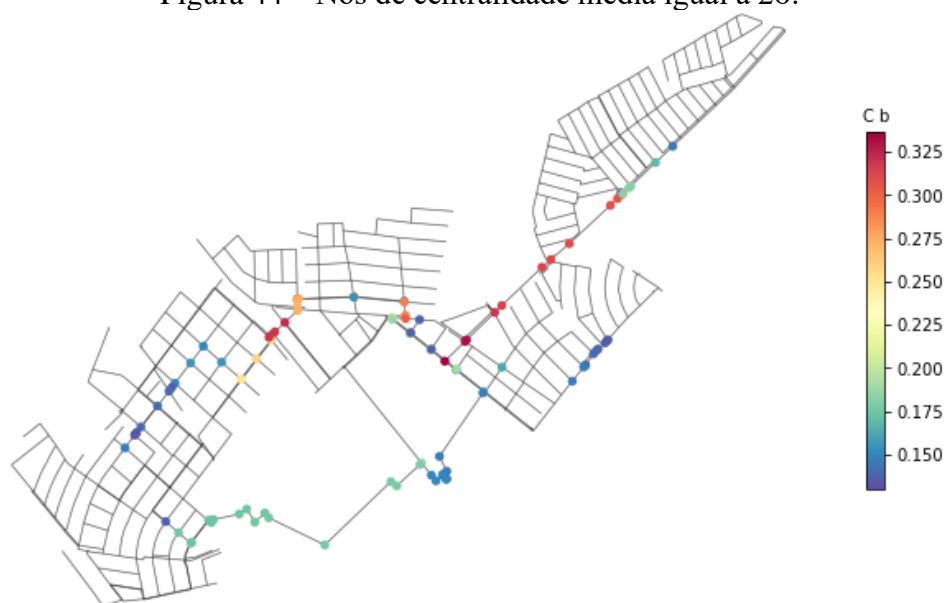


Fonte: Autor (2022)

Tal configuração heterogênea para a centralidade dos nós, evidencia a condição de importância e consequentemente de vulnerabilidade dos elementos de maior centralidade. De acordo com Yazdani; Otoo e Jeffrey (2011), aferições da métrica de centralidade média identificam grande importância, em relação ao contexto topológico, para nós com centralidade aproximada de duas vezes o desvio padrão ( $\sigma$ ) do conjunto. Essa técnica de observação de grandezas cujos valores sejam iguais ou maiores que duas vezes o desvio padrão de uma amostra é também conhecida e comumente aplicada na estatística como regra 68-95-99.7 ou também regra dos três desvios padrões e trata-se de norma empírica estabelecida no princípio de que, em uma distribuição normal de dados, 68 % dos valores encontram-se dentro do desvio padrão; 95 % dos valores estão dentro de um range de duas vezes o desvio padrão e enquanto 99,7% dos valores encontram-se dentro de um range de três vezes do desvio padrão (WOODITCH et al., 2021). Na Figura 44, abaixo, tais vértices foram determinados e expostos de acordo com seu respectivo valor.



Figura 44 – Nós de centralidade média igual a  $2\sigma$ .



Fonte: Autor (2022)

No conjunto de vértices destacados pela Figura 44, um total de 96 vértices foram determinados e é possível perceber por inspeção visual da imagem a existência de padrão de posição destes nós em dentro de trechos específicos na rede. O que de certo modo é dedutível uma vez que o computo da centralidade média parte do princípio de aferição dos caminhos que levam um nó a outro.

A definição de nós de importância significativa adereçada por Yazdani; Otoo e Jeffrey (2011) também foi aspecto de destaque para o trabalho realizado por Herrera; Abraham e Stoianov (2016) que estabelece o índice por centralidade de intermediação. Para esse, diferentemente da determinação de importância dos nós pelo desvio padrão ( $\sigma$ ) do conjunto como estabelecido na Figura 44, nós críticos para o abastecimento também devem ser determinados por aqueles pertencentes aos trechos principais da rede além dos vértices de centralidade média significativas.

Diante desses postulados, é relevante notar os apontamentos de Herrera; Abraham e Stoianov (2016), visto que, na Figura 44, é interessante observar o não englobamento de nós como os adereçados ao trecho da adutora p1p (Figura 31 – Item 10.3.2). Evidentemente que a não observação deles mesmos dentro do específico conjunto de maior relevância não indica que sua importância para a manutenção da resiliência da rede seja dirimível. Por outro lado, os nós de maior relevância presumida com base no desvio padrão expostos na Figura 44 apresentam potencial de aplicabilidade dado seu baixo custo e complexidade de determinação e a

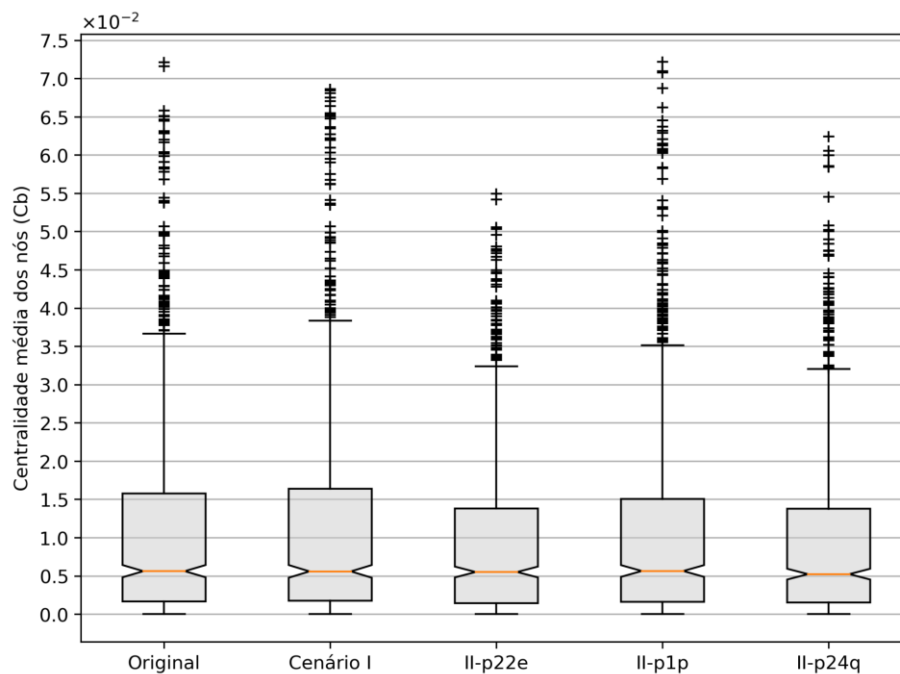
localização dos nós destacados, uma vez que muitos dos mesmos convergem para regiões de localização, por exemplo, dos “trechos ponte”, como o destacado para estruturação do cenário I. Portanto, apesar de preliminar, tais resultados aparentam intersectam-se ao menos parcialmente com algumas condições de estruturais de vulnerabilidade para a rede e o abastecimento indicando assim condições promissoras para estudos futuros mais aprofundados na métrica em específico.

Contudo, observando comparativamente os resultados absolutos entre o cenário original e o cenário I, desconsiderando os nós adicionais desse, nota-se uma diminuição percentual de -10,05% na média e -7,81% no desvio padrão para o cenário I em relação a seu precursor. Esses valores, em termos de gerais, são indicativos da interferência positiva da intervenção ocorrente no cenário I, uma vez que o trecho adicional tendeu a tornar a centralidade média da rede mais homogênea e logo menos propensa a vulnerabilidades pontuais por exemplo. Já em relação aos subcenários do cenário II, em comparação com o cenário original, houveram incrementos esperados nas médias, sendo de 3,64% para II-p22e, 0,89% para II-p1p e 1,79% para II-p24q, enquanto que para as variações de desvio padrão, na mesma sequência de subcenários, as diferenças foram de 22,54%; 1,61%; 6,78%. Esses resultados indicam, *a priori*, uma intensa perturbação na centralidade dos nós da rede principalmente quando isolada a adutora p22e, elemento esse que mesmo tendo a mais significativa alteração nas médias, apresenta uma ainda mais intensa variação no desvio padrão do conjunto de nós, indicando que a propensão da mesma em ser mais sensível tecnicamente à manutenção da rede uma vez que eventos negativos sobre a mesma podem acarretar mais profundas inconsistências dentre a relação de conectividade dos nós da rede.

Na Figura 45, abaixo, são apresentados os conjuntos de centralidade média dos nós para o cenário original, cenário I e os sub-cenários do cenário II. É imprescindível apontar que os dados usados para uma melhor observação dos conjuntos mais expressivos de dados, houve a remoção de pontos extremos (i.e., *outliers*) no limite de 1,5 vezes o terceiro quartil (75%) dos dados. Tal informação acaba por ser de destacada relevância, uma vez que por análise visual alguns conjuntos não expressam fielmente seus resultados, a exemplo do subcenário II-p22e, que, pela figura, poder-se-ia concluir que as mesmas condições mais homogêneas de centralidade até mesmo em relação ao cenário original, o que, como anteriormente apontado, tal subcenário é o que mais apresenta variações em relação ao cenário original. A adoção de uma representação cuja leitura desatenta pode levar a equívocos interpretativos foi adotada

principalmente em virtude da sensível, porém observável variação dos quartis de cada conjunto de dados.

Figura 45 – Centralidade dos nós para o cenário original, cenário I e subcenários do cenário II.



Fonte: Autor (2022)

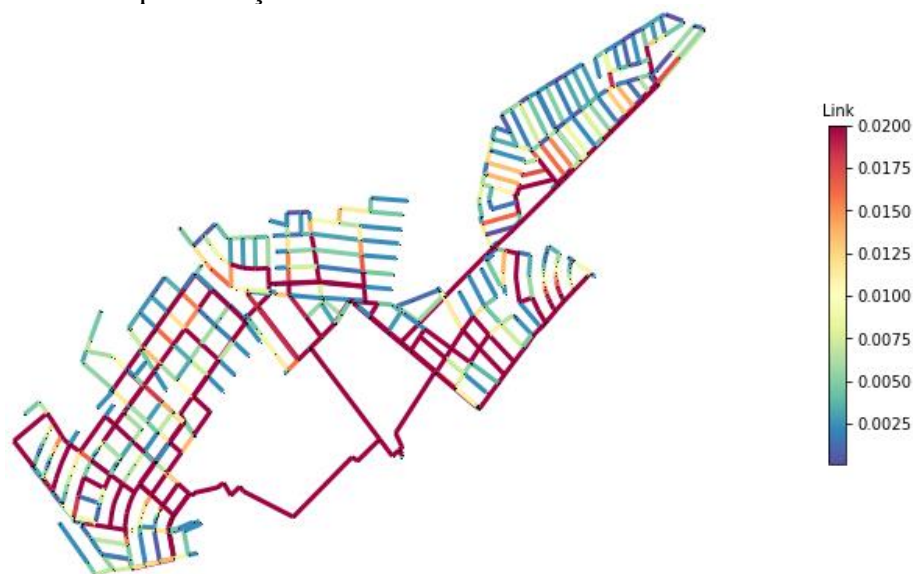
A exemplo, podemos observar na Figura 45 que o cenário I, dentre os dispostos na imagem, é o que apresente maior amplitude para 50 e 75 % de todo conjunto de dados, reiterando novamente a sua maior homogeneidade em termos de centralidade média em detrimento da adição estratégica de um conduto. É possível também, porém de modo mais meticuloso, observar os conjuntos com menor variabilidade também nos quartis de 50 e 75% para os subcenário II-p22e e II-p24q mostrando indícios da maior vulnerabilidade destes trechos para a rede. Contudo, é evidente que diversas variáveis podem contribuir tanto para o comportamento da centralidade média dos nós na rede como para a resiliência da mesma. Condições como a proximidade geodésica do trecho p1p de nós em sua jusante com relativa significativa centralidade na rede não apresentaram tamanha sensibilidade a remoção do supracitado trecho, o que pode-se ponderar eventualmente em condições indeterminadas em relação à conjuntura geral da topologia da rede que permitem eventualmente regiões serem menos propensas à variações de centralidade nos nós mesmo quando trechos de grande influência sobre os mesmos são interrompidos.

Dado o indicativo de relação entre o aglomerado de nós de maior centralidade e situação de cada adutora, pela Figura 45, acima, podemos inferir que a centralidade média pode sim ter sido diretamente influenciada por essas relações espaciais de posicionamento das adutoras.

#### 11.1.4 Centralidade média de trechos ( $C_{eb}$ )

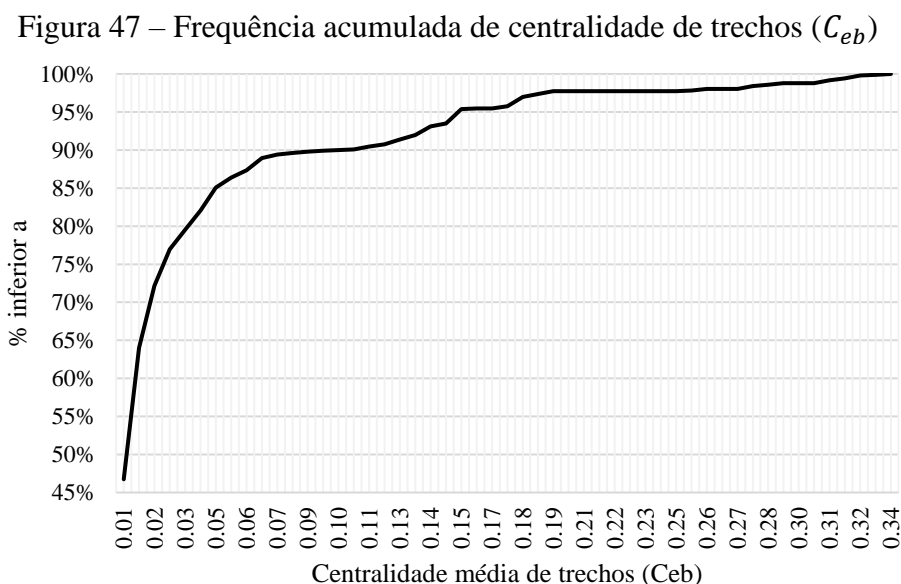
Para a centralidade média de trechos a frequência acumulada no Figura 46 abaixo, é descrita para o cenário original. De acordo com Holme et al. (2002), ao presumir unicamente as definições de centralidade média de nós e de trechos, espera-se que para redes complexas reais haja uma alta correlação entre ambas métricas. Contudo, de acordo com o autor, essa hipótese comumente não se prova correta, uma vez que, a priori, a dedução teórica de ambas as métricas não contam com variáveis não topológicas e, portanto, acabam não tendo capacidade de aferir demais complexidades e dinâmicas ocorrentes no sistema.

Figura 46 – Mapa do traçado de acordo com centralidade média dos trechos ( $C_{eb}$ )



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 47, abaixo, o gráfico de frequências acumuladas para a centralidade média dos trechos é apresentado. Em seu contexto original e sem incremento de atributos hidráulicos ou outros à métrica, temos uma média para centralidade de trechos de aproximadamente  $\mu = 2,96E-2$  com um desvio padrão de  $\sigma = 5,67E-2$ .



Fonte: Autor (2022)

Observando a heterogênea distribuição de centralidade de trechos da Figura 47, em razão do acentuado crescente da curva de frequência acumulada, chegando a, por exemplo, cerca de 70 % do conjunto de trechos com centralidade menor que  $3E-2$ . Com isso, é pertinente o destaque da métrica de razão de pontes (br) anteriormente também destacada.

Logo, diante disso, observando no Quadro 2 e Quadro 3, é evidente que o comportamento da razão de pontes (br), aliado com avaliação de centralidade de nós e trechos permite uma identificação preliminar dos elementos de maior vulnerabilidade em função de sua relevância para a comunicação entre os elementos da rede (HANSEN et al., 2019; WANG et al., 2023). Numericamente, para o caso em estudo, observamos que da rede original para o cenário I temos uma diminuição de aproximadamente 7,9 % no valor da métrica enquanto que para os subcenários do cenário III de 2,5% e 5% temos um incremento de 25,4 % e 65,6 % respectivamente.

Di Nardo et al. (2018b) constatou uma condição interessante de que mesmo após a remoção de uma expressiva quantidade de trechos de menor centralidade (i.e., aproximadamente 20% dos trechos da rede), a condição de caminho médio mais curto, também

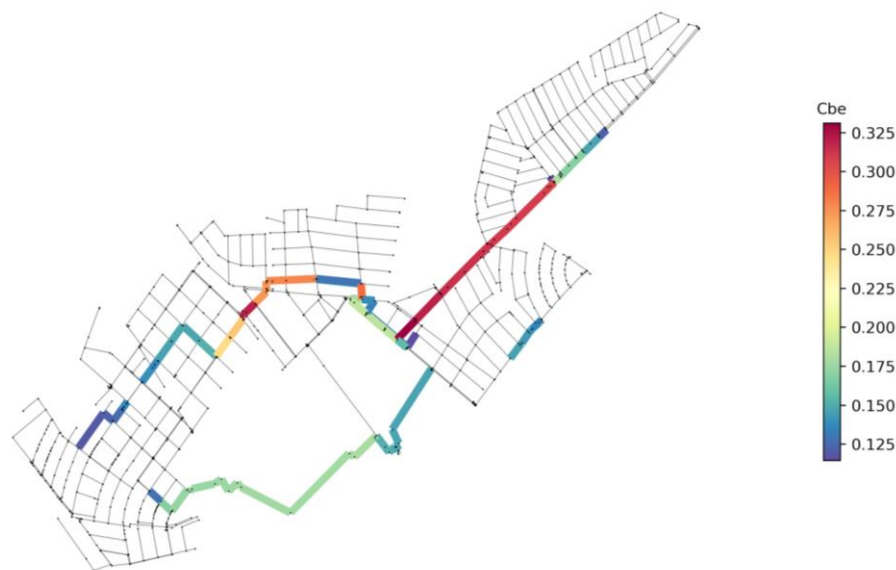
aferidas, não foram comprometidas significativamente até o referido percentual. A inflexão detectada, embora antecipada pelo autor em virtude da metodologia empregada, sugere a capacidade de aferição da centralidade de trechos sobre as condições de redundância na rede. Esta inferência é suportada pelo fato de que os segmentos de maior centralidade tendem a se concentrar na rede primária.

Nesse sentido, Yazdani e Jeffrey (2012a), salientam que, mesmo elementos de características topológicas semelhantes em diferentes redes e condições, podem apresentar comportamentos e consequências profundamente diferentes. Logo, todas conclusões a respeito de similaridades, discrepâncias e comportamentos dos dados e métricas da rede devem ser cautelosas. No sentido do setor de abastecimento analisado no presente trabalho, é possível observar pela distribuição de valores de que há uma evidente heterogeneidade ao longo dos trechos, logo, podem ser considerados indícios de potencial existência de trechos ponte, como já anteriormente evidenciada a presença, caminhos preferencias ou outras condições que eventualmente sejam aferíveis grafologicamente.

Novamente de acordo com Di Nardo et al. (2018b), valores altos de centralidade fora do conjunto para os trechos (i.e., *outliers*) indicam significativa tendência à maior vulnerabilidade dos mesmos haja vista sua exacerbada importância. Sendo, portanto, uma métrica com potencial positivo a respeito de capacidade de ilustração das características amplas e locais de uma rede para aprofundamento das observações e considerações de resiliência.

Partindo do mesmo postulado de Yazdani; Otoo e Jeffrey (2011) anteriormente destacado a respeito da determinação de elementos de maior relevância dentre um conjunto de centralidade média de nós, o mesmo princípio foi aplicado e ilustrado no presente trabalho. Na Figura 48, abaixo, observam-se os trechos cuja centralidade supera em duas vezes o desvio padrão. Na mesma é flagrante a existência dos trechos ponte, de duas das três adutoras que coincidem com as representadas pelos nós apresentados na Figura 44, além disso é notável a existência de um destacamento continuado de trechos iniciando próximo à montante do trecho ponte e seguindo até a região de maior homogeneidade em termos de malha.

Figura 48 – Destaque de traçados com maior significância ( $2\sigma$ ) de acordo com a centralidade de trechos ( $C_{eb}$ ).



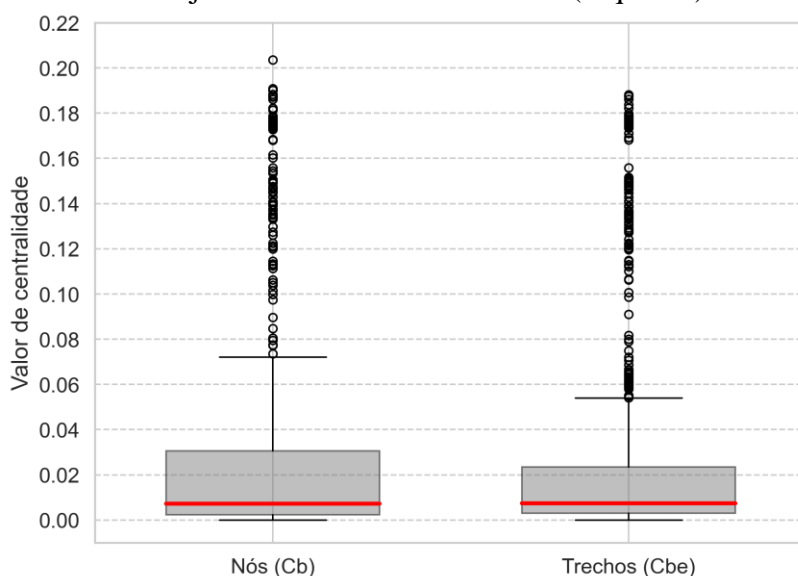
Fonte: Autor (2022)

Tendo em vista essa potencial similaridade com os valores de destaque da centralidade média para os nós e de trechos, realizou-se uma breve correlação de Spearman ( $\rho$ ) aplicando os valores  $C_{eb}$ , cujo resultado se dá por trecho  $m$ , para cada nó de extremidade ao trecho. Diante disso, observou-se  $\rho = 0,67$  o que indica uma correlação moderada entre as duas métricas, porém tal valor não permite inferir nenhuma causalidade que possibilite determinações mais profundas.

Outro aspecto de destaque na Figura 48, cujas particularidades serão abordadas no Cenário II é o destaque para os trechos de adutoras, no qual o trecho p1p novamente não apresentou valor de destaque dentro do range delimitado. Contudo, apesar da baixa discrepância entre estas duas métricas de centralidade há de se apontar a convergência espacial dos resultados, indicando um potencial proveito de tais métricas à resiliência e suas variantes frente evidentemente estudos mais rigorosos de validação. Os resultados para centralidade média de nós e trechos possuem em sua grande maioria, como é possível observar na Figura 49, a maior porção de elementos com limites superiores do intervalo interquartil de aproximadamente 0,07 e 0,05 para centralidade média de nós e trechos respectivamente. Porções expressivas nesses valores indicam uma considerável parcela de elementos com baixa centralidade e, portanto, inversamente indica a existência, como já comentada anteriormente, de elementos com alta centralidade e preferências de caminhos.

Por fim, em uma breve comparação entre ambos conjuntos de centralidade média para a rede em questão, na Figura 49, são expressos parcialmente os quartis de ambos conjuntos de dados observados no qual é mais claramente ilustrada a condição de discrepância dos elementos da rede o que, como já adereçado anteriormente, pode adereçar previamente determinados elementos de maior significância para coesão estrutural da rede e conseqüentemente para resiliência da mesma.

Figura 49 – Gráfico dos conjuntos de centralidade de nós (esquerda) e de trechos (direita).



Fonte: Autor (2022)

Claramente que ao discutir-se as implicações potenciais que o conjunto de valores de centralidades médias do grafo de uma rede complexa real tem sobre sua capacidade de resiliência, há de se levar em consideração a existência de condicionantes basilares a respeito de como se dá a propagação na mesma. Ambas métricas de centralidade, tanto de nós ( $C_b$ ) como de trechos ( $C_{be}$ ), por mais que de natureza exclusivamente topológica, permitem reconhecer primordialmente a configuração das conexões da rede e por decorrência disso apontam tanto potenciais características que, para o abastecimento, representam vulnerabilidades que eventualmente podem não ser destacadas por observações de simulações numéricas ou outras técnicas. Além disso, por representarem a “leitura” das conexões matematicamente, sua aplicação como técnica, *a priori*, preliminar, principalmente em redes de grande extensão e complexidade onde técnicas mais sofisticadas podem ter altos custos e necessitar aquisição demasiada de dados, perspectivas topológicas podem ser uma alternativa de alta viabilidade (HESARKAZZAZI et al., 2021; NEWMAN, 2005).



### 11.1.5 Coeficiente de malha ( $R_m$ ), assortatividade ( $\Gamma$ ) e diâmetro do grafo ( $D$ )

Para o coeficiente de malha da rede ( $R_m$ ) expostos no Quadro 2 e Quadro 3 e considerando como base valores as estimativas de  $R_m \approx 0,009$  para redes totalmente ramificadas e  $R_m \approx 0,211$  para redes malhadas em totalidade (BUHL et al., 2006), podemos observar que para o cenário original de  $R_m = 1.032516E-01$ , tenhamos uma rede com maiores propensões globais a condições de topológicas de redundância. Observando o cenário I, cujo princípio baseou-se na mitigação da criticidade de um trecho ponte, o valor de  $R_m = 1.049972E-01$ , indicando um virtual incremento nas condições da rede no cenário I possivelmente evidenciando a não interferência geral na rede pelo trecho adicionado em tal cenário.

Quanto aos subcenários p22e, p1p e p24q, os valores para  $R_m$  foram de 1.037464E-01; 1.027984E-01 e 1.033889E-01 respectivamente. Mesmo com as pequenas variações em relação ao cenário original, há de se destacar o resultado para p22e e p24q, onde o resultado apresentou um leve incremento, essas anomalias salientam, primeiramente, a importância do conhecimento da natureza do problema a ser observado por perspectivas topológicas. Dada a relação entre trechos ( $m$ ) e nós ( $n$ ) presente na equação de coeficiente de malha há presente dissonância tem princípio na quantidade de trechos e nós componentes de cada uma das adutoras. Diante disso, a observância da razão trecho-nó ( $e$ ) elucidada e corrobora com tal resultado, visto que a métrica trabalha com valores absolutos de elementos, para a condição apresentada, em virtude de as adutoras estarem, em modelo, particionadas de maneira que o isolamento de suas tubulações implique em valores de trechos e nós com razões maiores que o cenário original. A ocorrência de tal resultado expressa a necessidade de cautela ao aferir tais valores, mesmo que em termos de observação de variações com decréscimo ou acréscimo de elementos a rede os resultados raramente tendem a expressar dissonâncias como a observada, é imprescindível o reconhecimento da possibilidade de tal incorrência na análise de redes de abastecimento de água (BUHL et al., 2006; GIUDICIANNI et al., 2018).

A assortatividade ( $\Gamma$ ), por sua vez, em relação à estruturação das redes de distribuição de água em termos de redes complexas e grafos direcionados de acordo com Foster et al. (2010) e Zhou et al. (2018) redes reais (i.e., infraestruturas sistêmicas de comunicação físicas), incluindo as redes de água, tendem a ser disassortativas ( $\Gamma < 0$ ), isto é, nós de mesma característica possuem maior probabilidade à ligarem-se à nós de características diferentes. Diante disso, para os resultados encontrados no presente estudo, observaram-se condições

assortativas ( $\Gamma > 0$ ) porém de fraca intensidade ao considerar que o range tem limiares de  $[-1, 1]$ . Logo mesmo com variações indo de  $1,77E-2$  para o cenário original, sutilmente aumentando para  $2,27E-2$  no cenário I ou chegando a  $5,31E-3$  e  $6,74E-3$  para o instante 10AM nos subcenários 2,5% e 5% do cenário III respectivamente, não existem indicativos robustos para embasar uma boa sensibilidade da métrica para resiliência em redes de distribuição de água.

O diâmetro da rede (D), por sua vez, pode indicar a existência de propensões maiores ou menores de difusão de um contaminante, por exemplo, dentro da rede. Em termos de redes de abastecimento de água, quanto menores os valores para o diâmetro da rede, visto que indicam o quão mutuamente os nós da rede são alcançáveis, e considerando fatores como centralidade, pode inferir uma melhor capacidade de distribuição ao longo da rede e consequências mais brandas em caso de falhas em nós de relativa maior vulnerabilidade (YAZDANI; JEFFREY, 2012c). No caso em estudo, para o cenário original temos um valor de 78, variando significativamente para mais no caso do subcenário p22e do cenário II para 81 e nos subcenários 2,5% e 5% do cenário III com valores, respectivamente, de 85 e 96 no instante 10AM. Como base de comparação, as análises de Ponti et al. (2021), Zhou et al. (2018) e Yazdani e Jeffrey (2012b) foram utilizados nos quais os autores observam redes com características topológicas (i.e., grau médio dos nós, densidade de trechos e razão trecho-nó). Tal comparação, apesar de não poder ser definitiva em virtude da existência de particularidades inerentes à cada rede, indicam que os valores encontrados para o presente caso são adequados tendem a indicar uma boa condição para as condições de robustez da rede. Contudo, para a métrica de diâmetro da rede (D), é pertinente salientar que a quantidade de trechos influencia em seu resultado. Procedimentos como a eskeletonização, não efetuado no presente estudo, podem influenciar nos resultados, uma vez que o diâmetro da rede (D) se baseia essencialmente no menor número de trechos entre um nó a outro.

### 11.1.6 Métricas topológicas espectrais

Dos valores referidos como métricas espectrais e contemplados no Quadro 2 e Quadro 3, a autolacuna ( $\Delta L$ ) ou eigengap é uma métrica de observação para verificação de otimização de possíveis clusters ou agrupamentos dentro da rede. Para o cenário original o resultado foi de  $4,01E-4$ ,  $5,94E-4$  no cenário I e chegando à  $3,60E-4$  no cenário III-5% (10AM). Dados esses que, em contraponto aos contemplados na literatura, não possuem uma variação significativa suficiente para uma determinação segura de particionamento ou não da rede.

Por sua vez, o raio espectral ( $1/\lambda_1$ ), há similaridade com os valores observados para diversas redes semelhantes destacadas por Giudicianni et al. (2018) (Anexo A). Além disso, a baixa variabilidade de resultados para o raio espectral em redes de abastecimento de água indica, a priori, que mesmo que a rede de distribuição aumente, o raio espectral tende a não apresentar variação. Essa inferência pressupõe que, mesmo com o aumento da rede, a velocidade de disseminação de um contaminante de um ponto a outro na rede não se alterara. Seguindo a mesma lógica, considerando o raio espectral ( $1/\lambda_1$ ) uma métrica da capacidade de disseminação e velocidade de transmissão de fluxo dentro de uma rede. Considerando o valor obtido para o cenário original para o raio espectral ( $1/\lambda_1$ ) de 0,299 e submetendo-o à relação geral de  $\langle k \rangle \leq \lambda_1 \leq \max(k)$  temos a condição de  $\lambda_1 \cong 3,344$ , o que de acordo com premissas destacadas por Arsic et al. (2012) à respeito do raio espectral sobre a dispersão de vírus em redes de computadores por exemplo, permite indicar, quanto menor o valor, maior a robustez da rede em relação à disseminação do vírus sobre a rede. De modo análogo pode-se conceber, preliminarmente, que valores baixos de tal valor para redes de abastecimento de água podem ser positivos em termos de disseminação de contaminantes por exemplo como apontado, por exemplo, por Giudicianni et al. (2018), Santonastaso et al. (2018) e Yang e Wang et al. (2003). Tais autores observaram inviabilidade do raio espectral em relação ao tamanho da rede indicando que a métrica tem íntima relação com dinâmicas de percolação na rede e, portanto, ligadas fortemente a características de eventuais substâncias contaminantes e velocidade da água por exemplo.

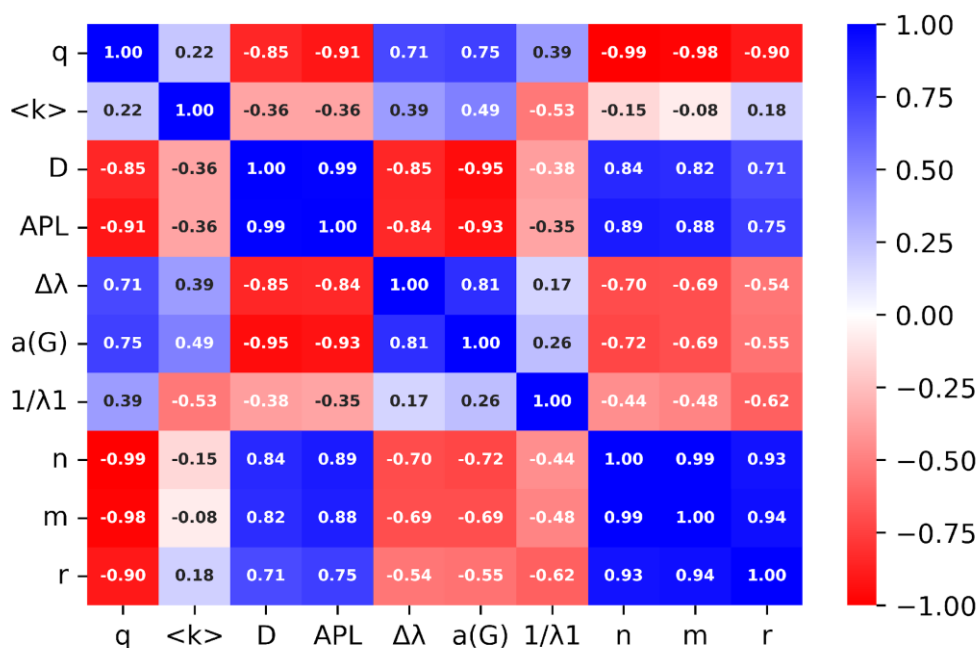
Verificando a densidade de trechos e grau médio de nós das redes tomadas como comparativo tem-se, por exemplo, uma leve melhora relativa em tal valor. Contudo é importante destacar a baixa sensibilidade da mesma, uma vez que nos subcenários III as variações não demonstram grandes divergências de um valor razoável, logo não sendo uma métrica adequada

para fins de avaliação de condições falha, per se, e sim de difusão de contaminantes e outros ao longo da rede.

Para as métricas topológicas espectrais de caracterização de redes complexas apresentadas no Quadro 2 e Quadro 3, os valores aferidos quando contrastados com valores observados na literatura tanto para redes reais como fictícias principalmente nas avaliações realizados por exemplo por Di Nardo et al. (2017a), Giudicianni et al. (2018) e Santonastaso et al. (2018), demonstram incongruências principalmente no que concerne à observação do comportamento do processo de falha da rede (Cenários II e III).

Na Figura 50 uma matriz com correlações de Spearman entre cada elemento de um conjunto de 44 redes de abastecimento reais e sintéticas (Vide Anexo A), utilizadas por Giudicianni et al. (2018) em sua análise de relações de métricas topológicas e traçado de rede. Há de se destacar que a coluna referente à valores de número ótimo de clusters ( $C_{opt}$ ) da tabela do Anexo A não foi considerada dentro da presente análise principalmente em virtude de que as métricas analisadas pelo escopo do presente estudo não contemplam diretamente métricas de determinação de *clusters* dentro da rede. Tal decisão foi tomada principalmente e função do relativo pequeno tamanho da rede em estudo, sendo o mesmo se tratando de um setor pertencente à uma rede maior, e da grande diversidade encontradas na literatura a respeito de metodologias de clusterização de grafos, muitas delas também aplicadas às redes de abastecimento de água, ficando assim tal métrica como mais um elemento em potencial para futuros estudos.

Figura 50 – Matriz de correlação de aferições topológicas de variadas redes reais e sintéticas.



Adaptado de: (GIUDICIANNI et al., 2018)

Métricas como conectividade algébrica ( $a(G)$ ), quanto maiores forem seus valores, mais difícil será a sua fragmentação, nesse sentido, observando os valores para cenário original em comparação com, por exemplo, o cenário I ( $a(G) = 9,84E-3$ ), observamos que se constitui uma condição desfavorável para o último, enquanto que o cenário original ( $a(G) = 1,19E-2$ ), até mesmo em comparação à alguns valores do Anexo A (i.e., na tabela do Anexo A, a conectividade algébrica é definida pelo símbolo  $\lambda_2^L$ ), tem uma conectividade algébrica relativamente positiva em termos de estruturação e resistência à fragmentação.

Quanto a lacuna espectral ( $\Delta\lambda$ ), apesar de Giudicianni et al. (2018), ter observado valores aleatórios em relação ao tamanho da rede, com uma virtual tendência da métrica em relação ao aumento da rede. A pouca variação ao longo do cenário I e II para  $\Delta\lambda$  indica que o número de caminhos como um todo dentro da rede não foi alterado, enquanto que nos cenários III temos uma taxa descendente para a métrica com exceção do instante 10 AM para III-5%, o que indica supostamente que a fragmentação do grafo foi profunda o suficiente para alterar as condições de estrutura da rede à ponto de modificar a matriz de adjacência e a matriz Laplaciana (ESTRADA, 2006; YAZDANI; JEFFREY, 2010).

De acordo com Giudicianni et al. (2018), as métricas espectrais de raio espectral ( $1/\lambda_1$ ) e lacuna espectral ( $\Delta\lambda$ ), para redes grandes ( $\langle k \rangle \sim 4$ ), possuem alta aleatoriedade, com seus resultados comumente ficando entre redes malhadas e redes randômicas. Na Figura 50 acima, a matriz permite a verificação dos postulados recentemente descritos bem como de outras condições de relações que eventualmente possam vir a compor uma estratégia de determinação de resiliência robusta. As condições de baixa correlação observáveis nas métricas de grau médio dos nós e raio espectral, por exemplo, pode decorrer da condição da baixa sensibilidade à maiores quantidades de aspectos da rede em relação à outras métricas, cujo resultado tende a ser mais sensível à uma quantidade maiores de outros parâmetros. Contudo, há de se notar também as consideráveis correlações fortemente negativas e positivas, a título de exemplo da relação do diâmetro (D), caminho médio mais curto (APL), lacuna espectral ( $\Delta\lambda$ ) e entre outros aspectos grafológicos associados ao número de nós (n) e de trechos (m), cuja relações são extensamente estudadas por Arsic et al. (2012), Donetti; Hurtado e Munoz (2005), Idiyatullin et al. (2006), Yazdani e Jeffrey (2010) entre outros.

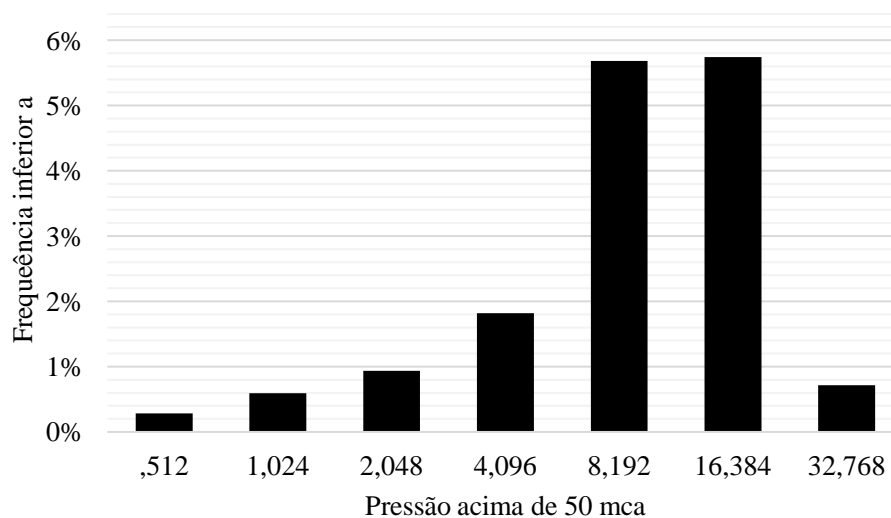
Como se pode observar nos Quadro 2 e Quadro 3, as métricas espectrais não possuem tamanha sensibilidade quanto as métricas topológicas comuns, isto ocorre muito provavelmente em virtude de alguns princípios que indicam a menor sensibilidade e maior aleatoriedade em relação aos valores obtidos para as métricas espectrais em sistemas isolados, e que tais métricas possuem melhor adaptabilidade quando implementados como parâmetros em algoritmos de otimização (DONETTI; NERI; MUÑOZ, 2006).

## 11.2 ÍNDICE DE TODINI ( $I_R$ )

### 11.2.1 Cenário original

Para o índice de Todini, considerando a sua estreita relação com as condições de excedente energético ao longo da rede, cabe salientar, logo, a sua conseqüente relação com as condições técnicas máximas para pressões dinâmicas de segurança (ABNT, 2017). Desse modo, analisando previamente a existência de pressões acima das máximas de 400 a 500 kPa dentro da rede, foram as mesmas determinadas e descritas na Figura 51, abaixo.

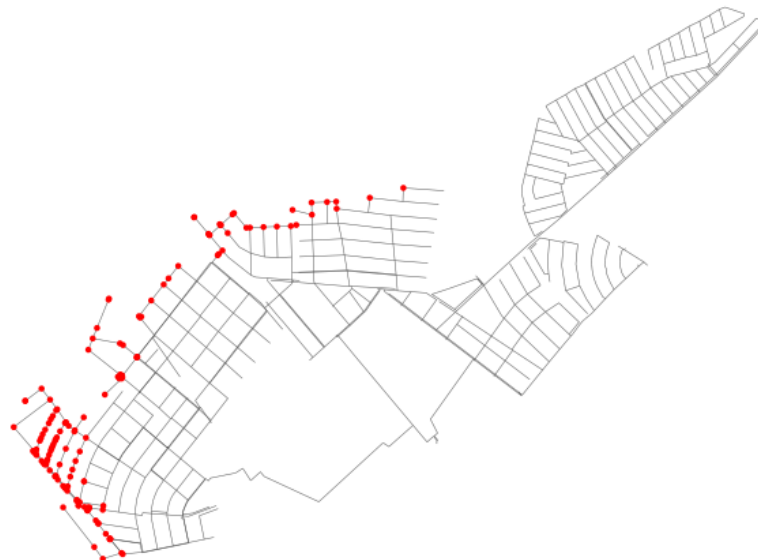
Figura 51 – Frequência e magnitude das pressões excedentes na rede.



Fonte: Autor (2022)

Dado o comportamento observado na Figura 51, há a presença de aproximadamente 16 % de todos os instantes (horas) de modelagem, existem nós cujas pressões superam em alguma magnitude 50 mca. Na Figura 52, abaixo, é destacada a localização dos nós com pressões excedentes na rede.

Figura 52 – Localização dos nós com pressões em excesso.



Fonte: Autor (2022)

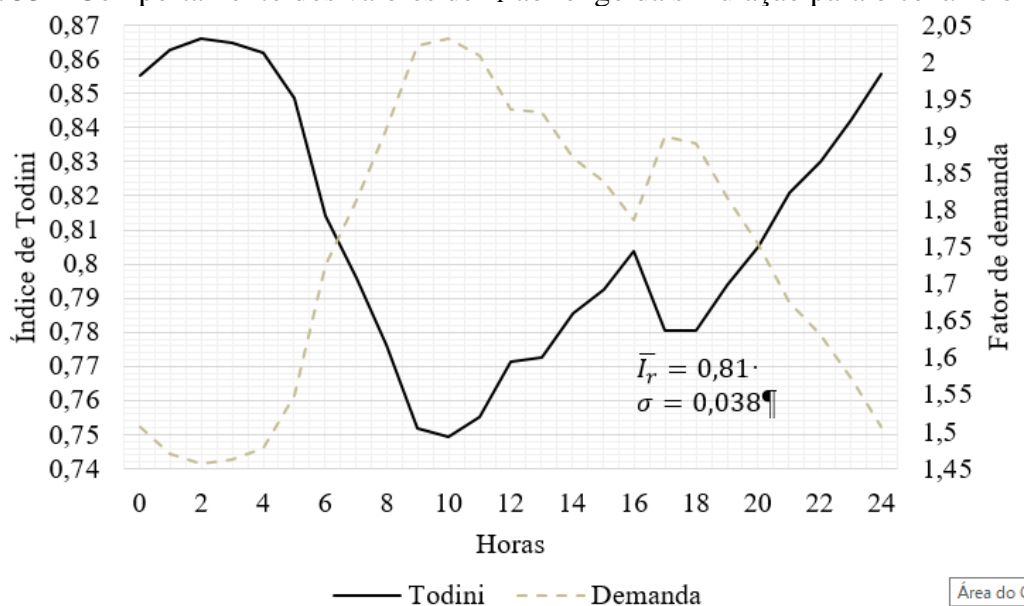
Como observado na Equação (16 (Item 4.1.1) que descreve os pormenores da estrutura da métrica do índice do presente índice, as variáveis submetidas são da ordem de variação horária e, portanto, o índice permite a observação de um valor específico para cada instante da modelagem. Esse comportamento, dado em intervalos horários, é descrito pela curva da Figura 53, abaixo e atinge seu valor máximo as duas horas da madrugada ( $I_{(T,2AM)} = 0,823$ ) e mínimo as dez horas da manhã ( $I_{(T,2AM)} = 0,749$ ). Evidentemente que com tais verificações constata-se ainda mais a forte dependência desse índice a condições energéticas e hidráulicas da rede, que em termos de aferição de resiliência, possui importante relevância, mas em virtude da profunda complexidade e diversidade de variáveis de possível interferência, não possui capacidade de entendimento amplo sobre as condições do abastecimento e sua resiliência.

Retomando as observações propostas por Todini (2000) para a aferição de um índice de falha (If), descrito na Equação (17 (Item 4.1.1). Para o presente cenário, onde não se encontram alterações aplicadas ao modelo, o resultado final para o índice de falha foi de  $If = 4,99E-7$ . O autor indica que tal índice adicional, possibilita tanto a sua implementação como grandeza limítrofe em eventuais técnicas de otimização como métrica para observação do comportamento geral da rede diante de eventos de falha de tubulações.

Na Figura 53, a curva de comportamento do índice de Todini foi agregada ao comportamento do fator de demanda ao longo do dia. Ao comparar o índice  $I_r$  de 0,81 para o cenário original e considerando o range do método de  $[0,1]$ , o resultado obtido para a rede demonstra ser extremamente satisfatório. Muito provavelmente em detrimento das condições geográficas que permitem, a depender da posição do reservatório, a existência de pressões de serviço favoráveis. Hipótese que de certo modo pode ser extrapolada para uma boa parcela das redes de abastecimento de água brasileiras. Ao observar uma correlação de Spearman entre as duas, aferiu-se numericamente a forte correlação negativa entre ambas ( $\rho = -0,999$ ).



Figura 53 – Comportamento dos valores de  $I_T$  ao longo da simulação para o cenário original.

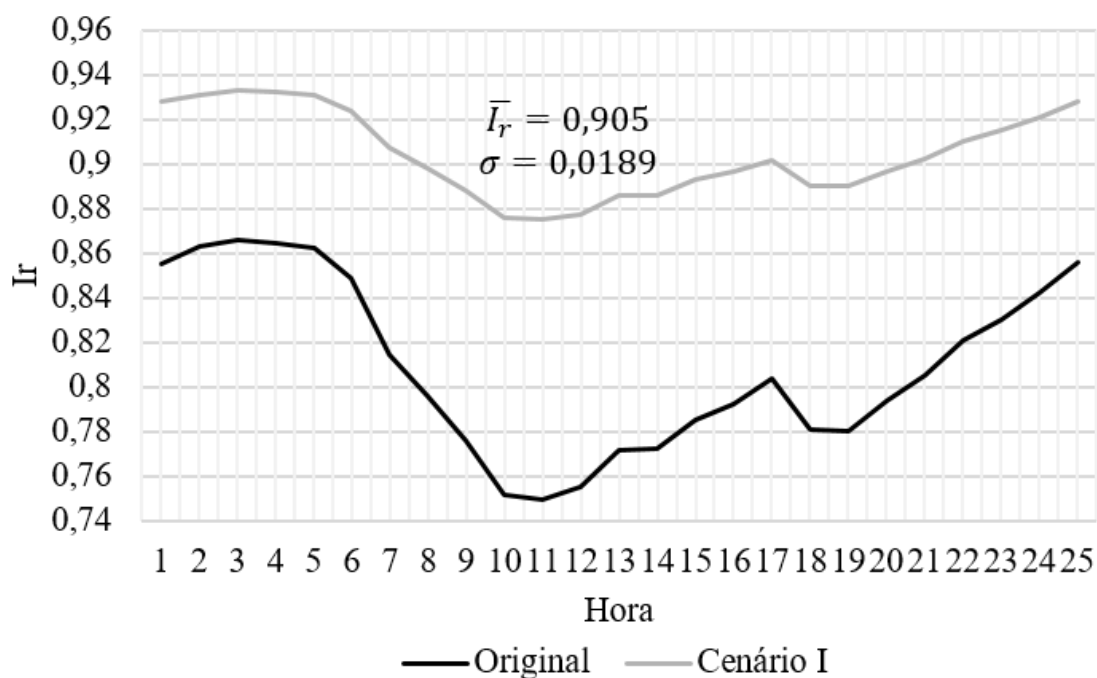


Todini (2000) utiliza dos princípios energéticos da rede em um procedimento de otimização de análises de minimização custos ante a maximização da disponibilidade energética de modo a extrapolar a unicamente o conceito de resiliência dada pelo índice. Logo, mesmo com as limitações destacadas anteriormente frente ao contexto de resiliência, a técnica, em sua completude, possui um arcabouço robusto que tange conceitos fora do escopo específico do presente trabalho, o que justifica a implementação parcial da técnica no presente trabalho.

### 11.2.2 Cenário I

Na Figura 54, o comportamento para o cenário I com  $I_r$  de 0,90 para o índice, indicando um incremento nas condições satisfatórias de resiliência de acordo com o índice. Resultado que já indica que a introdução de um trecho PA ao principal trecho ponte da rede permitiu também a obtenção de um “alívio” energético ao longo da rede e de que o índice foi capaz de detectar a existência dessa inserção.

Figura 54 – Comportamento horário do Índice de Todini para o Cenário I e Original.



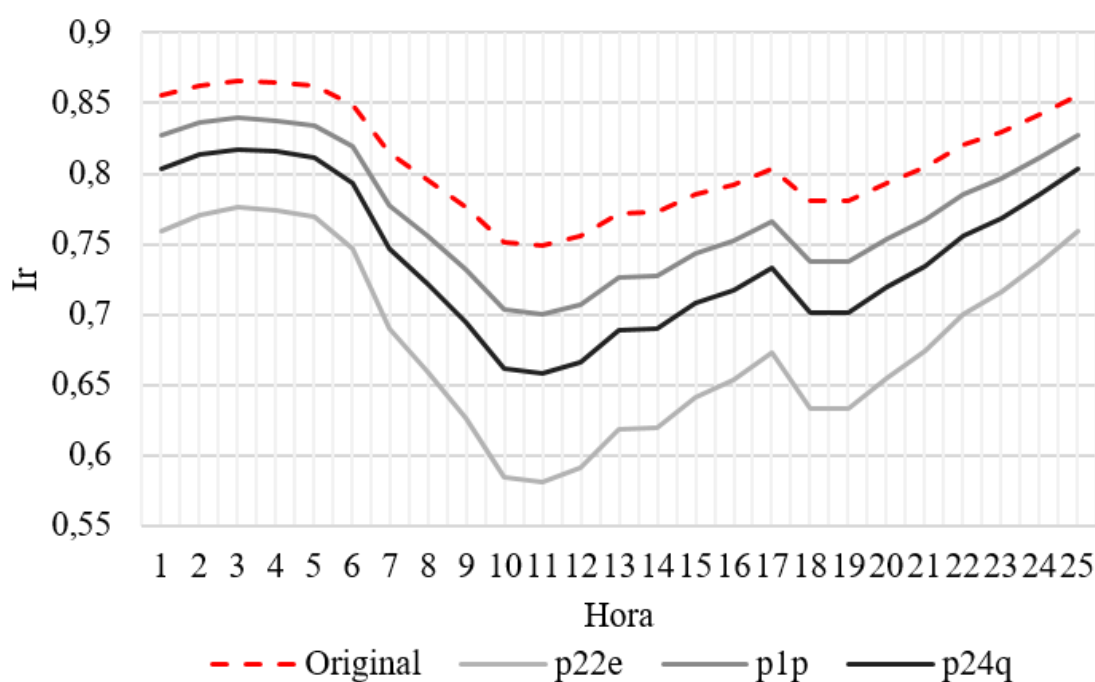
Fonte: Autor (2022)

É importante destacar que, mesmo com a relativa capacidade e sensibilidade observada com a aplicação do método de Todini em relação à, diversas condições já foram adereçadas e até mesmo complementadas ao método, como por exemplo o método de Jayaram e Srinivasan (2008), que implementa a capacidade da aferição diante da existência de dois reservatórios na rede e também é implementado ao Pacote WNTR (Item 4.2.2). Além disso, notam-se determinadas limitações em relação ao método sendo uma delas a captura de condições locais, ou seja, incapacidade de determinação de elementos específicos dentro da rede e sua importância para a resiliência.

### 11.2.3 Cenário II

Para os subcenários do cenário II, na Figura 55 é possível observarmos que a remoção das adutoras tem consequências de magnitudes diferentes para as condições energéticas de resiliência da rede, porém não permitem a admissão de interpretações em relação a posição de cada uma em relação à rede por exemplo.

Figura 55 – Comportamento horário da resiliência no modelo de acordo com o Índice de Todini ( $I_r$ ) para os subcenário do Cenário II e Original.



Fonte: Autor (2022)

Sendo que, na Figura 55, o trecho II-p22e tem  $I_r = 0,68$  e  $\sigma = 0,064$ , em termos de situação esse é o elemento que direciona o abastecimento para as porções cuja altimetria é mais deprimida, indicando a dependência do índice às condições de pressões elevadas na rede. Uma vez que a remoção do trecho p22e dirimiu as pressões mais elevadas de ocorrerem. Já para a adutora II-p1p os valores de  $I_r = 0,77$  e  $\sigma = 0,045$ , enquanto que para a adutora II-p24q os resultados foram de  $I_r = 0,74$  e  $\sigma = 0,052$ . A diferença entre tais resultados é razoavelmente pequena e ainda assim consiste em um valor aceitável de resiliência considerando o intervalo  $[0,1]$  que os valores do índice se encontram sendo quanto mais elevados os resultados, mais energia disponível a superar impactos negativos na rede. Sendo que, nos termos presentes, e perpassando valores observados por diversos autores em estudos utilizando a métrica, como os

encontrados por Di Nardo et al. (2014), Dziedzic e Karney (2016), Greco; Di Nardo e Santonastaso (2012) e Prasad e Park (2004).

### 11.2.4 Cenário III

Na Figura 56, podemos observar que o subcenário III-2,5% teve uma virtual alteração em relação ao cenário original, ficando levemente menor nos instantes de falha e de gradual retomada do funcionamento das tubulações.

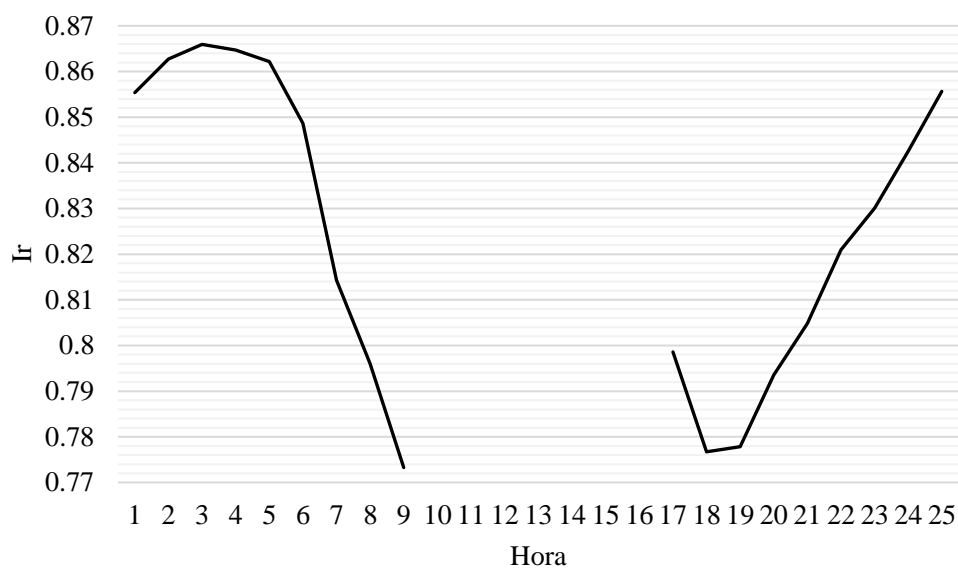
Figura 56 – Comportamento horário da resiliência para os instantes de incremento de falha de acordo com o Índice de Todini para o subcenário de 2,5% do cenário III.



Fonte: Autor (2022)

A ocorrência branda observada na Figura 57 diverge profundamente das condições observadas para o subcenário de III-5% exposto na Figura 57. Em casos como os subcenários do cenário III, Farmani; Walters e Savic (2005) aponta que o índice de Todini não é capaz de resolver todas as nuances envolvendo eventos de falhas em virtude de que o método foi desenvolvido para determinação de condições energéticas essencialmente em redes de grande porção malhada.

Figura 57 – Comportamento horário da resiliência de acordo com o Índice de Todini para cada instante de falha do subcenário de 5% do cenário III.



Fonte: Autor (2022)

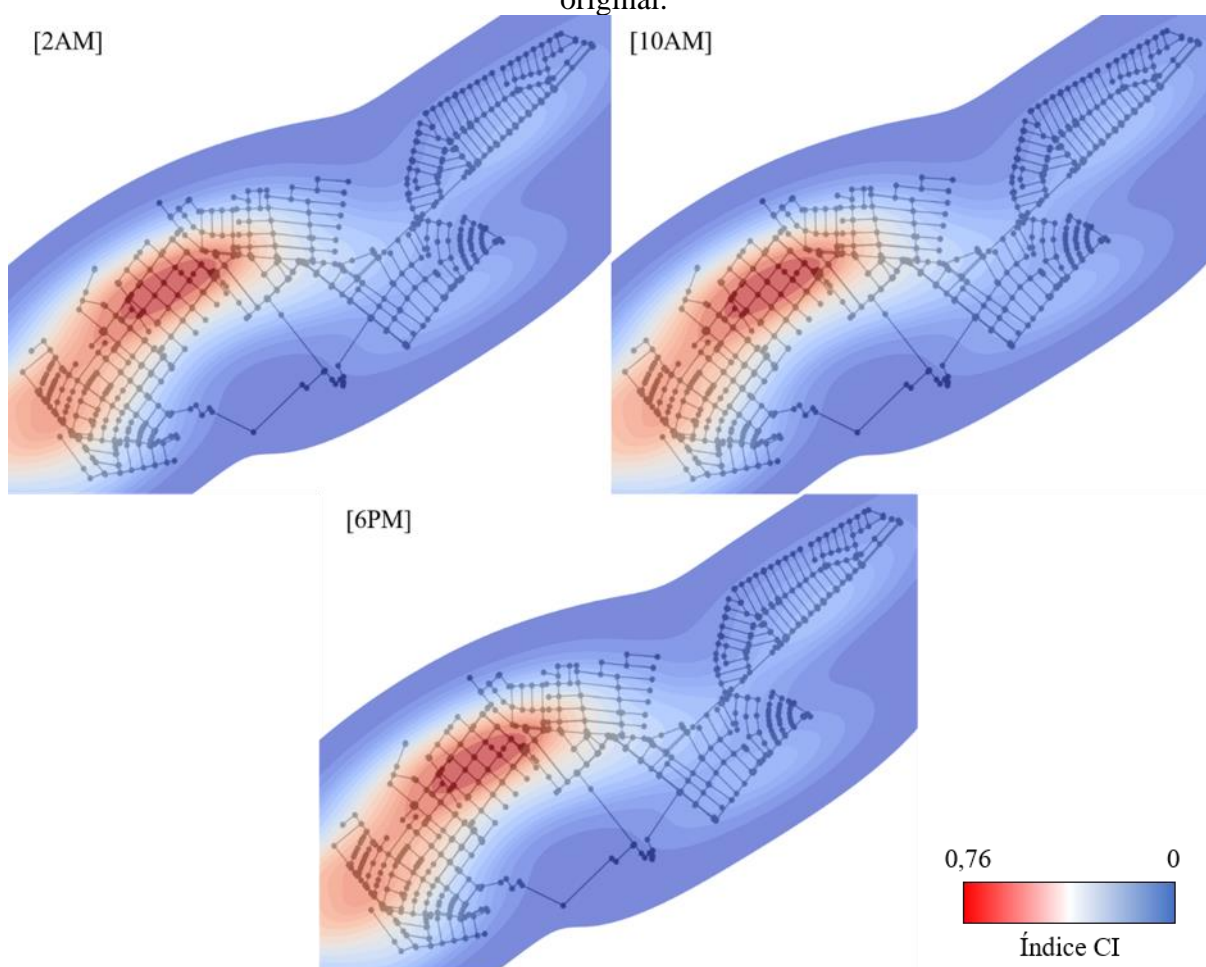
O apontamento de Farmani; Walters e Savic (2005) recém comentado é adequado ao ocorrente na Figura 57, onde horários de valores expressivamente negativos (i.e., removidos por motivos de visualização gráfica), indicando até mesmo o parâmetro de pressão limiar de 10 metros não fora superado para o devido abastecimento da rede de acordo com os padrões normativos técnicos. Logo, esse comportamento expressa de certo modo uma limitação do método em relação à sua capacidade de determinar as condições ocorrentes e as consequências destas. Mesmo não havendo a determinação exata das condições de cada tubulação em falha em cada instante, o presente método acaba por não permitir tal aferição (JAYARAM; SRINIVASAN, 2008).

## 11.3 ÍNDICE DE CENTRALIDADE DE INTERMEDIACÃO

### 11.3.1 Cenário original

Para o método de centralidade de intermediação com vazões agregadas, observaram-se, para o cenário original, na Figura 58, uma evidente similaridade nos agrupamentos de maior centralidade com os observados na Figura 41, contudo uma menor grandeza para nós localizados nos quadrantes direitos da rede.

Figura 58 – Centralidade média com dados de vazão média diária agregados do cenário original.



Fonte: Autor (2022)

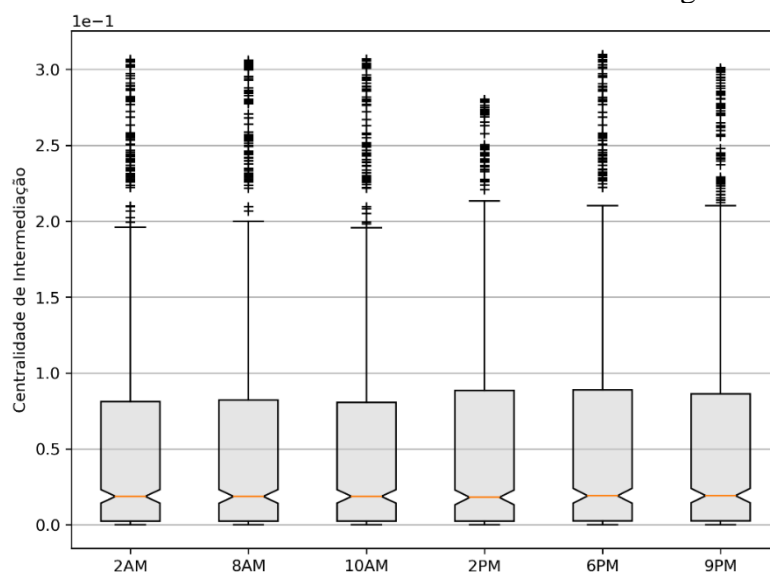
Realizando, preliminarmente, uma comparação com a aplicação realizada por Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017a) também foram possíveis observar o potencial para o agrupamento em termos de importância topológica e hidráulica na rede, mesmo

havendo, neste cenário original em questão, variações relativamente baixas. Contudo, na Figura 95, é possível observar que o índice CI (Centralidade de Intermediação) apresentam o mesmo coeficiente de variação (CV) para os resultados nos horários 2AM e 8AM, e uma maior variação no horário de pico de demanda 10AM, seguido de quedas menores que os dois primeiros horários nos instantes 6PM e 9PM.

Considerando que o método é fundamentado na ponderação da centralidade média de cada nó pela vazão específica ocorrente em um dado instante, é evidente que variações ocorrerão. No entanto, também é observável que para uma condição normal de operação, no traçado observado, é possível unicamente a priori, determinar uma região específica do setor que é cuja importância nos termos da métrica é relevante. Estando regiões, por exemplo, cuja vulnerabilidade em virtude da estrutura de traçado é evidente, com importância não devidamente expressa. Condição essa que foi aferível pela observação somente da centralidade média (Figura 41) e centralidade média de trechos (Figura 47) por exemplo.

Para verificar eventuais discrepâncias com mais refino, na Figura 59 estão dispostos os quartis com concentração de valores para o índice ao longo de seis instantes determinados com base nos horários de maior interesse quanto à demanda na rede, como instante de 2AM, de menor demanda; 10AM de maior demanda e pico de trechos isolados no caso do cenário III. Quanto aos resultados ilustrados pelos *boxplots* na Figura 59 podemos observar uma leve redução de *outliers* no instante 2PM dados o sensível aumento no indicador de seu terceiro quartil. Sendo que a mediana se predomina ao longo dos instantes observados em torno de  $0,02E-1$ . Considerando as prerrogativas do método, essas alterações na centralidade de intermediação são fundamentalmente derivadas das dinâmicas de alterações espaciais de demanda ao longo da rede, que alteram o fluxo ao longo dos trechos e por consequência sua condição de centralidade. Destaca-se assim caráter oscilativo da métrica ao longo do tempo, principalmente quando atreladas à aspectos de tal natureza, como demanda. Tal condição, enfatiza novamente o caráter complexo de determinação da resiliência em redes de abastecimento, uma vez composta por elementos variáveis temporal e espacialmente.

Figura 59 – Quartis de concentração de valores de centralidade de intermediação para instantes horário de maior interesse no cenário original.



Fonte: Autor (2022)

Nos quartis e seus valores atípicos exibidos na Figura 59, observam-se variações sutis entre 2AM, 8AM e 10AM. Considerando primeiramente que a centralidade média não sofreu alteração ao longo dos instantes observados visto que a mesma se condiciona também as condições de vazão ao longo dos trechos, no caso em questão, podem-se dizer que a mesma teve status de condicionante para as eventuais variações da métrica.

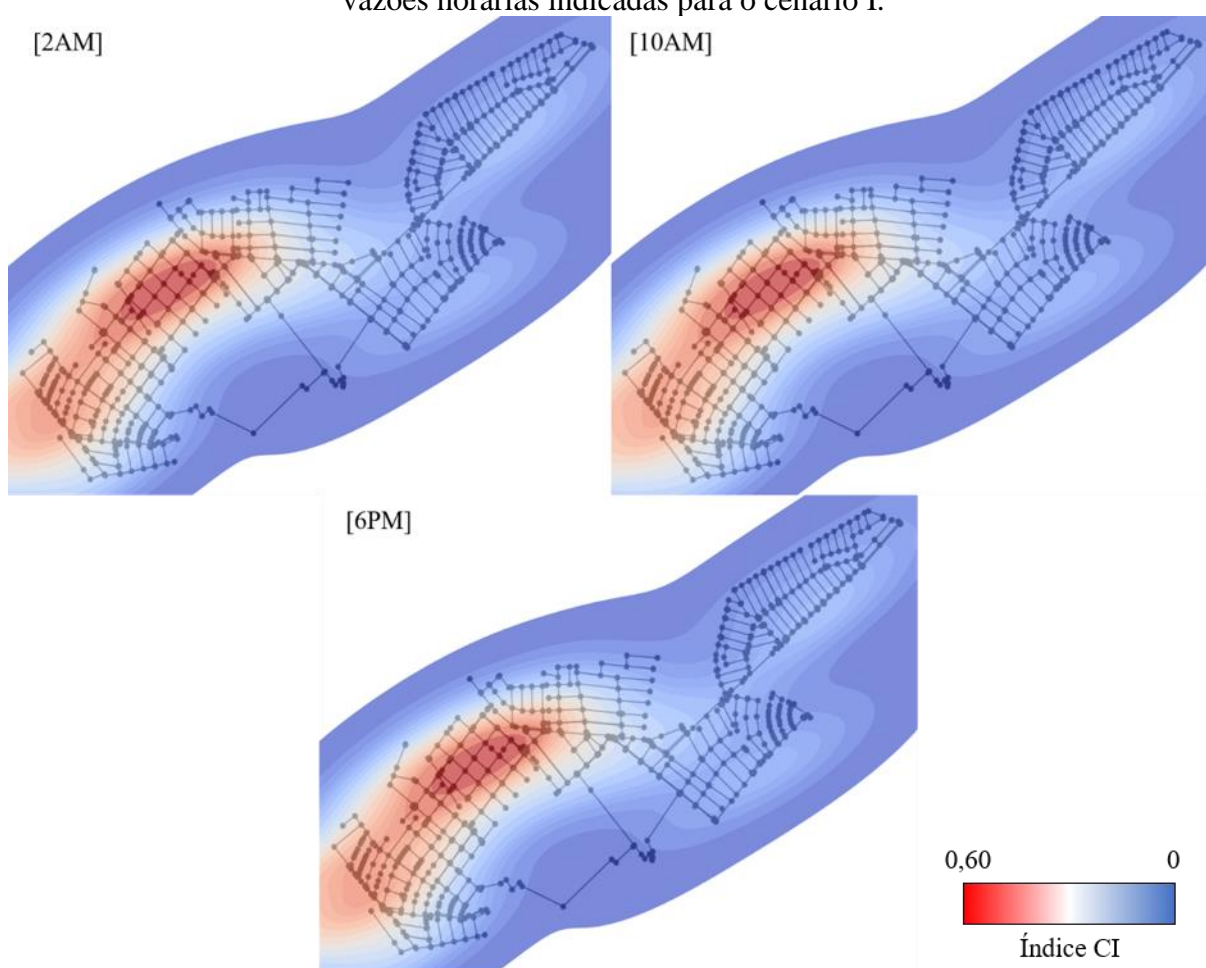
Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017a), postulou seu método considerando incidentes de falha e condições de intermitência no abastecimento. Recentemente estudos realizados por Albarakati; Tassaddiq e Kale (2021), indicaram que, a centralidade média dos nós obtinha maior sensibilidade em modelos com nós e trechos em falha com algoritmo implementado cuja aferição iniciava o processo iterativo pelo elemento de maior centralidade média. Contudo, o autor observou esparsa capacidade por parte da mesma métrica para predição dos elementos de maior vulnerabilidade da rede e tempo e complexidade de aplicação da métrica quando em comparação com métricas como grau dos nós e autovetor.



### 11.3.2 Cenário I

Na Figura 60, abaixo, os mapas de calor para 2AM, 10AM e 6PM para o cenário I indicam, em comparação com o cenário original, que não existem divergências significativas em relação à ambos. A presente distribuição espacial, em comparação com a distribuição observada no cenário original, ainda não evidencia claramente um dos comportamentos observado por Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017a) de mudança dinâmica de agrupamentos de maior centralidade.

Figura 60 – Mapa de calor com distribuição espacial da centralidade média de acordo com as vazões horárias indicadas para o cenário I.

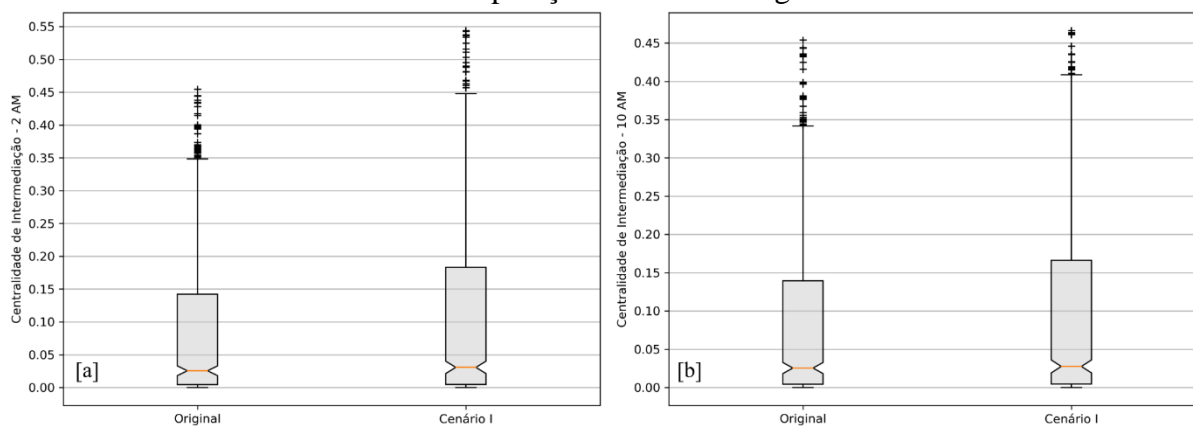


Fonte: Autor (2022)

Em vista de que uma comparação visual entre as imagens da Figura 58 (Cenário Original) e da Figura 60 não permita a identificação de nenhuma discrepância expressiva, na Figura 61 o gráfico em *boxplots* para os instantes 2AM (esquerda) e 10AM (direita) para ambos cenários são exibidos. No qual observa-se uma maior centralidade incidente no cenário I, condição que indica, primeiramente, o incremento dos fluxos ocorrentes agora no traçado PA,

adicionado ao cenário I, ao passo que há um abrandamento da magnitude de centralidade dos agrupamentos o que é favorável à rede em termos de vulnerabilidade.

Figura 61 – Centralidade de intermediação para os instantes 2 AM [a] e 10 AM [b] do cenário I em comparação ao cenário original.



Fonte: Autor (2022)

Ao observarmos mais detalhadamente a dinâmica ocorrente com a inserção do trecho PA do cenário I, em um instante (2AM) cujas condições hidráulicas são de pressões dinâmicas relativamente altas, ao isolar somente o conjunto de nós presente em ambos cenários, observa-se um aumento de cerca de 6 % na média no cenário I em relação à sua estrutura original e uma correlação de Spearman de  $\rho = 0,864$ . Já para as condições de maior demanda (10AM), a centralidade de intermediação para o cenário I teve média de -5,87 % em relação ao cenário original os valores apresentaram correlação de  $\rho = 0,862$ . No Quadro 4, abaixo, os valores das médias e do desvio padrão para o cenário original e cenário I nos instantes 2AM, 10AM e 6PM são indicados.

Quadro 4 – Média e desvio padrão de cenário original e cenário I.

Cenário	Média		Desvio padrão	
	Original	I	Original	I
<b>2AM</b>	0,106	0,112	0,144	0,144
<b>10AM</b>	0,104	0,098	0,142	0,125
<b>6PM</b>	0,106	0,112	0,144	0,144
<b><math>C_b^*</math></b>	0,0346	0,0311	0,064	0,059

\*Centralidade média não ponderada pela vazão e não considerando os nós inseridos no novo trecho do cenário I.

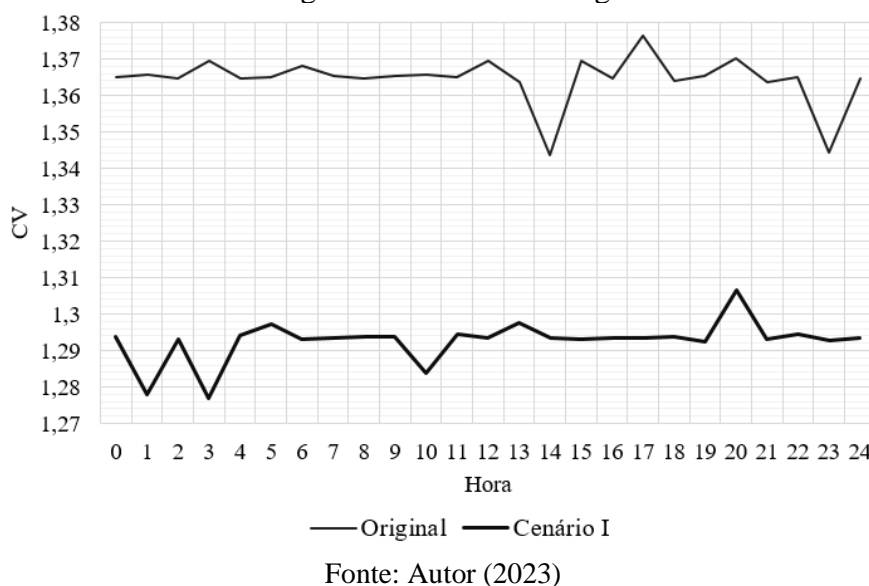
Fonte: Autor (2023)

O comportamento dos valores apresentados no parágrafo anterior, bem como os valores expostos pelo Quadro 4, indicam de maneira quantitativa o esparso impacto global que a inserção do novo trecho implica. O acréscimo da média nos instantes de menor demanda, uma vez que as condições topológicas de centralidade média ao longo do tempo em ambos cenários são constantes, considerando do Quadro 4, o cenário I tem decréscimo de aproximado de -10,05% em relação ao cenário original. Essas variações de proporções inversas, acabam por não serem explicadas unicamente pelas variações de vazão na rede, e possivelmente a interação entre variações locais de demanda e características dos condutos (e.g., diâmetro, rugosidade, etc.) interferem nas variações da centralidade de intermediação ponderada.

A Figura 62, abaixo, traz o traçado de comportamento do coeficiente de variação (CV) para o cenário I e o cenário original. Em alíneas gerais o cenário I apresenta um decréscimo médio do coeficiente de variação do índice CI de cerca de 5,6 % em relação aos valores de CV para os resultados do cenário original, essa constatação pode ser um indicativo da magnitude que impactos locais (i.e., adição de trecho na rede, etc.) podem ter no âmbito global da rede, dadas as devidas ressalvas quanto às características do modelo em questão, como tamanho da rede, inexistência de estações de recalque e de um único reservatório, etc.

Por outro aspecto, essa variação entre ambos resultados de CV, indicam condições similares entre os cenários que podem ser indicadas pela observação da correlação de Spearman para as vazões e pressões ao longo do dia para os trechos e nós em ambos cenários, foi de 0,89 e 0,92 respectivamente. Esses valores, em agregado com a observação do decréscimo de CV para os valores do cenário I ao longo do dia indicam uma sensível variação positiva na distribuição dinâmica do abastecimento visto a mais uniforme distribuição das centralidades ao longo da rede com a alteração. Evidentemente que não é possível determinar um grau específico de melhoria principalmente com relação a resiliência que depende de inúmeras variáveis como por exemplo as características espaciais de ocorrência de uma falha, o que, para a conjuntura do cenário I seria condição de grande relevância uma vez que se trata da adição de um trecho e por consequência, *a priori*, uma melhoria pontual na extensão da rede.

Figura 62 – Comportamento do coeficiente de variação (CV) dos valores do índice CI para o cenário original e cenário I ao longo do dia.

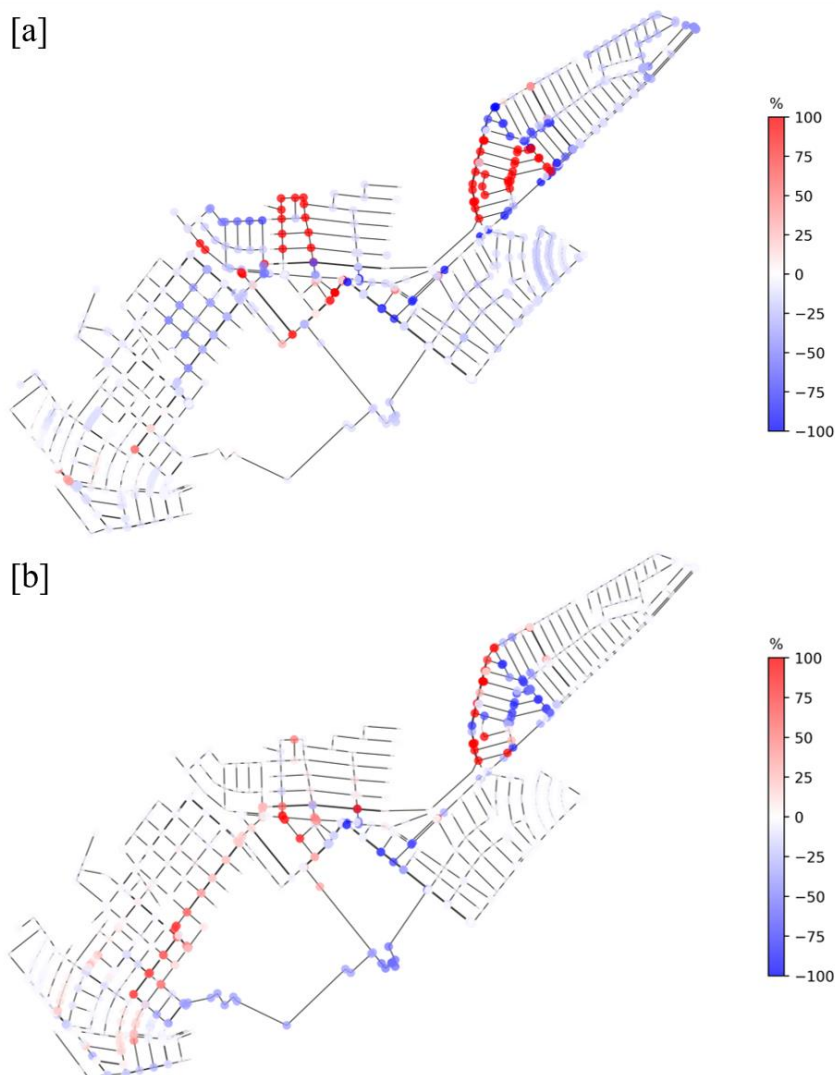


Da mesma maneira, ao observar o valor do coeficiente de variação (CV) para ambos os cenários sem ponderação, temos um valor contínuo ao longo do tempo de  $CV=1,867$ . Valor esse que indica, dadas dinâmicas apresentadas na figura acima, um decréscimo da ordem de aproximadamente 30% da centralidade média dos nós não ponderada para a centralidade média dos nós ponderada pela vazão. Isso é um indicativo do impacto que a ponderação tem sobre os resultados e logo da sensibilidade da consideração de somente aspectos topológicos na construção de métodos de determinação da resiliência em rede de abastecimento de água.

Contudo, é importante salientar o caráter relativo sobre a interpretação dos valores de centralidade média ponderada. Uma vez que se utilizando também de características hidráulicas, alterações na rede agregarão também respectivos impactos em aspectos além do topológicos essencialmente considerado. O que implica na possibilidade por exemplo de tanto eventos de falha, como de melhoria na distribuição do fluxo, apresentarem resultados semelhantes uma vez que condições de falha também causam alterações nos fluxos originais da rede. Logo, o uso da centralidade média ponderada por uma ou mais características de outra natureza e magnitude na rede, deve ser cuidadosamente interpretada visto que seu caráter dúbio pode levar a equívocos sobre as condições de resiliência da rede (ZARGHAMI; GUNAWAN, 2019).

Diante disso, a Figura 63[a] demonstra percentualmente a variação espacial nodal do cenário I em relação ao cenário original. Evidenciando graficamente o impacto do trecho PA sobre a centralidade de intermediação de cada nó.

Figura 63 – Variação percentual da centralidade nos nós do cenário I em relação ao cenário original para a CI ponderada [a] e centralidade média não ponderada [b].



Fonte: Autor (2022)

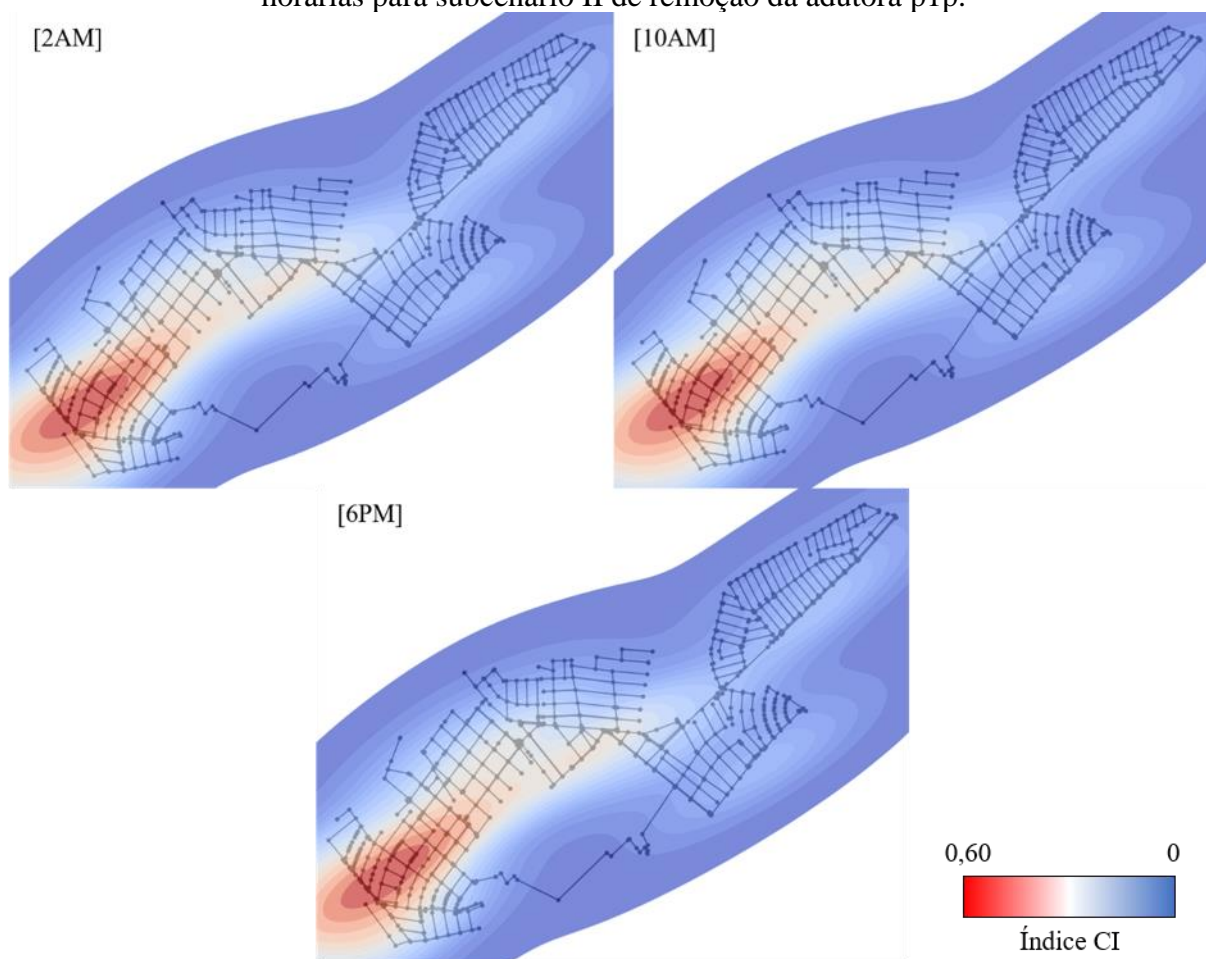
Para título comparativo, a Figura 63[b] destaca o impacto da alteração somente na métrica de centralidade média sem assimilação de demais fatores. Em ambos casos é possível identificar o impacto de intensidade gradativa ao longo das adjacências de onde o trecho PA, o que demonstra, primeiramente, que impactos consideráveis não se restringem somente aos nós de jusante ao trecho. Esses, por sua vez são também observados com aumento superior à 100 % em muitos nós, bem como no decréscimo da centralidade média em nós que antes abasteciam a região e o trecho “ponte”. Contudo, um aumento na centralidade também é perceptível na região de montante ao trecho e jusante ao trecho p1p, indicando que o posicionamento do trecho PA acaba interferindo em elementos cujo impacto, a priori, em termos de abastecimento poderiam não ser considerados.

Na Figura 63[b] é possível observar que os efeitos do trecho PA são menos intensos e mais restritos as regiões à jusante de PA. Relembrando que em condições não ponderadas o peso ( $w$ ) aplicado aos trechos ( $e$ ) para computo da centralidade média são iguais a 1 (BRANDES, 2001) e em condições ponderadas (Figura 63[a]) o resultado final de influência de cada nó é acrescido pelos trechos que o ligam no caminho correspondente. Logo, a observação das alterações do índice CI pode ser empregada, como aponta Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017b), na formulação de medidas de isolamento (i.e., inserção de válvulas e registros) e associação à modelos de otimização e protocolos de operação das redes.

### **11.3.3 Cenário II**

Na Figura 64, abaixo, a distribuição para o subcenário p1p do cenário II demonstra com evidência o aglomerado de vazões que se concentram a jusante do trecho p22e. Isso indica que a ocorrência das vazões de consumo que antes operavam pelo trecho p1p agora seguem tendência a serem assimiladas pelo trecho de menor resistência em relação a posição original.

Figura 64 – Distribuição espacial da centralidade de intermediação com ponderação de vazões horárias para subcenário II de remoção da adutora p1p.



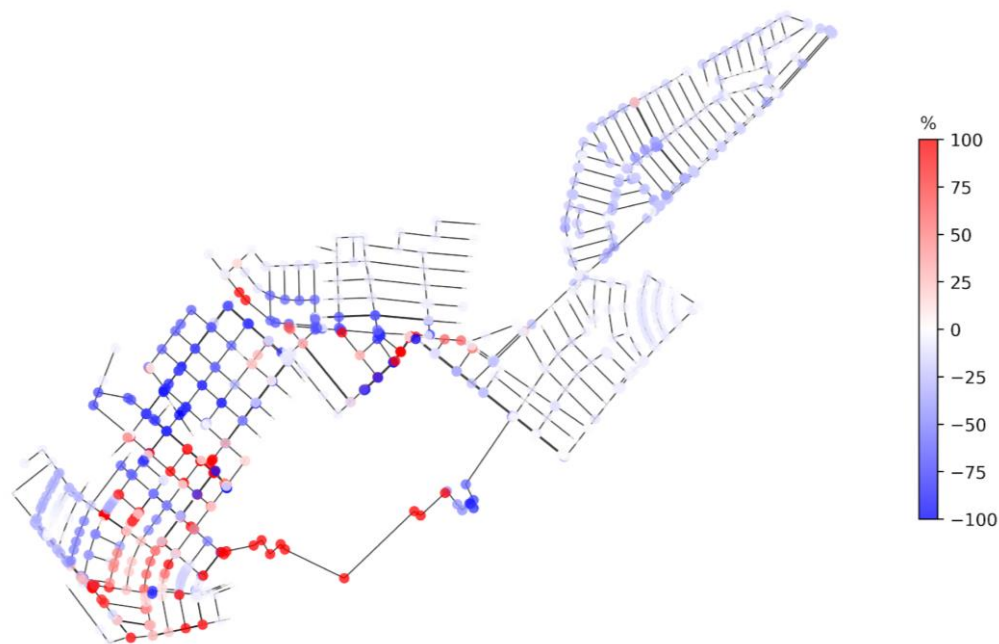
Fonte: Autor (2022)

Na Figura 64, quando posta em comparação visual com o cenário original na Figura 58, observa-se um “deslocamento” do agrupamento localizado em um região intermediária de evidente influência pelo trecho p1p para agora um novo agrupamento localizado a jusante do trecho p22e. Considerando a configuração remanescente, o trecho p22e, outrora traçado de menor vazão ocorrente dentre as adutoras, agora, com base no comportamento do agrupamento de maior CI, indica suprir a demanda antes abastecida pelo trecho p1p, sugerindo uma condição de redundância entre tais adutoras.

Essa redundância entre p1p e p22e fica mais evidente a partir da Figura 65, abaixo, onde em comparação ao cenário original, há um expressivo incremento na centralidade média de dos nós componentes de p22e e de suas adjacências. Ao passo que as regiões outrora de jusante e adjacentes ao trecho p1p apresentam variações negativas de centralidade média, o que não representa um desabastecimento dessa região, e sim uma menor relevância relativa para os fluxos da rede.



Figura 65 – Variações percentuais entre o cenário II – p1p e cenário original no instante 10AM.



Fonte: Autor (2023)

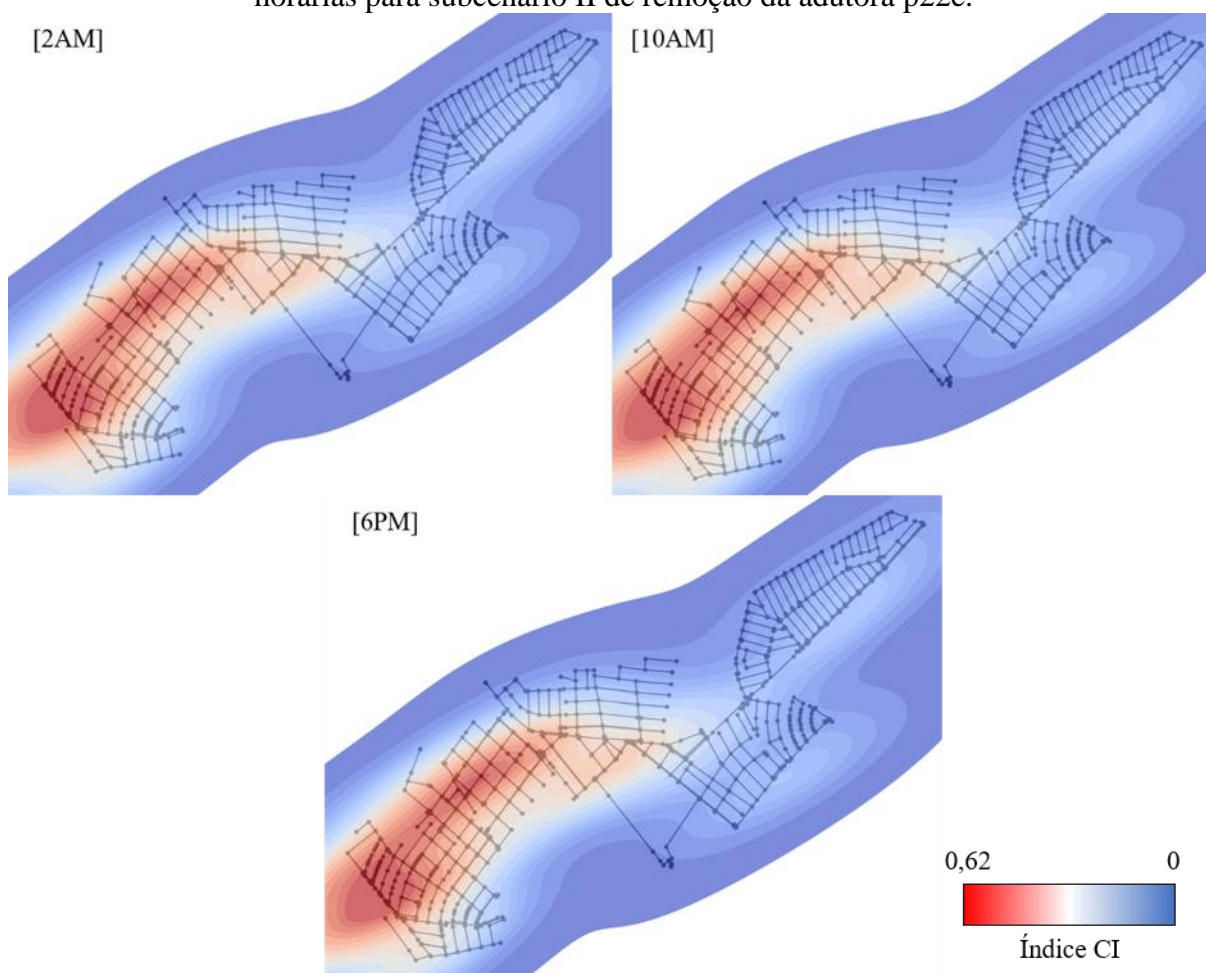
Numericamente, o subcenário p1p valores médios de centralidade  $\mu_{10} = 8,20E-2$  e  $\mu_2 = 8,93E-2$  com um desvio padrão de  $\sigma_{10} = 1,21E-1$  e  $\sigma_2 = 1,32E-1$ , apresentando uma redução de 27 % e 19 % para as médias e reduções de 17 % e 9 % no desvio padrão ( $\sigma$ ) para os instantes 10AM e 2AM respectivamente. Os valores apresentados representam um conjunto de dados que sugere uma possível melhoria nas condições da rede visto que, para melhor resiliência no abastecimento de água, uma rede com um conjunto mais uniforme de resultados e uma média menor, tende a indicar uma menor quantidade de nós com alta centralidade e, conseqüentemente, menor vulnerabilidade, além de uma maior redundância no fluxo. Todavia, a alteração na estrutura de uma rede complexa a torna, em termos gerais, uma nova e diferente rede, salvaguardadas especificidades de cada estrutura. Além disso, métricas topológicas baseadas em caminhos mais curtos entre vértices, como a de centralidade de intermediação ponderada (CI), podem apresentar resultados contra-intuitivos em determinados casos, o que aprofunda a noção de perspectivas sistêmicas para aferição da resiliência (DI NARDO et al., 2018d; HOLME et al., 2002; NEWMAN, 2003, 2005).

Na Figura 66, por sua vez, a remoção do trecho p22e apresenta uma área de maior intensidade de CI expressivamente maior do que a observada no subcenário p1p. A condição observada reforça a premissa de existência de uma possível redundância importante entre ambas adutoras, porém, tomando como princípio a condicionante de boa estruturação da rede entre as



regiões de “influência” no abastecimento de cada adutora, o trecho p24q pode ser elemento de maior vulnerabilidade dada a conjuntura do traçado da rede.

Figura 66 – Distribuição espacial da centralidade de intermediação com ponderação de vazões horárias para subcenário II de remoção da adutora p22e.

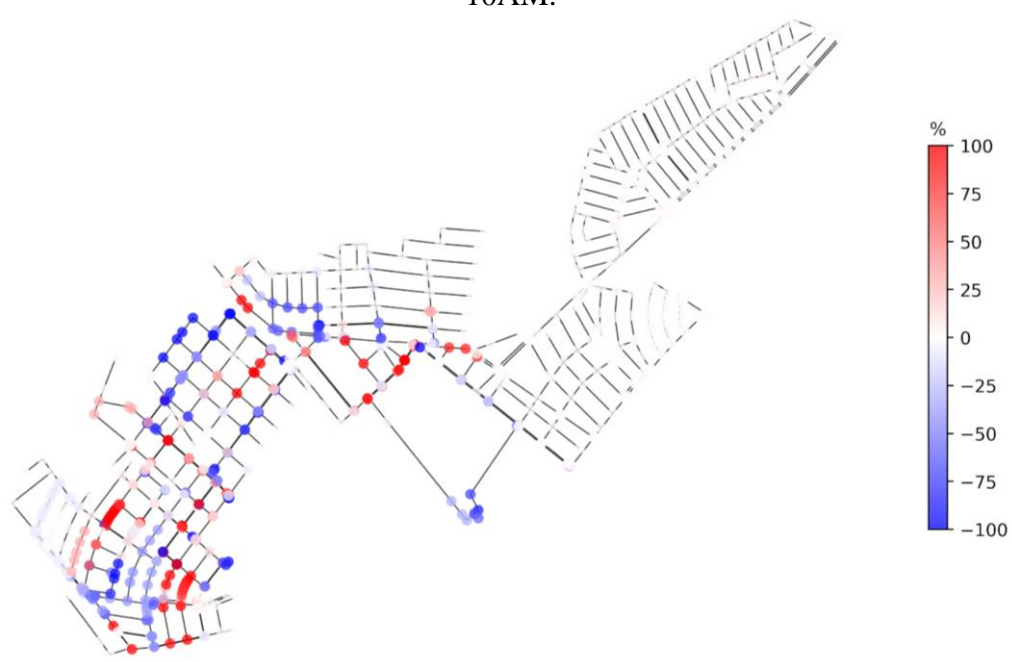


Fonte: Autor (2022)

Considerando a distribuição das manchas na Figura 66, visualmente é possível presumir a existência de condições mais homogêneas em comparação com subcenário p1p. Em termos hidráulicos, em comparação com o cenário original, onde a proporção de distribuições de percentual das vazões entre os três trechos é de 34 % (p1p), 23 % (p22e) e 43 % (p24q). No subcenário p1p, essa proporção, como já observada, para a ser de 73 % (p24q) e 28 % (p22e), denotando fortemente a dependência entre os trechos p1p e p24q. Porém, no presente subcenário p22e, a proporção passa a ser de 49 % (p1p) e 51 % (p24q), contrariando a expectativa de que o trecho p1p, até mesmo pela sua maior capacidade relativa de admissão (i.e., diâmetro de 300 mm), conduzisse em proporção similar ou maior que o trecho p24q no ocorrido no subcenário p1p.

Desse modo, tendo em vista as proporções equilibradas de condução das vazões de demanda no presente subcenário, assim como nos anteriores, uma sucinta averiguação comparativa espacial com o cenário original foi gerada para o instante de 10AM de maior demanda, a mesma é exposta na Figura 67, abaixo.

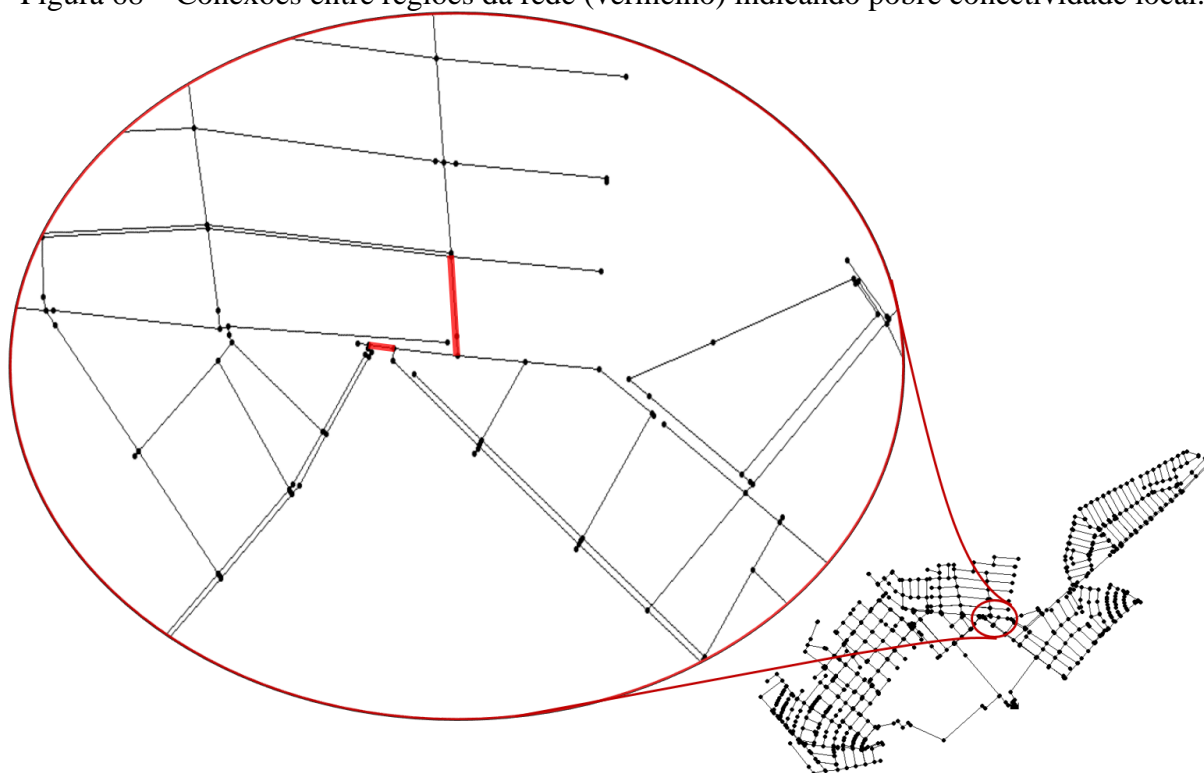
Figura 67 – Variações percentuais entre o cenário II – p22e e cenário original no instante 10AM.



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 67, é possível observar uma significativa realocação de fluxos em diversos trechos na região onde antes havia o abastecimento pelo trecho p22e e virtualmente nenhuma alteração na região abastecida cujo abastecimento é predominantemente realizado pelo trecho p22e. No entanto, avaliando mais minuciosamente a estrutura topológica da rede no entorno da região de afunilamento das conexões, observamos a existência de trechos que podem também ser considerados gargalos ou pontes e destacados em vermelho na Figura 68, abaixo.

Figura 68 – Conexões entre regiões da rede (vermelho) indicando pobre conectividade local.

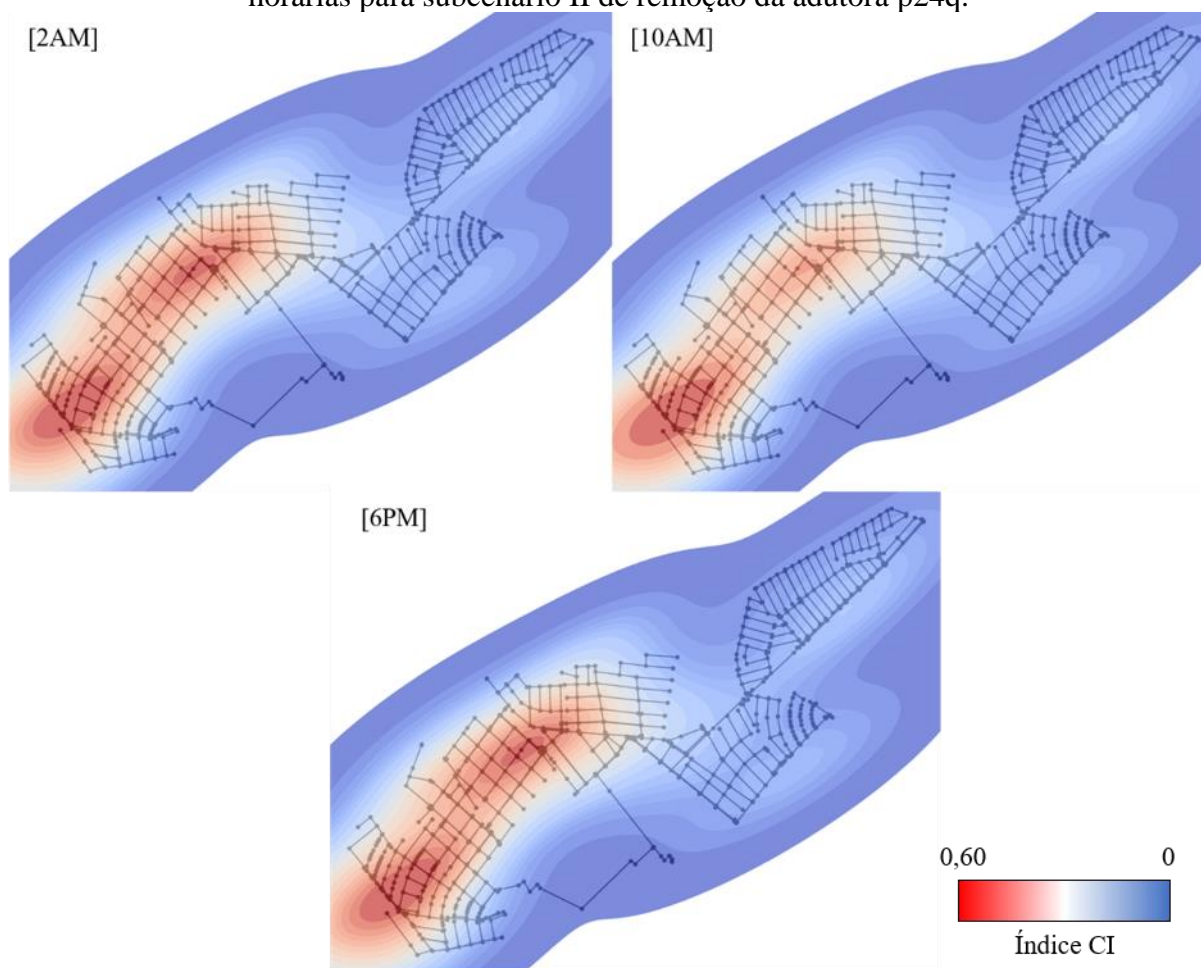


Fonte: Autor (2023)

Considerando, primeiramente, a inviabilidade de análises visuais de condições de elementos de vulnerabilidade como a observada na Figura 68, acima, frente a realidade da maioria dos casos de redes reais completas e significativamente maiores do que o setor analisado. Bem como as métricas e índices até o momento observados, corroboram as limitações observadas em estudos como por exemplo de Di Nardo et al. (2017a), Tanyimboh et al. (2016) e Zarghami; Gunawan e Schultmann (2019) cujas observações, guardadas devidos pormenores, demonstraram limitações analíticas de métricas quando consideradas isoladamente.

Já na Figura 69, as distribuições espaciais para o subcenário p24q do cenário II são expostas e evidenciam em certa magnitude uma modularidade na rede em função da localização das adutoras. Condição essa que pode ser observada uma vez que a concentração de nós de proeminente vazão continua a concentrar-se nas regiões entre os dois supracitados trechos, enquanto que o restante da rede apresenta considerável menor centralidade.

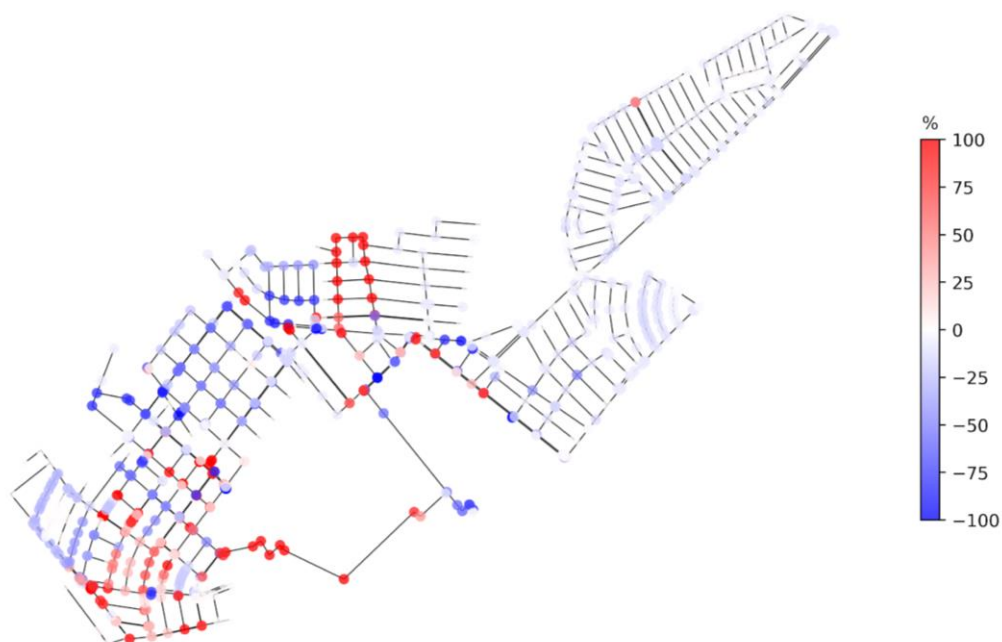
Figura 69 – Distribuição espacial da centralidade de intermediação com ponderação de vazões horárias para subcenário II de remoção da adutora p24q.



Fonte: Autor (2022)

No caso em questão, em termos de proporção de vazões entre as adutoras os valores foram de 73 % (p1p) e 27 % (p22e) assemelhando-se ao subcenário p1p. E considerando agora a distribuição de centralidades ponderadas mais proeminentes entre as regiões abastecidas pelas duas adutoras remanescentes, é intuitivo que novamente nós da região destacada na Figura 69 tenham significativa variação quando comparados ao cenário original. Essa e outras discrepâncias são evidenciadas na Figura 70, abaixo, sendo que além dos nós dos trechos “ponte” citados, é possível observar trechos com variação positiva na centralidade sugerindo novos caminhos preferenciais de escoamento.

Figura 70 – Variações percentuais entre o cenário II – p24q e cenário original no instante 10AM.

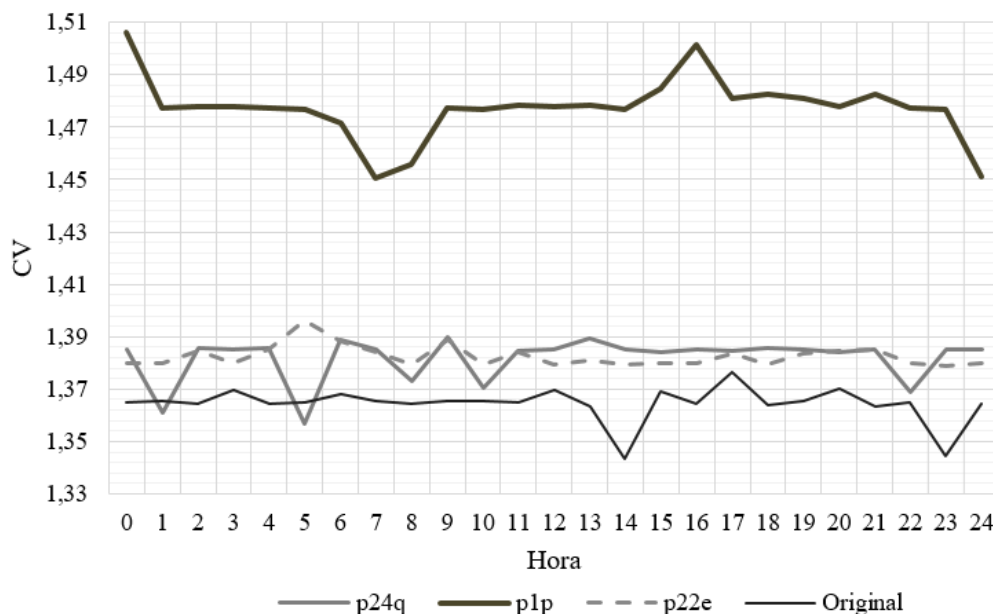


Fonte: Autor (2023)

Embora havendo diferentes variações de centralidade ponderada e quando em contraste aos valores do cenário original, a predominância de um agrupamento de maior centralidade ponderada ao longo da região da rede entre a adutora p22e e p1p constata em menor intensidade o observado por Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017a) ao propor o método. O autor ainda aponta que, mesmo com a predominância de determinados agrupamentos de alta centralidade, as variações decorrentes de eventos de falha, moldam também a distribuição espacial de vulnerabilidade do sistema.

Há de se considerar, todavia, mesmo que limitados, os resultados observados na Figura 55 com o gráfico das curvas do Índice de Todini, coincidiram parcialmente com as observações de centralidade de intermediação ponderada (CI). Evidentemente que através da análise unicamente de uma das métricas, não se poderia inferir detalhes ou até mesmo com ambas juntas não se pode determinar conclusões de fato. Na Figura 71, abaixo, o coeficiente de variação (CV) para os subcenários do cenário II e o cenário original são apresentados no objetivo de obter de modo mais preciso uma avaliação de cada subcenário.

Figura 71 – Centralidade de Intermediação (CI) para o cenário original e os subcenários do cenário II.



Fonte: Autor (2023)

Analisando o gráfico da Figura 71, fica evidente o maior coeficiente de variação no subcenário p1p, o que sugere que a remoção da adutora central de maior diâmetro entre as três (300 mm), porém não a que, em condições de cenário original, conduz mais vazão, causa maior condições de elementos em vulnerabilidade dentro do sistema. Resultado que se comparado ao Índice de Todini, onde o subcenário p1p apresenta índice médio  $I_r = 0,77$ , o maior dentre os três subcenários, não é corroborado. Contudo, dados os fundamentos metodológicos de cada índice, resultados contraditórios não anulam a análise, visto que o índice de Todini detêm-se majoritariamente sobre as condições de entropia energética excedente presentes ao longo da rede, o que indica primeiramente que o trecho p1p, em termos energéticos é o traçado de adução que se interrompido, menor interferirá na energia excedente disponível na rede. Enquanto que em termos de fluxo pelo princípio de caminho mais curto, é o trecho que mais desestabilizará e aumentará as condições de vulnerabilidade na rede.

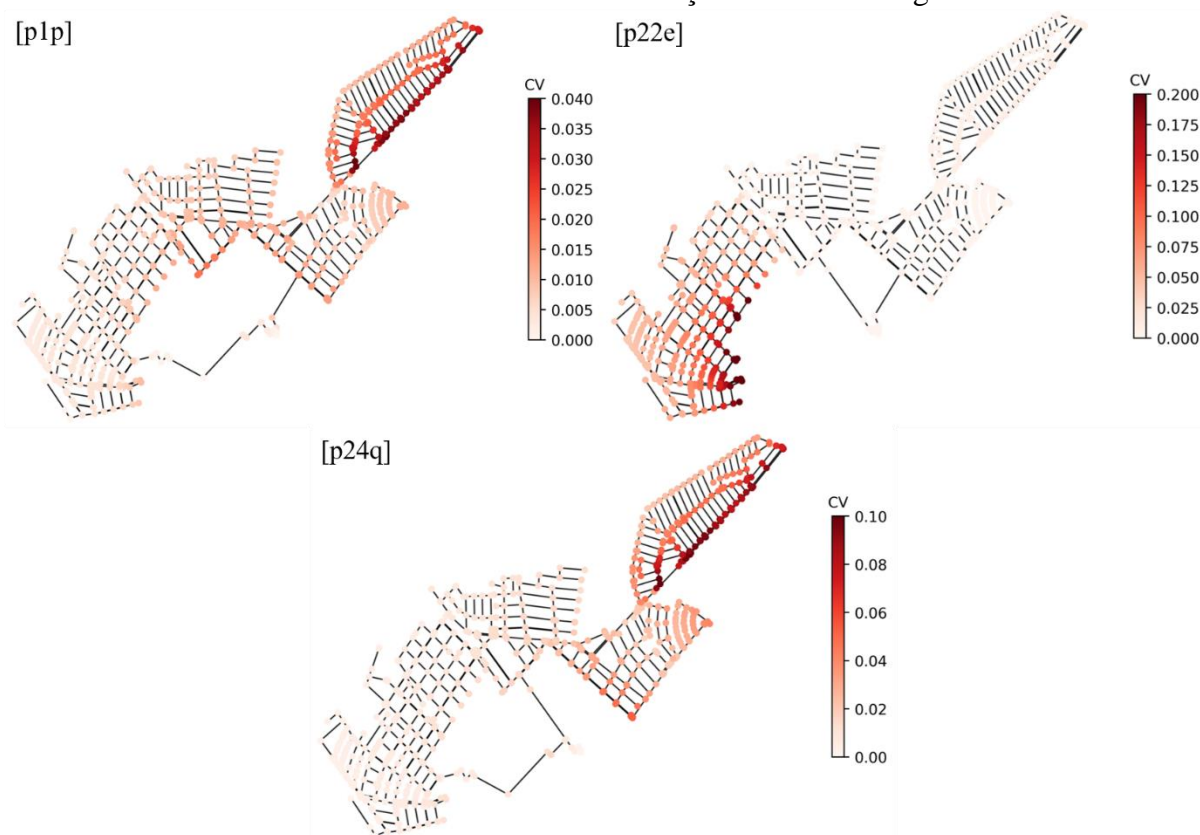
Em princípio, considerações muito restritivas a respeito das pressões disponíveis e seus limites técnicos expressos em normativas como a NBR 12.218/2017 (ABNT, 2017) não foram recorrentemente observados em virtude dos intentos de análise das utilidades potenciais das métricas, mesmo algumas das quais (e.g., Índice de Todini) fazerem da pressão na rede parâmetro central. Contudo, assim como observado nos estudos bibliométricos levantados anteriormente (Item 3.1) e corroborados por Assad e Bouferguene (2022) e Zarghami e



Gunawan (2020), a determinação da resiliência em redes de abastecimento de água deve ser, além de contínuo, um método com maximizada abrangência de aspectos da rede.

Por fim, obtiveram-se os coeficientes de variação (CV) a partir dos conjuntos amostrais da razão entre os valores de pressões disponíveis em todos instantes de um dia do subcenário pelo mesmo conjunto no cenário original. Logo, na Figura 72, observou-se superficialmente o comportamento das variações locais em cada subcenário, devendo-se atentar para as diferentes magnitudes explícitos nos valores da legenda.

Figura 72 – Distribuição espacial dos coeficientes de variação (CV) para pressão disponível em subcenário do cenário II em relação ao cenário original.



Fonte: Autor (2023)

Apesar do subcenário p22e, na Figura 72, apresentar as variações mais intensas, os subcenários p1p e p24q foram os que apresentaram maior amplitude proporcional nos impactos sobre a pressão disponível. Há de se destacar também novamente o caráter particionado do setor, com impactos praticamente delimitados, o que novamente demonstra a condição de baixa redundância do setor e conseqüentemente a maior vulnerabilidade dos elementos com eventual, resguardadas as devidas condições de análise, pobre resiliência global do setor.

Haja vista que a centralidade de intermediação ponderada (CI) postulada por Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017a) abrange valores de vazão como pesos ao computo da centralidade média contudo discrepâncias como em termos de aspectos como pressão disponível, de significativa importância para o adequado abastecimento não são diretamente considerados como no método de Todini (2000). Logo, há de se considerar sempre a complementariedade das métricas e metodologias bem como os objetivos da análise.

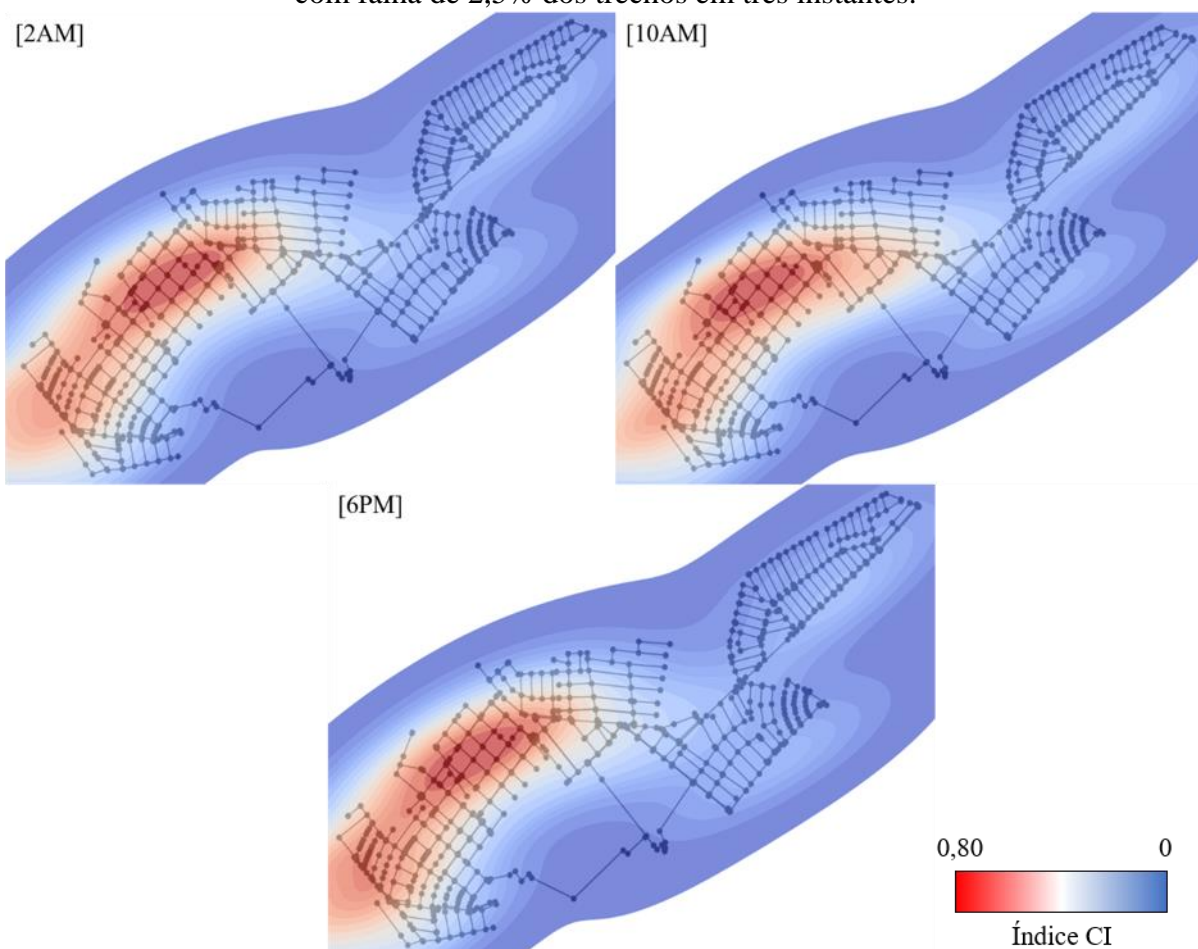
#### **11.3.4 Cenário III**

Como mencionado no Item 4.1.2, a aplicação de Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017a) observa o comportamento da métrica também por meio de eventos de vazamento na rede, contudo, para o presente estudo, em se tratando cenários de isolamento completo de fluxo de trechos, possíveis equiparação ou observações análogas podem não ser expressivos e limitadas.

Para os subcenário do cenário III, na Figura 73, abaixo, o mapa de calor para o subcenário de 2,5% é exibido em três instantes. Nos instantes observados, não é possível realizar distinções evidentes a respeito de consequências em virtude das falhas programadas quando em comparação visual com o cenário original.



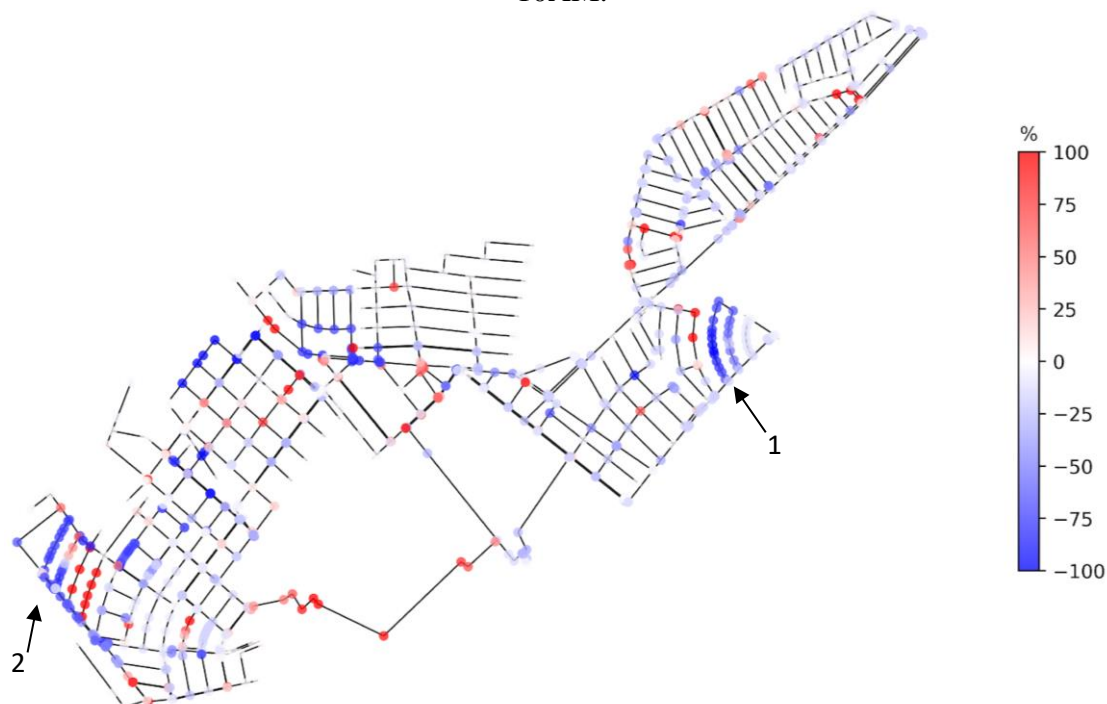
Figura 73 – Mapa de calor da centralidade de intermediação para subcenário do cenário III com falha de 2,5% dos trechos em três instantes.



Fonte: Autor (2022)

As comparações nó a nó com o instante equivalente da métrica no cenário original, por sua vez, permite uma observação um pouco mais detalhada do comportamento da métrica em relação aos estresses imputados à rede. No subcenário III com 2,5% de falha em questão, na Figura 74, abaixo, as variações permitem a observação de incremento, no instante de maior demanda (10AM), da métrica e, por conseguinte da vazão no trecho pertencente à adutora p22e. Esse aumento se dá em função da própria centralidade maior centralidade de intermediação ponderada que se é observado nesta região tanto na Figura 74 como no mapa de calor do cenário original (Figura 58).

Figura 74 – Variações percentuais entre o subcenário III 2,5 % e cenário original no instante 10AM.

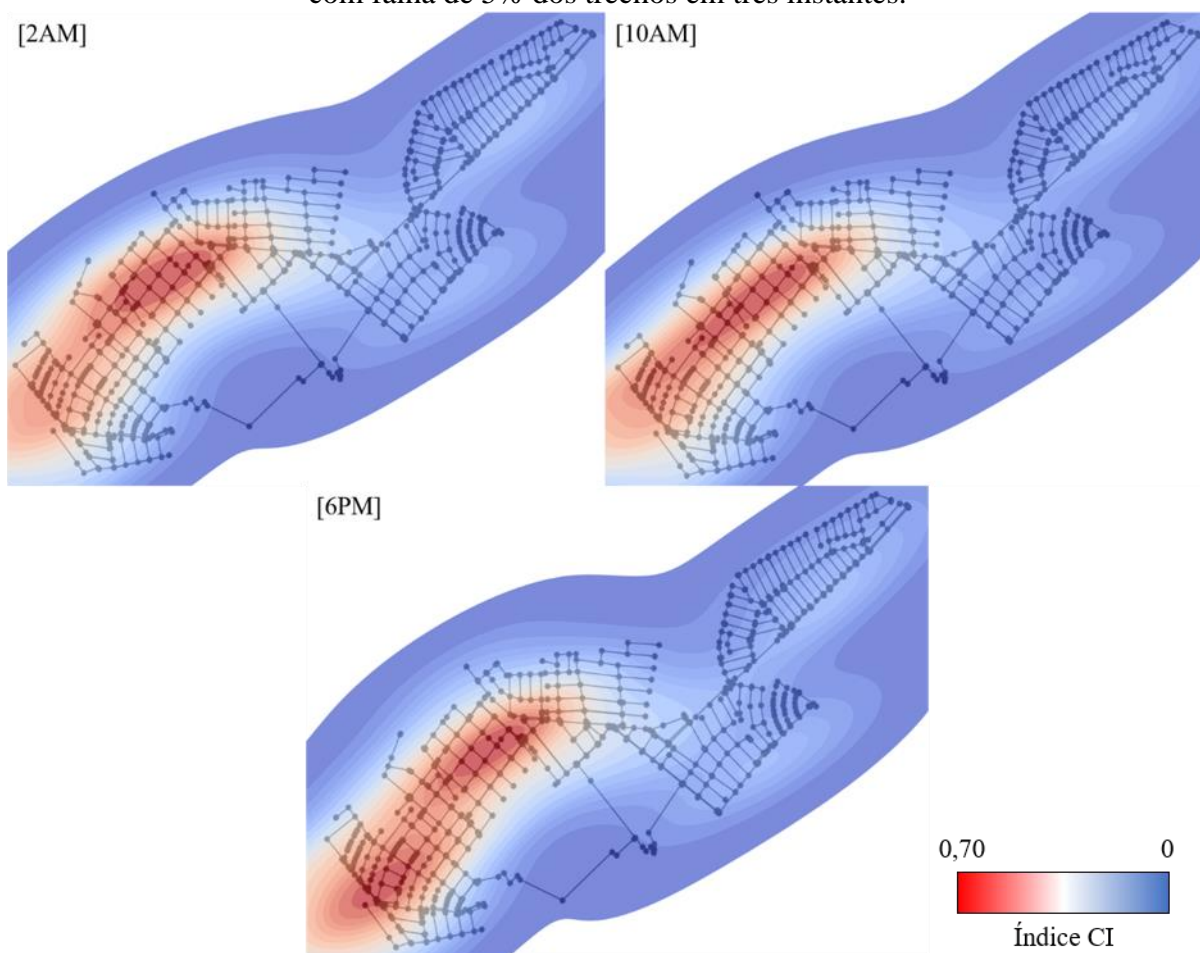


Fonte: Autor (2023)

Apesar da aparente aleatoriedade, as variações mais salientes sugerem ir de encontro com os princípios topológicos de conectividade e redundância, observando-se considerável queda de índice CI em regiões as apontadas pelas setas 1 e 2. Contudo é importante apontar que a análise visual dos nós tem suas limitações, visto que a distribuição homogênea dos nós ao longo da rede pode interferir nesse tipo de observação uma vez que a métrica não restringe somente a condições intrínsecas exclusivamente à cada nó como a métrica topológica de grau de nós por exemplo. Dito isso, é pertinente apontar também que regiões como a destacada na Figura 68 não se destacam no em casos da métrica em questão, tornando, portanto, a tarefa de determinação de todas vulnerabilidades incompleta.

De modo análogo, o subcenário de 5% do cenário III, exposto na Figura 75, abaixo, indica locais de maior e menor intensidades da métrica. Diferentemente do subcenário anterior, com a maior magnitude e extensão da falha, é possível observar uma intensificação da região de maior centralidade no instante 10AM e posteriormente um esparso descolamento da região de maior intensidade em dois agrupamentos no instante 6PM.

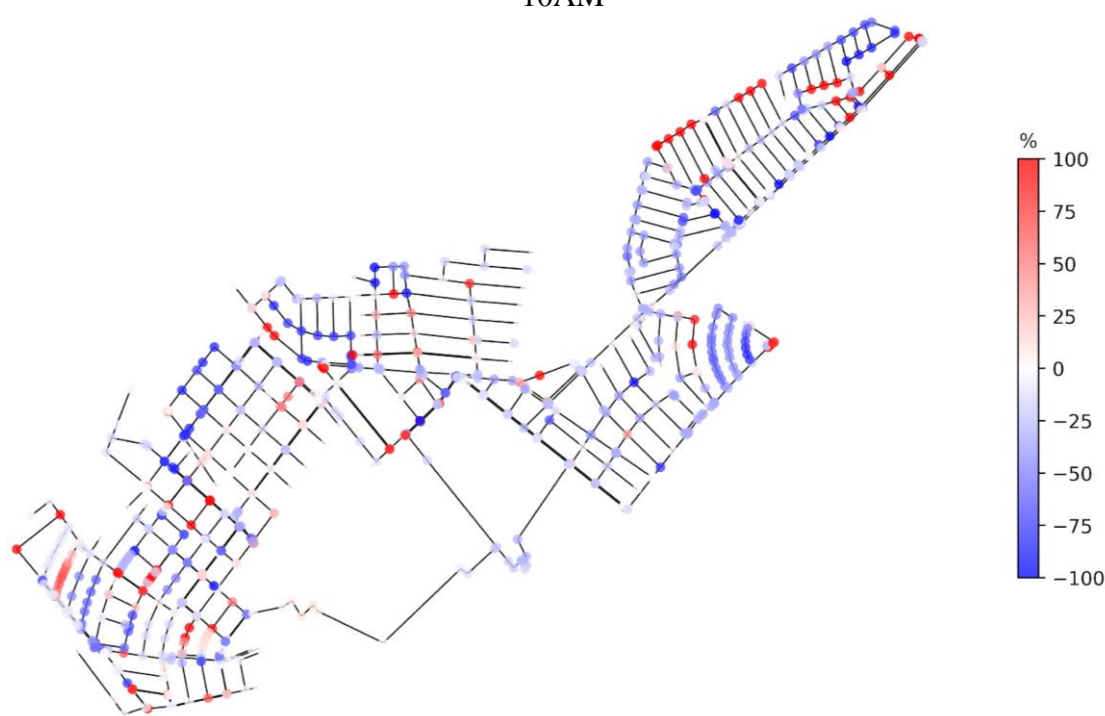
Figura 75 – Mapa de calor da centralidade de intermediação para subcenário do cenário III com falha de 5% dos trechos em três instantes.



Fonte: Autor (2022)

Novamente, para melhor entendimento do comportamento da métrica, na Figura 76, a comparação com o cenário original destaca um contingente mais significativo de nós com perda de centralidade de intermediação para o dado instante. Essa perda pode sugerir o que é apontado por Di Nardo et al. (2018b) acerca da existência de trechos cuja interrupção possuem impacto mais profundo no abastecimento, perfazendo-se assim a existência de um traçado elementar, diferente do original, capaz de manter as condições mínimas para o abastecimento. Se considerarmos também o comportamento do mesmo cenário para o índice de Todini, a métrica apresenta uma completa fragmentação das condições mínimas de abastecimento durante boa parte dos horários de falhas.

Figura 76 – Variações percentuais entre o subcenário III - 5 % e cenário original no instante 10AM

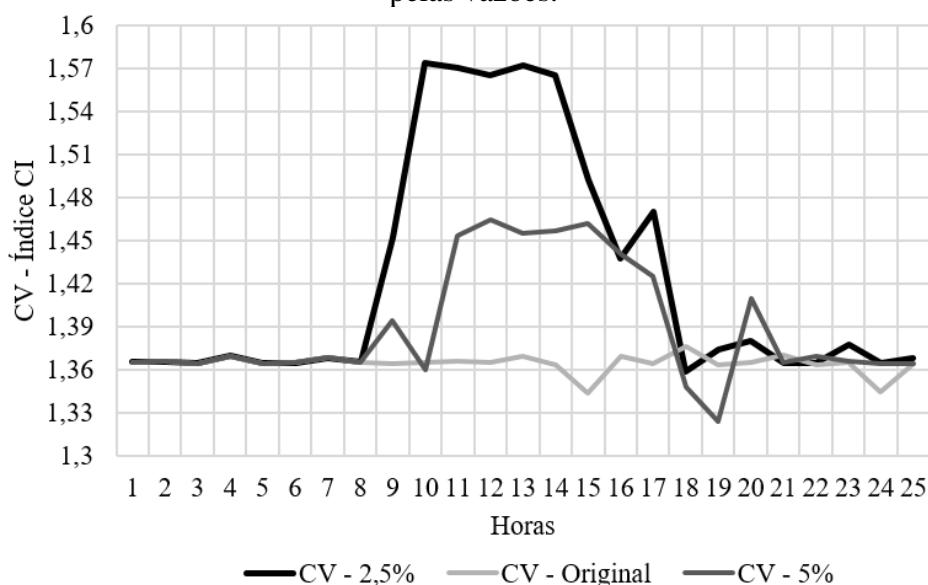


Fonte: Autor (2023)

Portanto, a aplicação do método desenvolvido por Agathokleous e Christodoulou (2016), para o caso em questão, em virtude do tamanho rede, das condições e eventos aferidos, não permitiu uma determinação precisa e concisa, com exceção de alguns casos como os comportamentos diferentes entre subcenários do cenário II, da aferição das condições e aspectos que permitem ou não a rede tender a maiores ou menores condições de resiliência.

Em virtude disso, no objetivo de verificar com maior clareza as discrepâncias entre ambos cenários de falha, as curvas da Figura 77 expressam o coeficiente de variação (CV) da métrica CI para cada subcenário do cenário III e cenário original.

Figura 77 – Coeficiente de Variação (CV) para centralidade média de nós (Cb) ponderada pelas vazões.



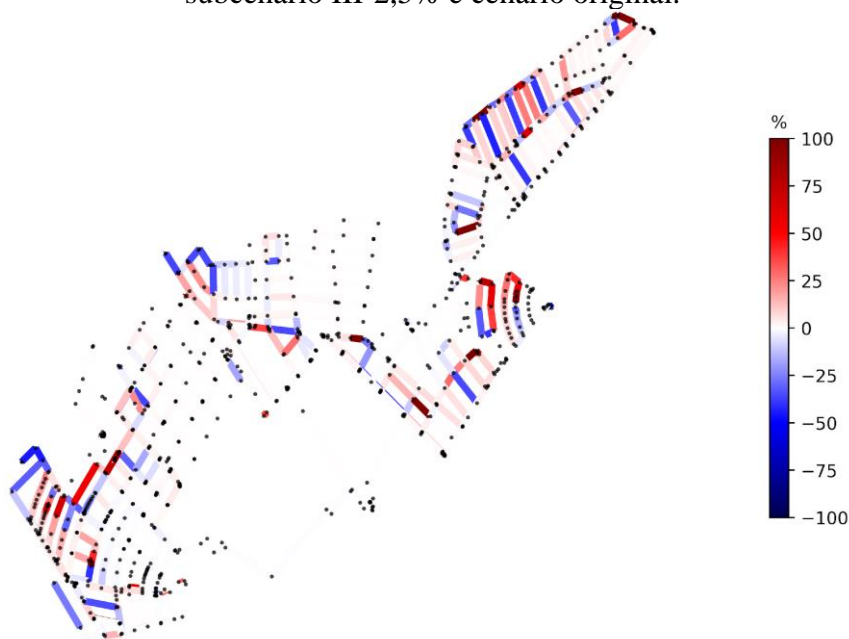
Fonte: Autor (2023)

Na Figura 77, em princípio, é paradoxal o comportamento dos conjuntos de resultados para os cenários de falha, uma vez que o cenário com falha de um menor número de trechos apresenta alto estado de variação principalmente entre os instantes 10AM e 2PM. Enquanto que o cenário cuja falha pretendeu atingir um maior número de trechos e por mais tempo, apresentou um ápice consideravelmente menor e um aumento significativo das variações de CI somente no instante 11AM.

Dentre as possíveis causas para esse comportamento, primeiramente é imprescindível considerar o conjunto de trechos fechados em cada caso e seus instantes de abertura e fechamento. Havendo nesse sentido ocorrido a determinação de um conjunto de trechos cuja importância para o fluxo e o abastecimento e logo para a centralidade média.

Para aferir tal propositiva, observou-se os potenciais locais de maior impacto dos trechos fechados, analisando a variação em termos percentuais do total de vazão admitida por cada trecho em comparação com o cenário original. Com isso, para o subcenário III-2,5%, na Figura 78 são expostas as variações percentuais de cada trecho, sendo possível observar os trechos que ofereceram redundância ao sistema (vermelho) nos instantes de falha.

Figura 78 – Variação percentual do somatório das vazões horárias de cada trecho no subcenário III-2,5% e cenário original.



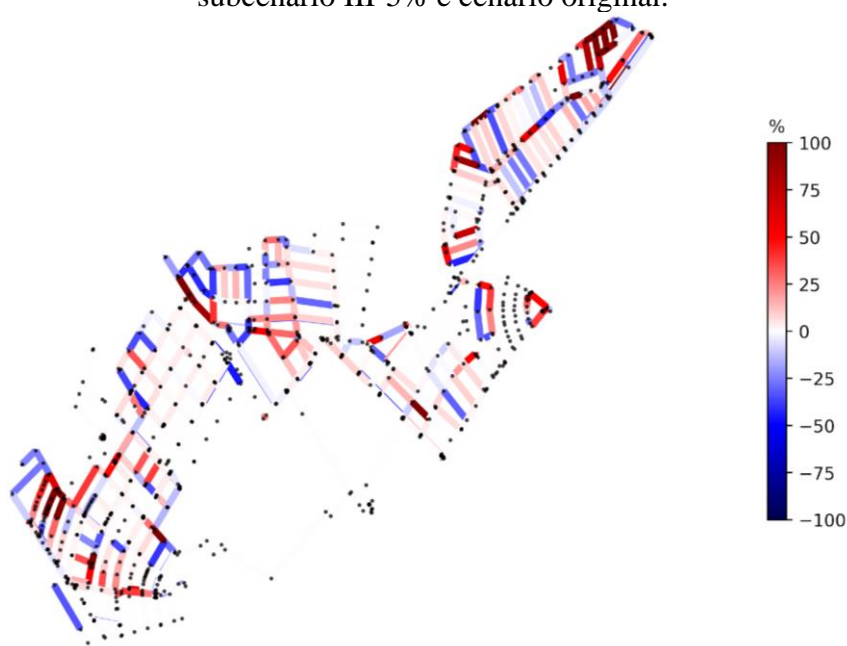
Fonte: Autor (2023)

Apesar de se tratar de uma análise rudimentar, é possível complementar, por exemplo, as constatações feitas a partir da Figura 74. Sendo que, na Figura 78, alguns trechos não componentes do conjunto de falha também tem decréscimo de vazão total, o que pode, em alguns dos elementos, ser um indício de sua condição de menor importância para a robustez da rede. Di Nardo et al. (2018b) destaca essas discrepâncias entre trechos a partir da determinação da rede elementar utilizando-se da centralidade média de trechos como métrica fundamental.

Na Figura 79, abaixo, de mesmo modo são observadas as discrepâncias percentuais dos trechos para o subcenário III-5%. Sendo visualmente distinguível o maior impacto negativo ao abastecimento e o considerável maior número de trechos com incremento de vazão, exercendo, portanto, redundância ao fluxo.



Figura 79 – Variação percentual do somatório das vazões horárias de cada trecho no subcenário III-5% e cenário original.

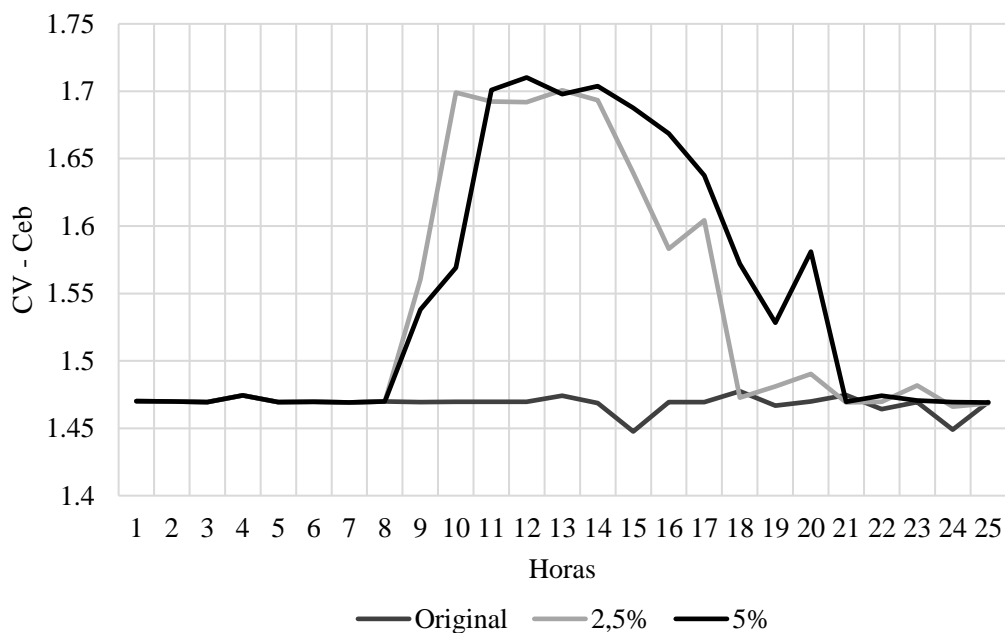


Fonte: Autor (2023)

Como anteriormente observado e recém citada, a centralidade média de trechos é uma implementação de mesma ordem lógica que a centralidade média de trecho, porem adereçada ao elemento de conexão do grafo (BRANDES, 2008b). Nesse sentido, para obter maiores detalhes acerca do comportamento, a priori, anômalo observado na Figura 77, a centralidade média de trechos ponderada pela vazão fora realizada. As curvas do coeficiente de variação (CV) para os subcenários do cenário III e cenário original estão dispostas na Figura 80, abaixo.

A partir da Figura 80, é principalmente observado um comportamento consideravelmente diferente principalmente para os valores da falha de 5%. Em termos gerais, podemos inferir que há uma maior consonância de tais resultados com o esperado considerando as condições aplicadas e os resultados hidráulicos obtidos. Há também de se ressaltar que métricas ponderadas, como é o método de Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017a), são aproximações mais completas ao abranger elementos hidráulicos e topológicos.

Figura 80 – Coeficiente de Variação (CV) para centralidade média de trechos (Ceb) ponderada pelas vazões.



Fonte: Autor (2023)

O distinto resultado entre ambas métricas, destaca que, em se tratando das formas de aferição de cada uma das métricas, apesar de complementares, a sensibilidade de cada uma é adereçada a formulações distintas e que conseqüentemente poderão ter aplicações também distintas (NEWMAN, 2005). Evidentemente que a comparação com Ceb não pode ser tida como regra para todos casos, no entanto é claro que o caráter complexo das redes de abastecimento requer observações e a aplicação de métricas adaptativas à cada realidade para uma determinação razoável das condições de resiliência de uma rede.

#### 11.4 ÍNDICE DE RESILIÊNCIA POR CENTRALIDADE MÉDIA NÓ-FONTE ( $I_{GT}$ )

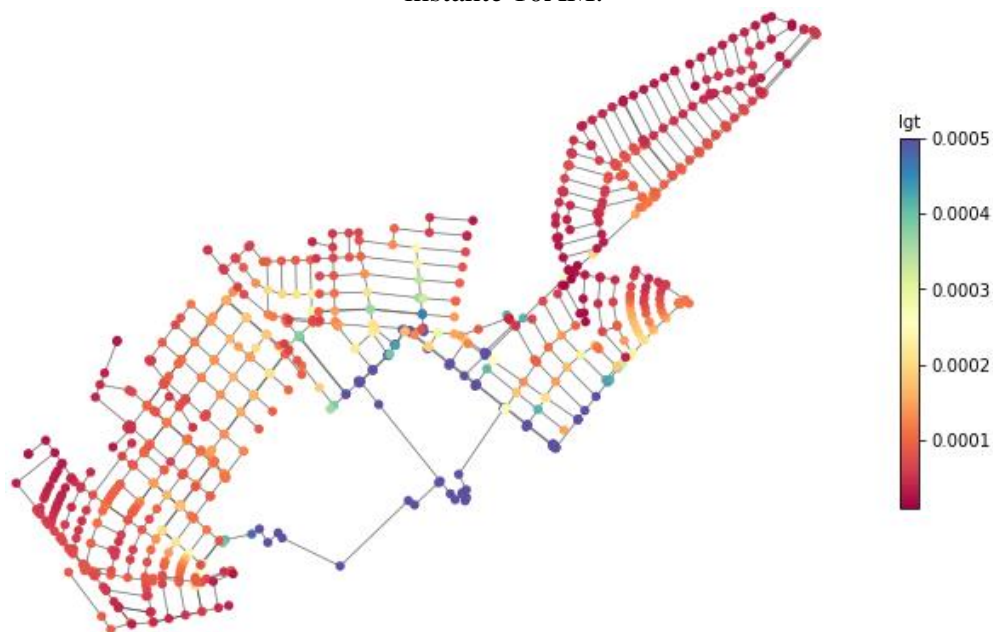
##### 11.4.1 Cenário original

Para o índice de resiliência por centralidade média ( $I_{GT}$ ), além da aferição do método propriamente dito, análises de correlação de matrizes entre determinadas métricas e características da rede serão realizadas no sentido de obter maiores informações de modo integral a respeito da resiliência.



Para o cenário original, as condições de  $I_{GT}$  são apresentadas na Figura 81, abaixo. Somente por meio de uma inspeção visual, já é possível verificar que tais condições possuem grande relação com as condições de vazão e proximidade com o reservatório. Fato que é presumível uma vez o fator de fricção dos trechos é variável integrante do procedimento de aferição.

Figura 81 – Resultado por nó para o Índice de resiliência ( $I_{GT}$ ) para o cenário original no instante 10AM.



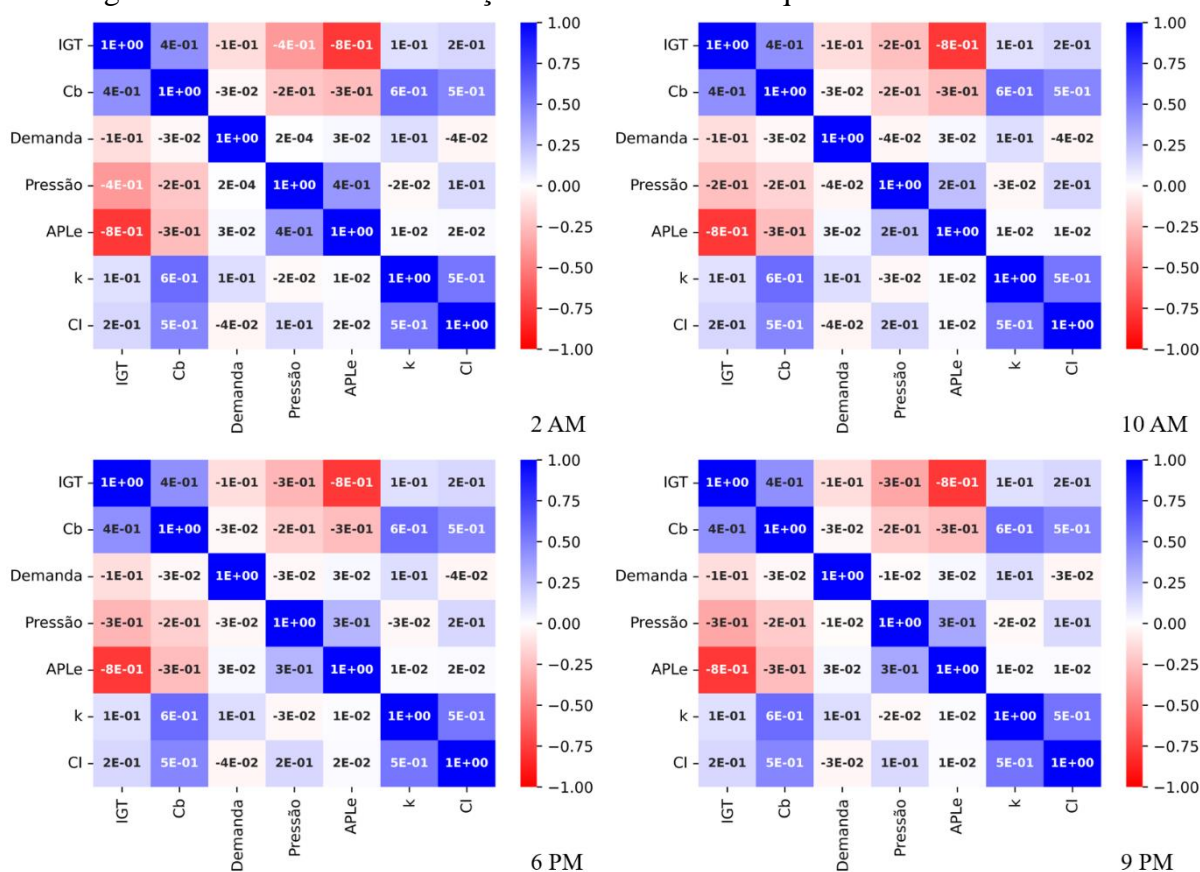
Fonte: Autor (2022)

A média para o cenário original no instante 10 AM foi de  $2,28E-03$  ( $\sigma = 3,82E-02$ ) enquanto que para o instante 2 AM de menor demanda a média foi de  $2,17E-03$  ( $\sigma = 3,63E-02$ ). Extrapolando um pouco as comparações também realizadas por Herrera; Abraham e Stoianov (2016) com a métrica de Todini, e observando a amplitude entre os mesmos instantes descritos com os expostos na Figura 53, tem-se, para o presente método uma amplitude de 5% em contraponto com 16% de amplitude para Todini. Contudo, essa é somente uma observação que vai de encontro ao postulado por Herrera; Abraham e Stoianov (2016) acerca do contraste com o método hidráulico de Todini.

Na Figura 81 ainda é possível observar que elementos de maior vulnerabilidade em função da distância do reservatório principalmente, são facilmente identificáveis. Característica que, uma vez considerado que processos de aumento de resiliência podem se dar muitas vezes pela necessidade de determinação de trechos e elementos chave, é de grande relevância.

Para uma complementação analítica mais sistemática, na Figura 82, abaixo, estão dispostas matrizes de correlação entre diferentes variáveis para o cenário original em quatro instantes no tempo. Sendo tais correlações realizadas pelo método de Spearman e utilizando métricas referentes à valores nodais do modelo. Das variáveis e parâmetros contemplados, estão o presente índice IGT, centralidade média (Cb), demanda, pressão, caminho mais curto até a fonte (APLe), grau nodal (k) e Centralidade ponderada de intermediação (CI).

Figura 82 – Matrizes de correlação entre variáveis em quatro instantes destacados.



Fonte: Autor (2022)

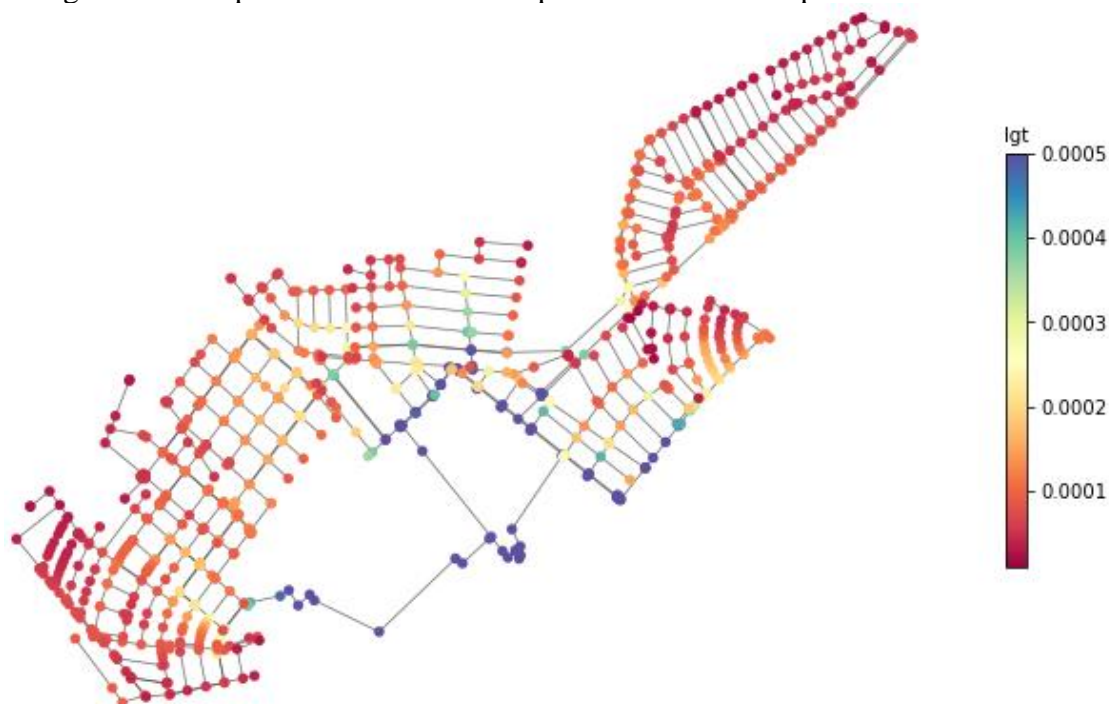
Entre as correlações de destaque, pode-se observar valores moderadamente fortes entre Cb e a métrica CI ( $\rho = 0,6$ ), condição esperada uma vez que a métrica CI deriva da primeira. Outra correlação de interesse é observada entre CI e k ( $\rho = 0,5$ ), fator pelo qual pode estar associado estrutura topológica da rede, uma vez que há relativa também correlação moderadamente forte entre Cb e k ( $\rho = 0,6$ ). E partindo-se da premissa anteriormente apresentada acerca da tendência à independência de Cb de outras variáveis, logo tais condições podem estar atreladas às condições topológicas específicas do modelo analisado.

A forte correlação negativa entre  $I_{GT}$  e  $APLe$  ( $\rho = -0,8$ ) dá-se uma vez que, em função da métrica  $I_{GT}$  utilizar-se dos comprimentos dos trechos, contudo integrando condições de fator de fricção e diâmetro, são efetuadas alterações nesse comprimento, principalmente em função do fator de fricção, o que conseqüentemente gera uma correlação negativa entre as métricas.

#### 11.4.2 Cenário I

Para o cenário I, na Figura 83, abaixo, são observadas poucas variações em relação, por exemplo aos valores observados para o cenário original. No entanto há de se ressaltar a melhora nas condições do índice para os nós adjacentes ao trecho adicionado, novamente indicando o incremento local na resiliência dada por essa alteração.

Figura 83 – Mapa da rede com valores para  $I_{GT}$  – Cenário I para o instante 10AM.



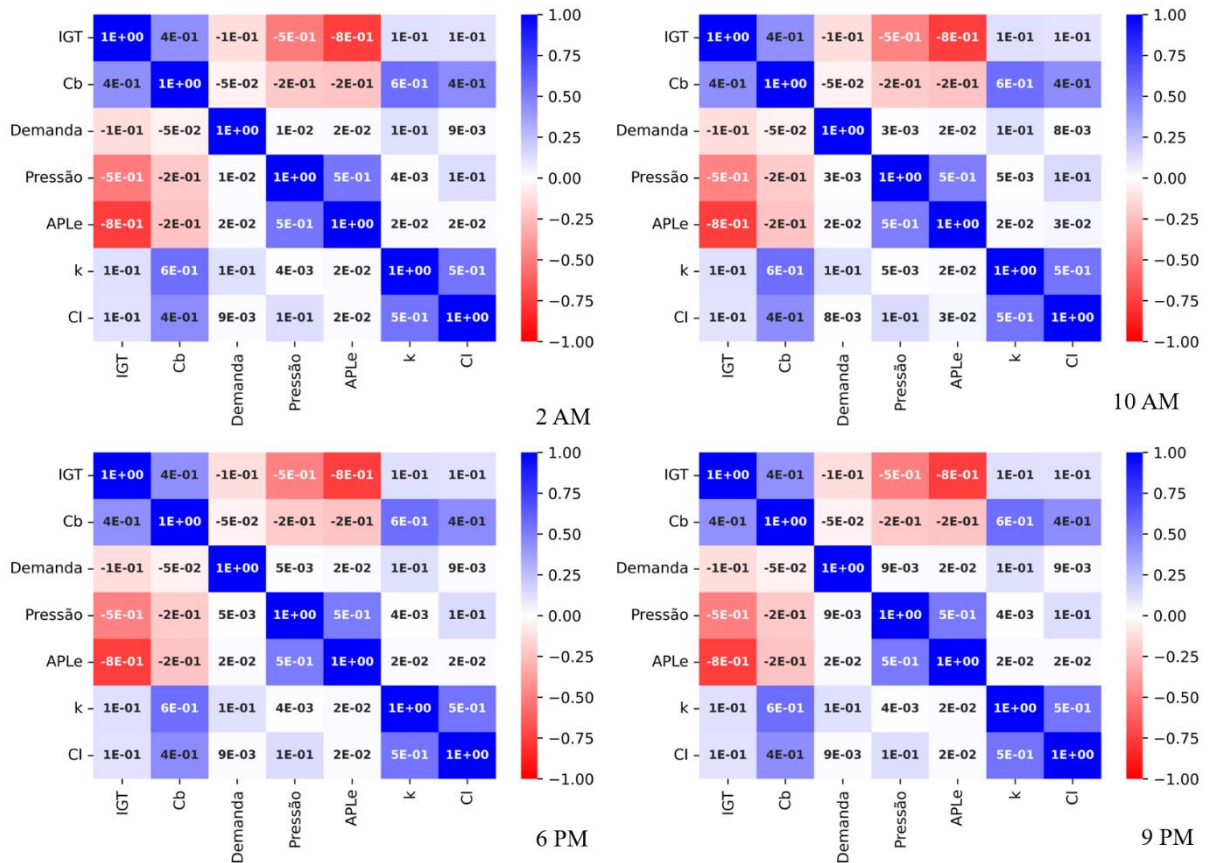
Fonte: Autor (2022)

No caso em questão, no instante 10AM uma média de  $2,26E-03$  ( $\sigma = 3,79E-02$ ) enquanto que para 2AM observou-se média de  $2,15E-03$  ( $\sigma = 3,61E-02$ ). Tais valores, em relação ao cenário original, apresentam variação positiva de 1,22 % e 1,15 % para 10AM e 2AM respectivamente. Ao compararmos com as mesmas variações para o índice de Todini,

tem-se para 10AM e 2AM respectivamente 14% e 7%. É importante ressaltar que as variações para o índice de Todini tendem a ser mais profundas, principalmente nos horários de maior demanda, em virtude de sua natureza metodológica ser fundamentada essencialmente acerca do conceito de excedente energético. Enquanto que o método I<sub>GT</sub>, por sua vez, constitui-se de variáveis mais abrangentes, sendo o fator de fricção das tubulações sua principal variável hidráulica.

De mesmo modo, na Figura 84, abaixo, as correlações ainda não exibem padrões fortes ou ao menos visivelmente distintos com exceção da forte correlação negativa entre I<sub>GT</sub> e APL<sub>e</sub> por exemplo que continuam com  $\rho = -0,8$ .

Figura 84 – Matrizes de correlação para quatro instantes de simulação indicados para o cenário I.

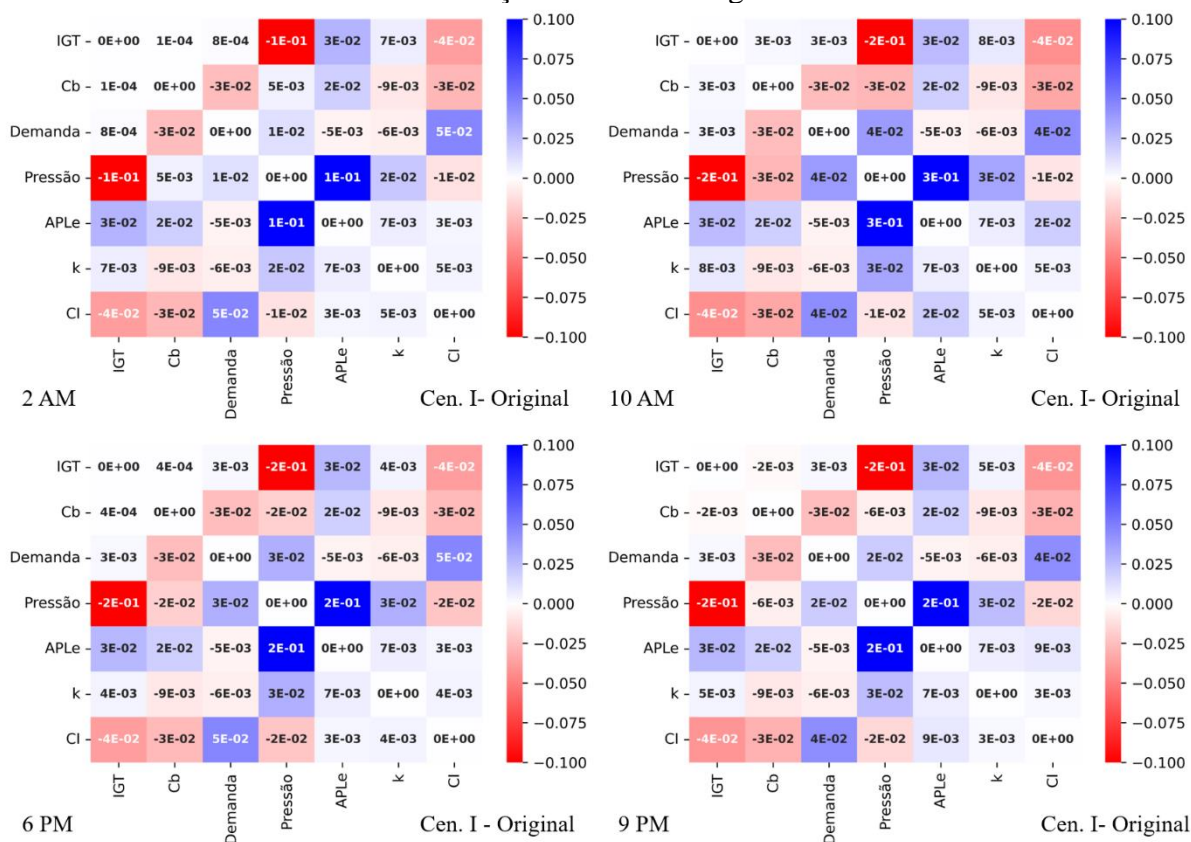


Fonte: Autor (2022)

Em vista disso, dada a existência de prováveis discrepâncias de cada cenário com a rede original, uma aferição simples de diferença percentual entre cada correlação em dado instante com a sua referida correlação observada na rede original foi realizada. Os resultados dessa variação são elucidados na Figura 85.



Figura 85 – Diferença percentual das correlações em três instantes indicados em relação à correlação do cenário original.



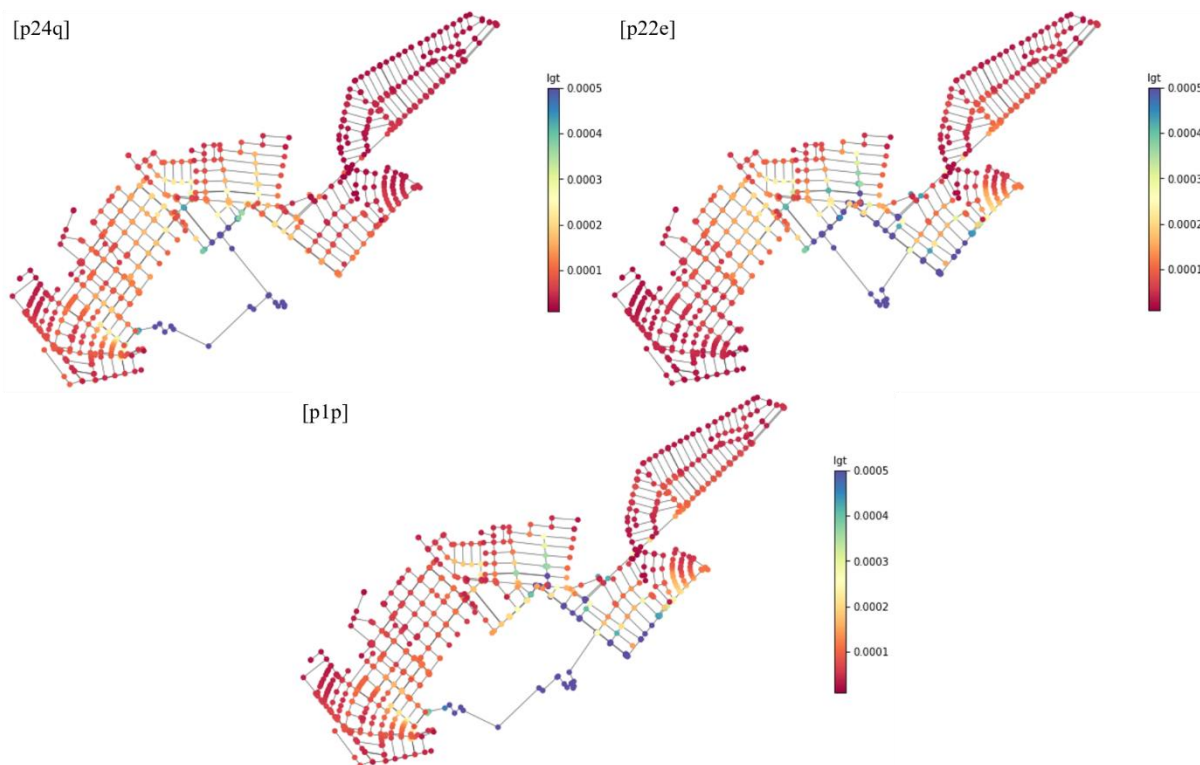
Fonte: Autor (2022)

Na Figura 85, já podemos salientar as principais diferenças ocorrentes em relação ao cenário original, principalmente com relação a pressão com relação ao índice  $IGT$  ( $\rho = -0,5$ ) e à  $APLe$  ( $\rho = 0,5$ ). Essa verificação reforça novamente a relação entre  $IGT$  e  $APLe$ , uma vez que com o incremento das pressões principalmente em nós a jusante do trecho adicionado que antes possuíam pressões menores.

### 11.4.3 Cenário II

Para os subcenários do cenário II, na Figura 86 é observado índice  $IGT$  para cara um dos subcenários indicados. Nos mesmos é possível observar consideráveis quedas nos nós de jusante principalmente nos cenários II-p24q e II-p22e.

Figura 86 – Índice  $I_{GT}$  para cada subcenário do cenário II de tubulação interrompida.



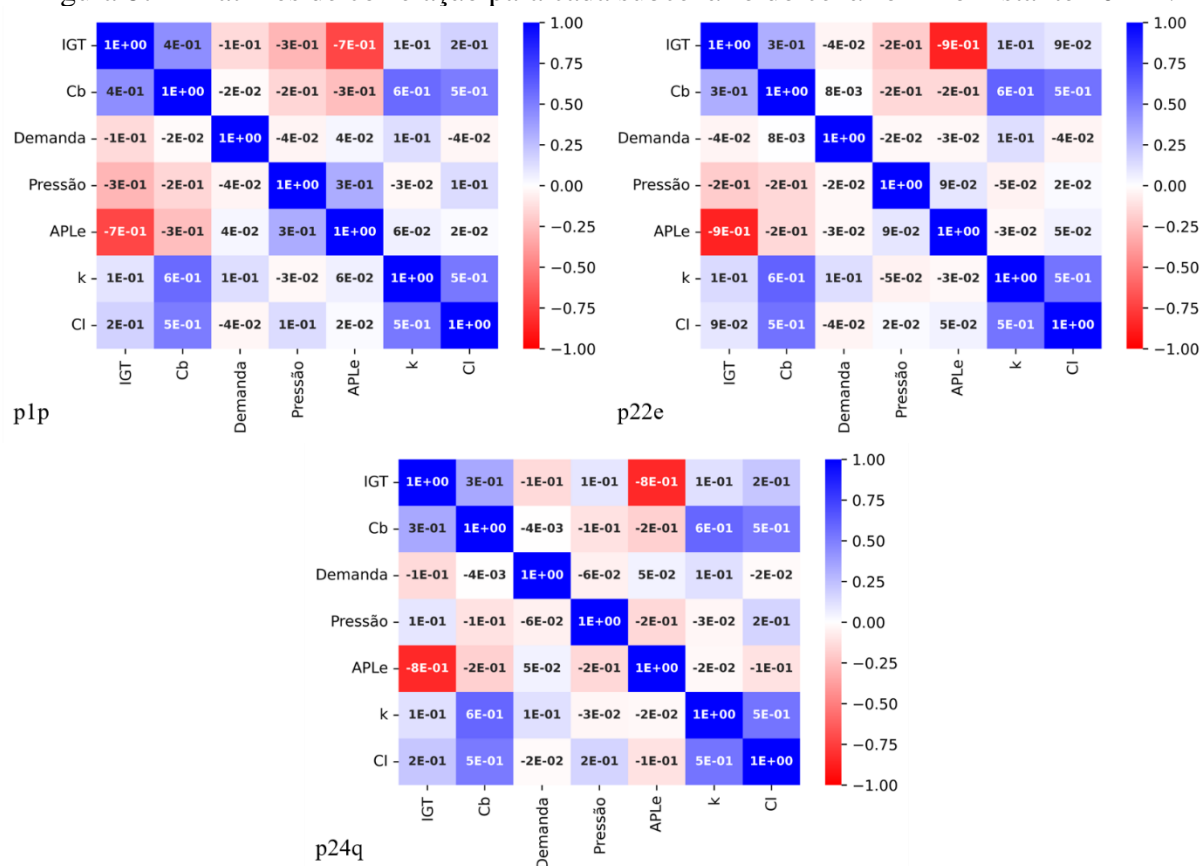
Fonte: Autor (2022)

Das variações observadas, o subcenário II – p1p apresentou médias de  $2,27E-03$  ( $\sigma = 3,82E-02$ ) e  $2,16E-03$  ( $\sigma = 3,61E-02$ ) respectivamente para os instantes 10AM e 2AM. Para II – p24q as médias para 10AM foram de  $1,88E-03$  ( $\sigma = 3,79E-02$ ) e para 2AM média de  $1,79E-03$  ( $\sigma = 3,60E-02$ ). Já para II – p22e, os valores encontrados foram de  $2,28E-03$  ( $\sigma = 3,84E-02$ ) para 10AM, enquanto que para o instante 2AM o encontrado foi  $2,17E-03$  ( $\sigma = 3,65E-02$ ).

As médias para cada subcenário descritas acima corroboram com o visualizado pela Figura 86, com quedas principalmente para II-p22e e II-p24q. Enquanto que ao observar os resultados para o Índice de Todini, tais subcenários também possuem menores índices de resiliência que o subcenário II-p1p.

Para as correlações destes subcenários, na Figura 87, abaixo, estão dispostos cada matriz de correlação. Comparando as três, é possível observar uma considerável redução na correlação de pressão e  $I_{GT}$  para II-p24q e de demanda e  $I_{GT}$  para p22e, observações essas que corroboram com as maiores distinções visuais observadas na Figura 86. Para fins de simplificação, as matrizes foram observadas com dados do instante 10AM.

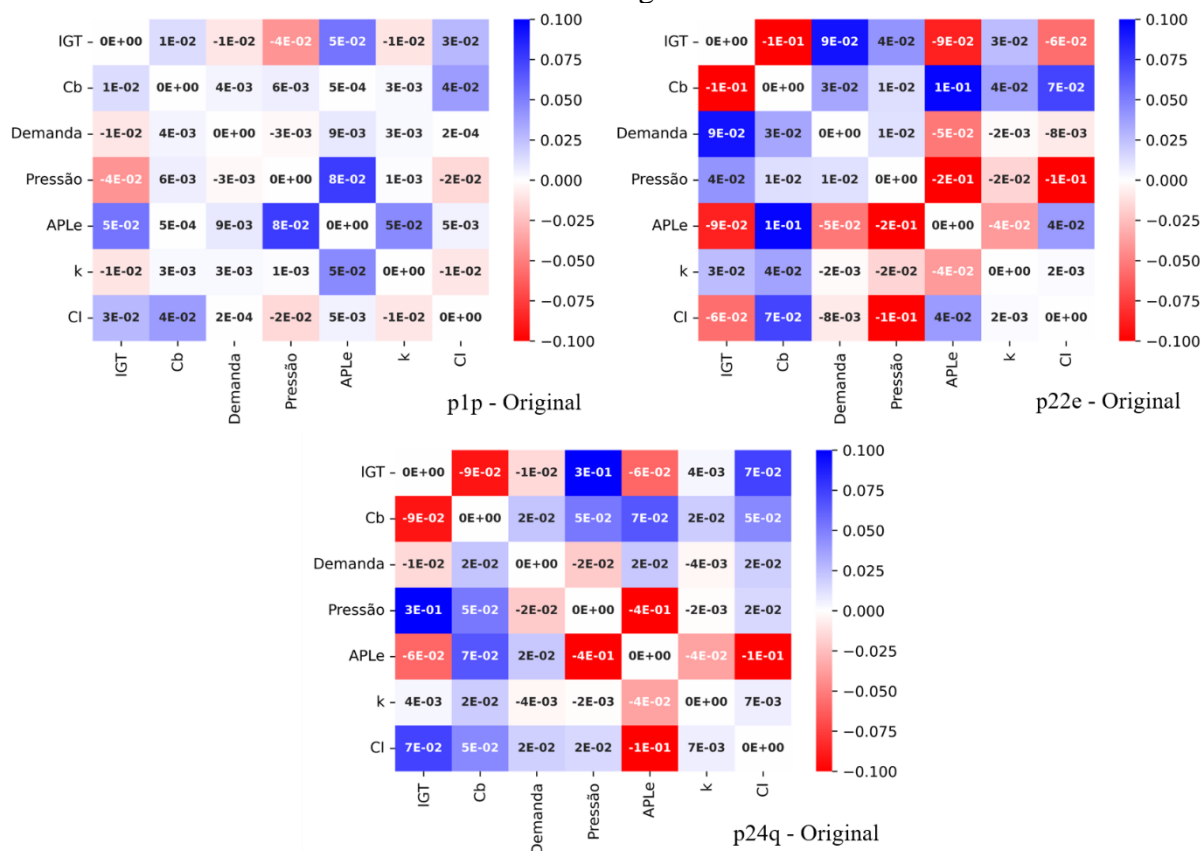
Figura 87 – Matrizes de correlação para cada subcenário do cenário II no instante 10AM.



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 87, é possível observar agora uma forte correlação negativa entre APLe e IGT ( $\rho = -0,9$  e  $-0,8$ ) para p22e e p24q. No mesmo caso observou-se uma redução dessa mesma correlação de para ( $\rho = -0,7$ ) no caso de p1p. Na Figura 88, entretanto, fica evidente a grande discrepância das correlações para os cenários II-p22e e II-p24q. Essa consideráveis variações são relacionadas principalmente a pressão e a métrica APLe e CI, indicando as observações feitas no Item 11.3.3 acerca da relação entre adutoras fechadas e regiões afetadas.

Figura 88 – Matrizes de diferença percentual de cada subcenário do cenário II em relação ao cenário original.



Fonte: Autor (2022)

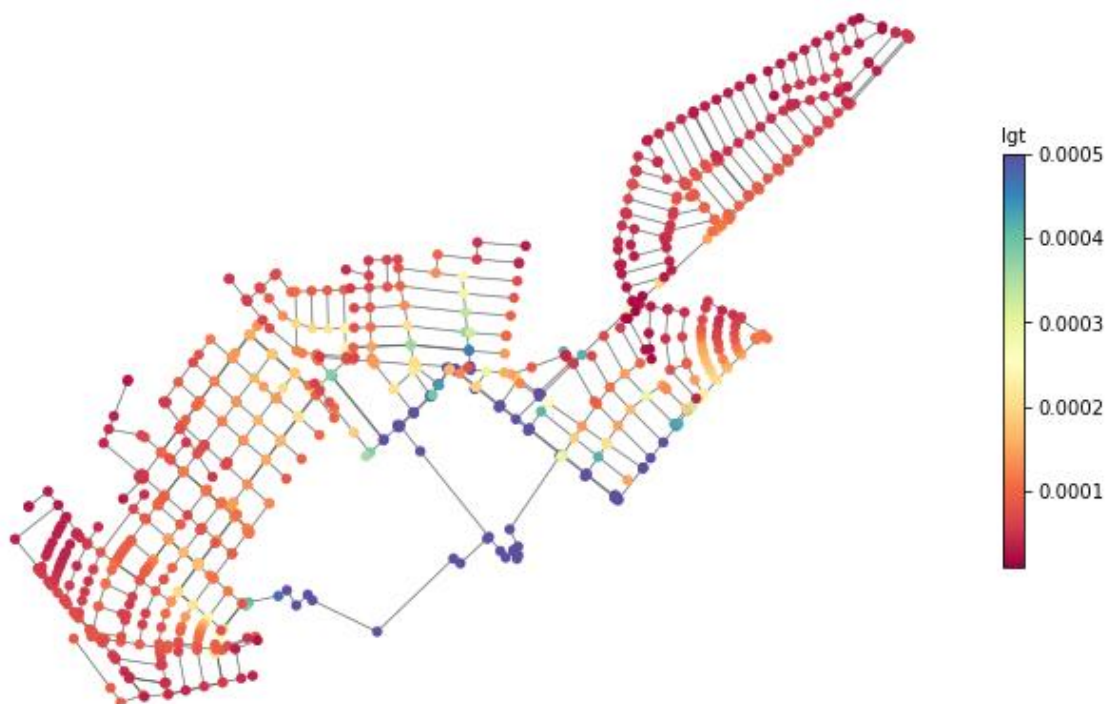
Apesar das possíveis inferências e hipóteses relevantes que possam se conceber pela observação de tais análises de correlação, todas análises devem ser cautelosas, uma vez dada a máxima de que correlações, sejam quais forem, não implicam em causalidade.

#### 11.4.4 Cenário III

Para o subcenário 2,5% do cenário III, em termos de distribuição espacial do índice, na Figura 89, não podem ser observadas discrepâncias visíveis em relação ao cenário original num primeiro momento.



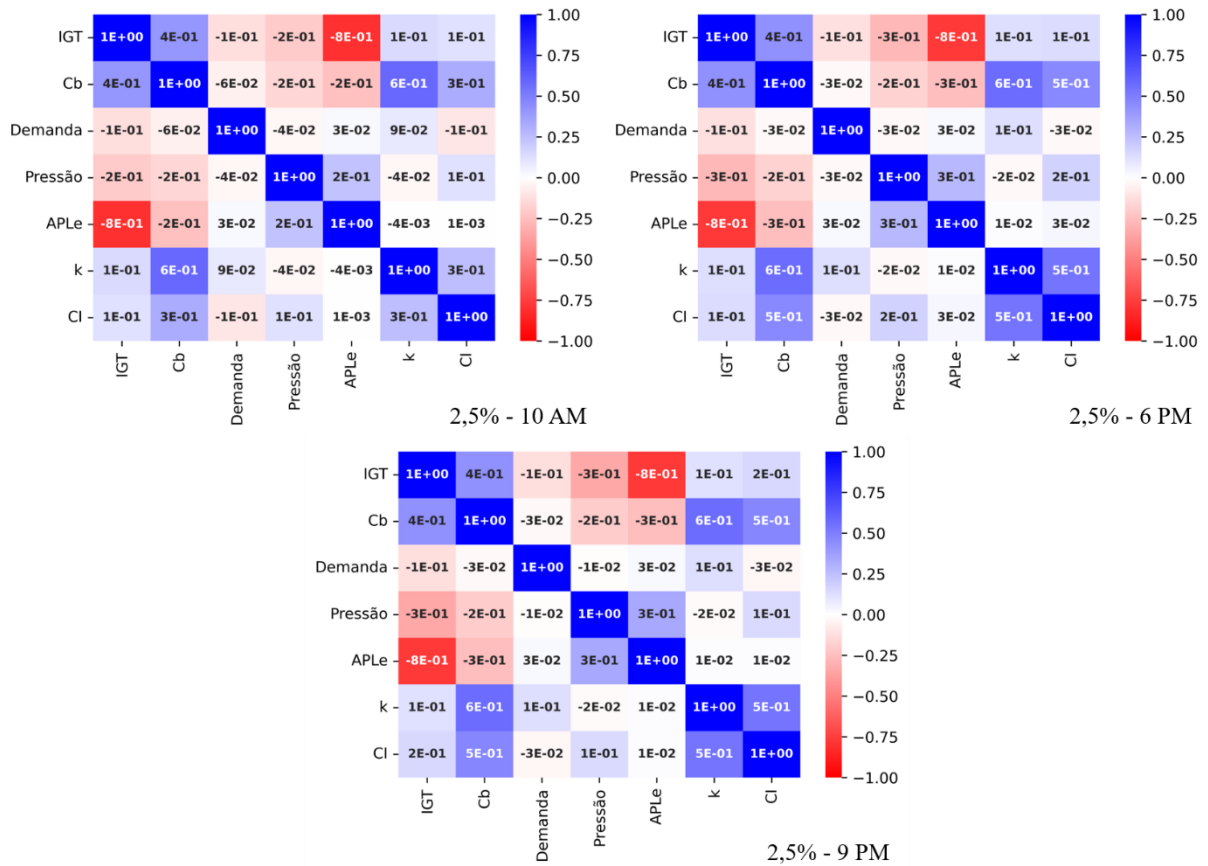
Figura 89 – Mapa dos valores de resiliência  $I_{GT}$  médios para o subcenário de 2,5% de falha do cenário III no instante 10AM.



Fonte: Autor (2022)

Ao determinar valores médios para o subcenário III-2,5%, é possível observar que os valores médios foram de  $2,29E-03$  ( $\sigma=3,82E-02$ ) para 10AM e  $2,17E-03$  ( $\sigma=3,63E-02$ ). Assim como nos outros cenários, não sofrendo variações significativas em relação ao valor da rede original. Na Figura 90, abaixo, as matrizes de correlação, visualmente, não apresentam nenhuma correlação atípica das até o momento apresentadas.

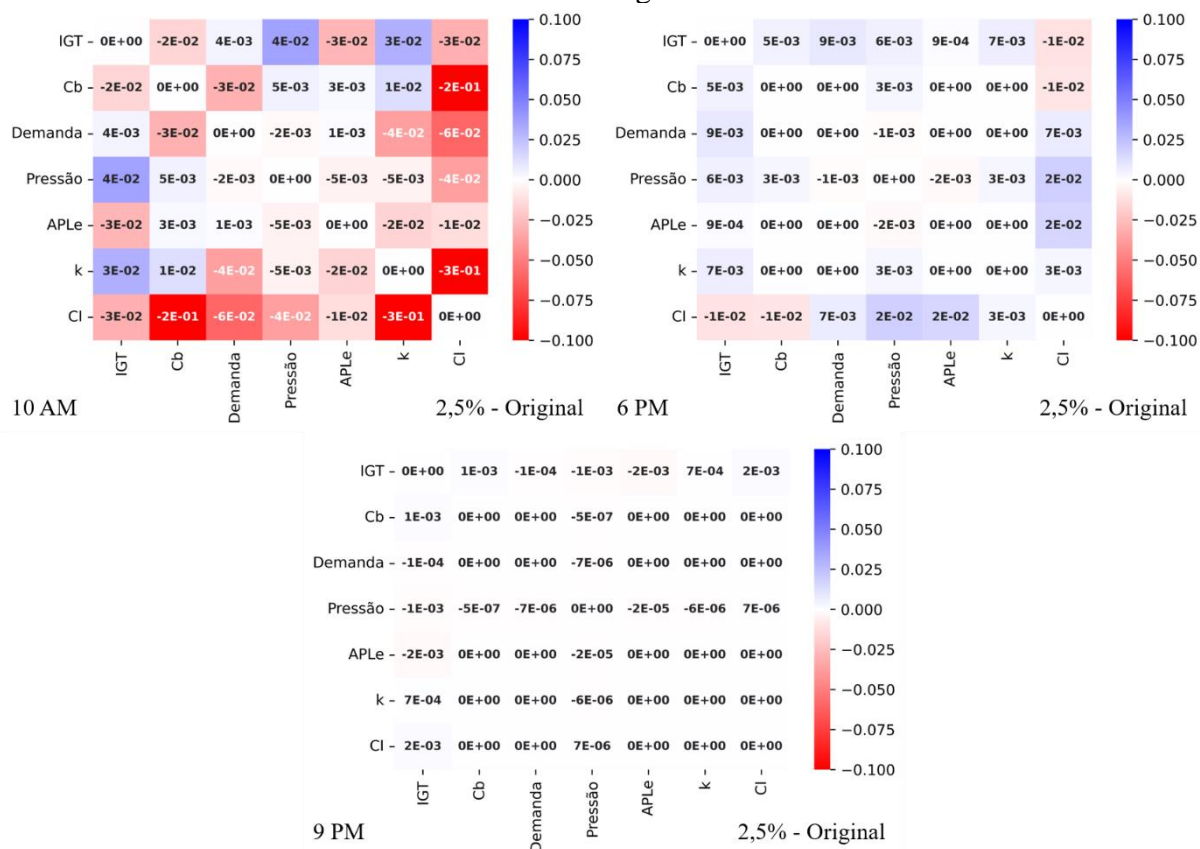
Figura 90 – Matrizes de correlação para dois instantes indicados no subcenário 2,5% do cenário III.



Fonte: Autor (2022)

Contudo, quando observadas as matrizes de comparação de variação dos valores de correlação na Figura 91, abaixo, é possível observar as grandes variações presentes sobretudo no instante 10AM. Com destaque para as variações de diminuição de correlação entre a centralidade de intermediação ponderada, a centralidade média dos nós e a média do grau dos nós, o que pode ser ocasionado pela redução no número de trechos que consequentemente reduz torna mais heterogênea a centralidade média entre os nós, bem como a grau dos nós, o que também gera consequências na centralidade de intermediação ponderada por vazão uma vez que as condições de fluxo também são alteradas.

Figura 91 – Matrizes de diferença percentual de correlação entre o subcenário de 2,5% e o cenário original.

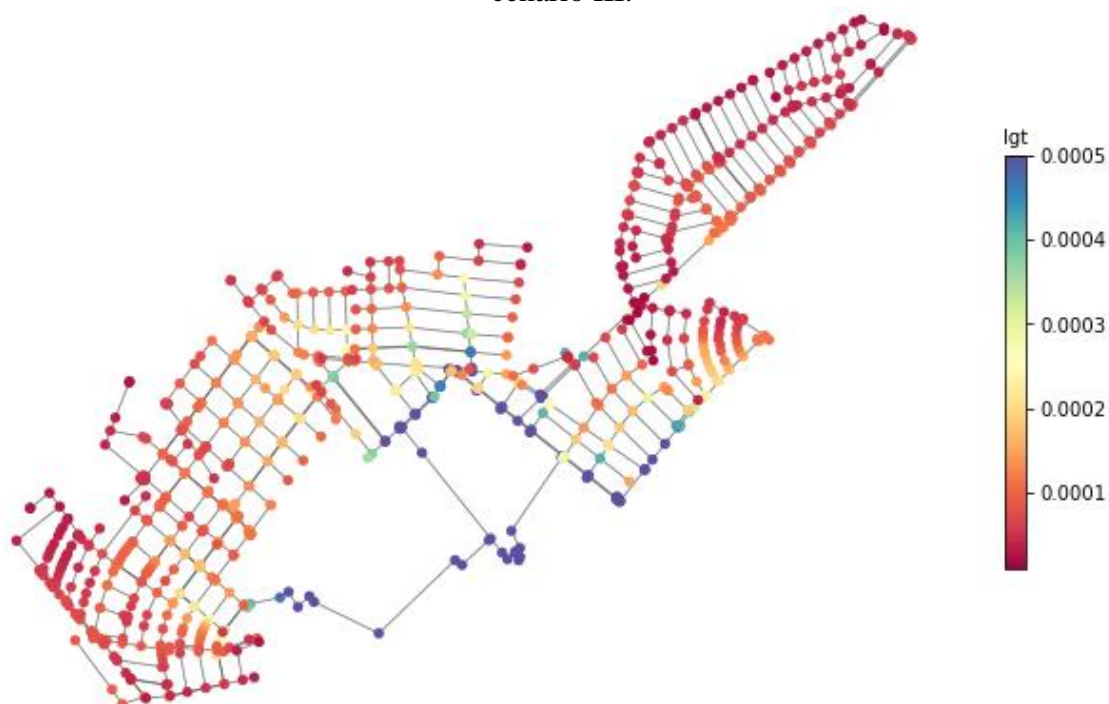


Fonte: Autor (2022)

A observação da dinâmica da diferença das matrizes de correlação apresentadas na Figura 91, em certo grau, pode elucidar graficamente o comportamento de retorno da rede após os distúrbios.

Na Figura 92, abaixo, o mapa com os valores para o índice  $I_{GT}$  para o subcenário de 5% do cenário III é exibido. Diferentemente do cenário III-2,5%, nesse caso podemos observar um decréscimo do índice principalmente para os nós periféricos do agrupamento dividido pelo principal trecho ponte da rede.

Figura 92 – Mapa dos valores de resiliência  $I_{GT}$  médios para o subcenário de 5 % de falha do cenário III.

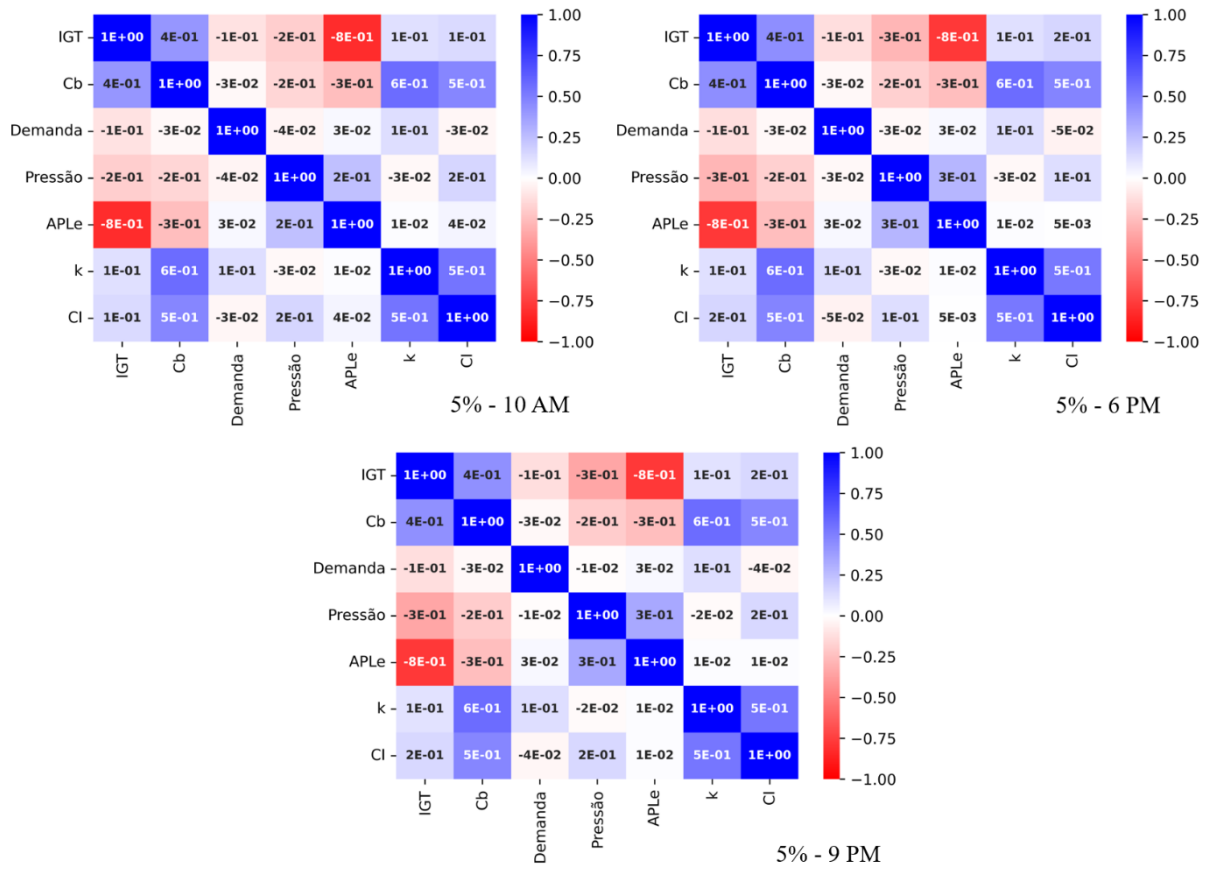


Fonte: Autor (2022)

Nesse subcenário, por sua vez, os valores dos resultados médio foi de  $2,30E-03$  ( $\sigma = 3,82E-02$ ) para 10AM e  $2,17E-03$  ( $\sigma = 3,63E-02$ ) para 2AM. Valores que se comparados com o original indicaram um aumento nos valores médios de  $I_{GT}$ , o que por sua vez pode ter relação com a condição de cálculo de caminho médio mais curto (APL) calculado no método uma vez que tal métrica tende a aumentar ao passo em que se reduz a redundância como no caso em questão.

No que diz respeito às correlações, na Figura 93, abaixo, para três instantes do cenário III-5%, não permitem a observação clara de discrepâncias ao longo do tempo entre si.

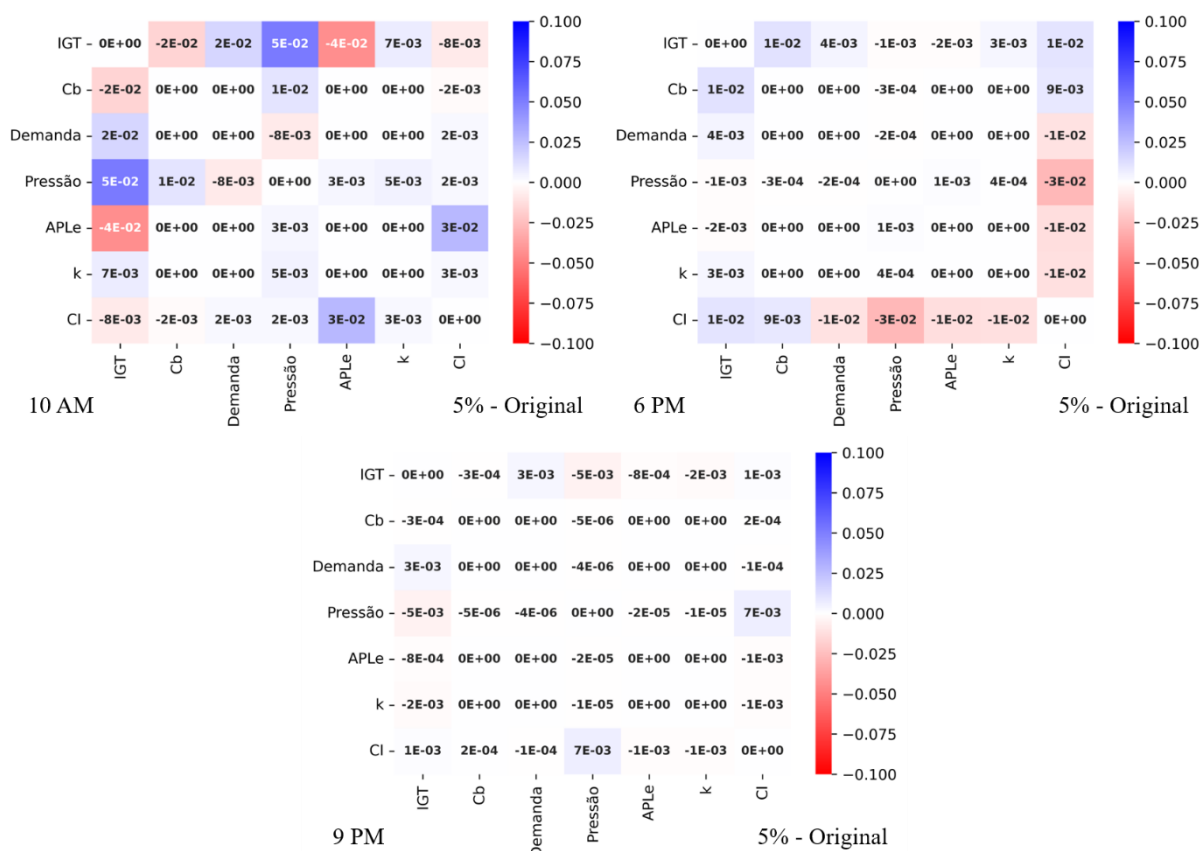
Figura 93 – Matrizes de correlação ao longo de quatro horários do dia indicados para o subcenário de 5% do cenário III.



Fonte: Autor (2022)

Contudo, realizando a análise de comparação com o cenário original, na Figura 94, abaixo, no instante 10AM quando em contraponto ao mesmo instante para o cenário III-2,5% na Figura 91, é evidente a menor discrepância em relação ao cenário original.

Figura 94 – Matriz de diferenças entre a topologia original e o subcenário de 5% do cenário III.

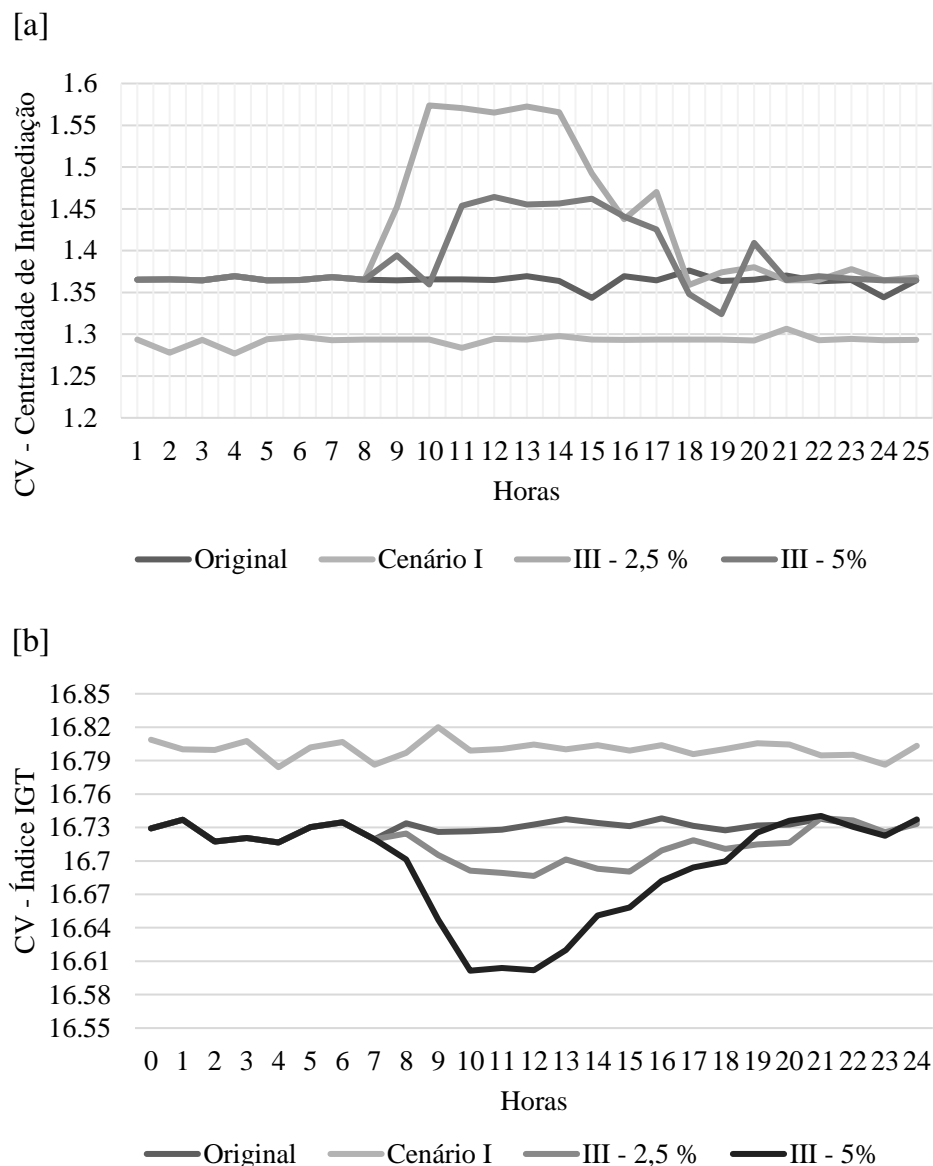


Fonte: Autor (2022)

Esse possível desarranjo lógico pode ser em decorrência dos trechos em falha em cada cenário, enquanto III-2,5% tiveram falhas de menor magnitude global, porém em trechos de maior vulnerabilidade/criticidade, as tendências de desequilíbrio ao longo da rede acabam por ser mais profundas. Ao passo em que uma falha com 5% dos trechos não tendeu a gerar discrepâncias tão profundas na centralidade média ou no grau dos nós. Outra possível hipótese é a também comentada por Creaco; Franchini e Todini (2016) e Todini (2000) de que ao passo em que ocorrem desarranjos e fragmentações na rede, ela passa a se comportar de modo como se fosse já outra rede, criando novas perspectivas e relações entre as métricas.

Por fim, considerando o caráter de conjunto de valores para os nós da rede no índice  $IGT$  e na métrica de centralidade de intermediação ponderada (CI), foram aferidos coeficientes de variação (CV) para quatro instantes (2AM, 8AM, 10AM, 6PM, 9PM) para os cenários original I, III-2,5% e III-5% no intuito de avaliara o comportamento de dispersão dos conjuntos de cada métrica em cada instante em relação aos diferentes cenários. As referidas curvas são apresentadas abaixo na Figura 95.

Figura 95 – Variação do comportamento do Coeficiente de Variação (CV) para os conjuntos de resultados de  $I_{GT}$  [b] e Centralidade de Intermediação com vazão (CI) [a].



Fonte: Autor (2023)

De modo geral, mesmo que haja uma parcela de preciosismo na observação de determinadas pequenas variações, observando os desvios padrões ao longo do comportamento das duas métricas em cada cenário, foi possível observar que o cenário I apresentou menor variação para  $I_{GT}$  com  $\sigma 2,0E-3$  e CI de  $\sigma 4,0E-3$ . Enquanto o cenário original, teve variações de  $\sigma 7,0E-3$  e  $\sigma 1,0E-3$  para  $I_{GT}$  e CI respectivamente. Os cenários III-2,5% e III-5% apresentaram  $\sigma 1,6E-2$  e  $\sigma 4,7E-2$ , respectivamente, para  $I_{GT}$ , enquanto que para CI ambas apresentaram  $\sigma 2,2E-2$  e  $\sigma 7,7E-2$  também respectivamente.

Há de ressaltar também a baixa variabilidade local dos agrupamentos de maior CI, observadas principalmente pelos mapas de calor na maior parte dos cenários, além da existência evidente de uma região de grande vulnerabilidade, a constatação de uma propensão a condições estocásticas de relação entre os diferentes parâmetros e variáveis como reforçado pelos estudos de Borgatti e Everett (2006) e Lozares et al. (2015) relacionados a sensibilidade e comportamento da centralidade média.

No presente estudo, por exemplo, podemos destacar a relativa baixa centralidade em trechos ponte na rede, em especial o identificado para a concepção do cenário I. O mesmo, tem em média uma centralidade ponderada CI de 0,308 ao longo do dia, enquanto que os principais nós componentes do agrupamento com alto CI apresentam valores médios diários da ordem de 0,481, uma diferença de percentual de cerca de 56 % entre ambos. Evidentemente que comparações diretas podem ser equivocadas, uma vez que a métrica não é determinada exclusivamente a partir das potenciais vulnerabilidades topológicas da rede. Contudo, quando consideramos por exemplo a conjuntura espacial de demandas na rede observamos uma tendência à não linearidade entre as dadas condições. Lozares et al. (2015) constatou uma considerável independência da métrica de centralidade média de outras métricas como por exemplo do grau dos nós.

Apesar de não ser possível inferir concretamente tais variações como forma de indicar qualidade das metodologias, é interessante salientar que, uma vez conhecendo-se a rede e seus pormenores e inferindo métricas básicas, a observação de um coeficiente de variação (CV) indicando um conjunto de dados de menor amplitude e mesmo um comportamento dessas amplitudes menos divergentes, acabam por ser indícios complementares de que a métrica utilizada teve razoável capacidade de identificar impactos negativos ou positivos infringidos à rede.

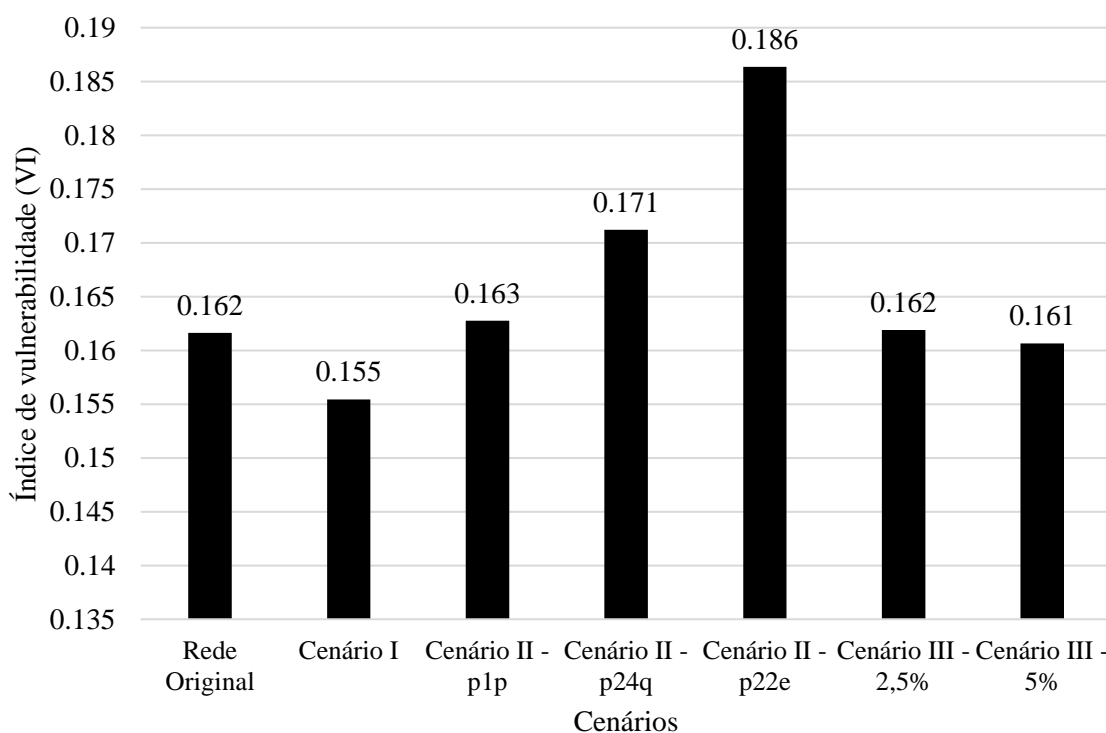


### 11.5 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE (VI<sub>E</sub>)

A partir da aplicação dos resultados de entropia a partir da centralidade média da rede recém expostos, com a aplicação da Equação (23), obtêm-se  $VI \cong 0,16$ . Mesmo que, evidentemente, não seja possível alegar, puramente a partir do resultado de VI, uma dimensão exata da magnitude da vulnerabilidade da rede, deduções parcimoniosas a partir do mapa de distribuição da centralidade média e com os resultados obtidos das verificações do método feitas por Zarghami; Gunawan e Schultmann (2018b). A interpretação do resultado com esses aspectos corrobora com a constituição do traçado da rede que observado pelos quantitativos de grau dos nós, não sendo uma rede com traçado malhado nem ramificado em sua totalidade. Com a distribuição espacial da centralidade, é possível identificar nós cuja importância para o escoamento é maior e, portanto, a existência de disparidades dessa métrica ao longo da rede.

Na Figura 96, abaixo, o gráfico mostra os valores de vulnerabilidade para cada cenário em questão, sendo possível observar uma melhora na vulnerabilidade no cenário I e incrementos significativos para os cenários II-p22e e II-p24q. Esse último apontando para a vulnerabilidade de tais trechos, condição que pode também ser observada principalmente nas metodologias IGT e nos resultados do Índice de Todini. Agregando o presente resultado destacado, há o reforço indicativo de que a remoção de tais trechos dentro da rede causa um maior estado de maior imprevisibilidade ao abastecimento. As condições determinantes específicas para essa maior vulnerabilidade podem ainda não ser completamente conhecidas, visto que elas não estão unicamente ligadas ao trecho removido ou aos trechos adutores restantes no caso em questão, e também por eventuais relações de demanda, vazões e pressões.

Figura 96 – Valores de vulnerabilidade (VI) para cada cenário.



Fonte: Autor (2022)

Outro ponto a se salientar é a existência de alterações baixas ou nulas como nos casos do cenário II-p1p, III-2,5% e III-5%. Cujas variações, principalmente na centralidade média (i.e., métrica elementar do método), não tenham sido expressivas ao ponto de representar condição suscetível à alteração.

Relembrando que muitos índices, tanto os aplicados no presente estudo (i.e., Método de centralidade de intermediação, Índice  $I_{GT}$  e Índice VI, etc.) como outros eventualmente não contemplados, fundamentam-se essencialmente nos valores de centralidade média dos vértices do grafo, que, por sua vez, assim como a centralidade de proximidade (BAVELAS, 1950) e a centralidade de auto vetor (BONACICH, 1972), são amplamente convencionados como métricas fundamentais de centralidade no que concerne aplicações em redes complexas (LOZARES et al., 2015; ZARGHAMI; GUNAWAN; SCHULTMANN, 2019b).

## 12 CONCLUSÃO

Por fim, dentre as diferentes métricas e metodologias observadas no presente trabalho, pode-se concluir, primeiramente, no que concerne as questões etimológicas relacionadas à resiliência e suas variantes e terminologias encontradas na bibliografia acadêmica, mesmo que difusas, há uma fácil identificação da relação entre as mesmas principalmente nos conceitos relacionados à topologia. Isso permite que, mesmo que condições de resiliência não sejam o objetivo de uma determinada técnica ou implementação, impactos positivos possam ser adereçados a mesma.

Quanto as métricas topológicas e espectrais, são evidentes as limitações existentes quanto a aplicação em redes de distribuição de água. Haja vista a baixa sensibilidade de várias das mesmas diante de cenários cujos custos de desabastecimento certamente seriam significativos e do significativo grau de incerteza de muitas das técnicas gerando a necessidade de observações e levantamentos acurados a respeito do traçado da rede. Faz-se necessário destacar a maior aplicabilidade das técnicas topológicas no estágio de projeto da rede de abastecimento, uma vez que o traçado das tubulações é quase sempre limitado ao arruamento urbano. Aliado a isso é importante lembrar o caráter sistêmico e interdependente da resiliência, sendo imprescindível o planejamento integrado dos mais diferentes setores que direta ou indiretamente influenciam no abastecimento eficiente e de qualidade.

A implementação de métricas topológicas básicas, por sua vez, como por exemplo densidade de trechos ( $q$ ), grau médio de nós ( $\langle k \rangle$ ), por serem de simples aplicação são de fácil adoção, e, havendo o apropriado conhecimento de suas limitações, podem proporcionar mesmo a redes já existentes um maior conhecimento acerca das mesmas e conseqüentemente um maior entendimento acerca de potenciais vulnerabilidades.

Métricas espectrais como o raio espectral ( $1/\lambda_1$ ) e lacuna espectral ( $\Delta\lambda$ ), aliadas à métricas como diâmetro do grafo ( $D$ ), denotam interessante potencial exploratório principalmente na temática de disseminação de contaminantes e entendimento do fluxo ao longo da rede. Mesmo não sendo aspectos cujo comportamento demonstrou-se sensível o suficiente para os cenários testados no presente trabalho, outras alternativas também correlatas à resiliência podem ser viáveis à tais métricas. Métricas como centralidade média de nós ( $C_b$ ) e de trechos ( $C_{eb}$ ) mostraram destacável utilidade no entendimento do comportamento do setor em questão, com destaque para centralidade de trechos que se mostrou complementar a observações da metodologia de centralidade ponderada de intermediação ( $CI$ ).

A metodologia de Todini provou-se eficaz no cenário original, cenário I e cenários II, em virtude principalmente da não existência de eventos de falha dentro da rede, que, ou impediram uma detecção apurada do ocorrido (e.g., cenário III-2,5%) ou incutiram em valores extremos de pouca valia interpretativa. Contudo, é de se ressaltar ainda a existência de metodologias análogas e já refinadas do supracitado índice e que eventualmente possam ter melhor desempenho diante de cenários como os observados no presente trabalho.

As métricas de centralidade de intermediação (CI) e de resiliência ( $I_{GT}$ ) também se provaram eficazes em algumas questões. No entanto é possível identificar que, em virtude do tamanho e configuração da rede analisada, a métrica de centralidade de intermediação não teve capacidade de identificar com acurácia, casos como o cenário III, com destaque para a falha de 5%. As formas de ilustração dos resultados espacialmente, mesmo em testes com camadas diferentes dos mapas de calor, fatores como a proximidade dos nós podem ter impedido uma identificação mais detalhada dos resultados. No que tange o índice  $I_{GT}$ , apesar de ser uma métrica pautada em princípios elementares tanto da hidráulica como da topologia, ela apresentou razoável capacidade de identificação de trechos de relevância como trechos-ponte e estruturas cuja distância do reservatório torna os elementos mais vulneráveis. Contudo, condições de falha como a do cenário III apresentaram resultados levemente anômalos aos observados nos outros cenários, indicando a necessidade de melhoria na estruturação de cenários de falha mais refinados diferentemente do procedimento de fechamento do trecho.

Para com o índice de vulnerabilidade, considerando os preceitos de centralidade média do método, cenários como II-p22e terem destoado em meio aos outros resultados prova que a métrica pode tender a gerar resultados razoáveis, mas ainda necessita de profundos incrementos e refinamentos, uma vez que, apesar de II-p22e coincidir com os resultados de Todini, os cenários II-p1p e II-p24q apresentaram divergentes em termos relativos. No entanto a referida métrica se mostrou adequada para determinar condições de melhoria da rede, com potencial, dadas suas devidas limitações, para auxiliar no entendimento das redes mesmo em fase de planejamento e projeto.

Resultados contraditórios entre as metodologias, como os observados entre a centralidade de intermediação pondera (CI) e o índice de Todini, reforçaram observações como as realizadas por Zarghami; Gunawan e Schultmann (2019a) e Di Nardo et al. (2018c) acerca da ocorrência dessas limitações sobre a interpretação das métricas. Fenômeno esse que reitera a não trivialidade da tarefa de aferição de resiliência em redes de distribuição de água, havendo

da implementação e construção dos métodos contemplar tanto perspectivas topológicas, hidráulicas e mecânicas/estruturais, como também até mesmo sociológicas e humanas.

Em alíneas gerais, o levantamento terminológico e observação dos rumos das publicações acadêmicas do tema foram essenciais para a realização do traçado metodológico, uma vez que foi constatada a existência da necessidade de convergência entre aspectos topológicos e hidráulicos. Quanto a aplicação das métricas topológicas e das metodologias de aferição da resiliência foram satisfatoriamente implementadas mesmo que estudos futuros ainda sejam necessários e essenciais para o melhor entendimento da resiliência sobre as complexidades inerentes às redes de abastecimento de água.

### 13 SUGESTÕES A FUTUROS ESTUDOS

Adereçando alguns adendos ao Índice de Vulnerabilidade (VI), metodologia proposta por Zarghami; Gunawan e Schultmann (2018b) associando a centralidade média à entropia de Shannon, é pertinente destacar o potencial de refinamento do método através da implementação de diferentes métricas de entropia, como, por exemplo, as métricas de Renyi (1970) e (Tsallis; Mendes e Plastino (1998) ambas observadas e comparadas com a entropia de Shannon por Maszczyk e Duch (2008).

Utilização de análise da topologia de redes de abastecimento de água e a identificação de pontos críticos que podem afetar a resiliência da rede em caso de falha. As métricas topológicas, como a centralidade de grau e de intermediação, podem ser usadas para avaliar a importância de cada nó na rede e identificar áreas críticas.

Aprimoramento e aprofundamento de análises acerca das metodologias e métricas topológicas e sua correlação e dinâmica com métricas hidráulicas para melhor compreensão da estrutura de relação dessas componentes e, portanto, da própria resiliência da rede. Análises de diferentes cenários também é condição fundamental para o aprimoramento das análises, eventuais gerações de cenários por meio de técnicas estatísticas como de Monte Carlo podem, por exemplo, auxiliar na convergência para aspectos de maior relevância na determinação da resiliência.

Implementação de técnicas de aprendizado de máquina para auxiliar na análise das redes de abastecimento de água. Gerando técnicas que possam ajudar a identificar padrões e relações complexas entre as diferentes variáveis envolvidas na análise, permitindo uma avaliação mais precisa e eficiente da resiliência da rede. Aprofundamento das correlações realizadas no presente trabalho tanto como nos estudos de Giudicianni et al. (2018), Pagano et al. (2019) e entre outros.

Dados os resultados de centralidade de intermediação ponderada (CI) que, dadas ressalvas das proporção e detalhes observados, coincidiram com os observados por Agathokleous; Christodoulou e Christodoulou (2017a), cabe destacar a hipótese, partindo-se do pressuposto de que, com o incremento da centralidade de intermediação ponderada (CI) há o aumento da vazão nesses trechos, e havendo o comportamento de variação (i.e., deslocamento/alteração de fluxo) desses eventuais agrupamentos, o exercício de previsão destas condições de vulnerabilidades específicas pode prevenir com que caminhos preferenciais se

formem com o decorrer da variações da operação da rede ao passo que o monitoramento dos agrupamentos de vulnerabilidade permitam a criação de estratégias de gerenciamento alinhadas com a realidade da rede de distribuição.

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-MOTTALEB, N. **A System Architecture for Water Distribution Networks**. [s.l.] University of South Florida, 2021.
- ABNT, A. B. DE N. T. NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. p. 28, 2017.
- ADASA, A. R. DE Á. E. E S. B. DO D. Fiscalização Indireta: Resultados da Avaliação de Desempenho dos Serviços de Abastecimento de Água e de Esgoto. p. 109, 2018.
- AGATHOKLEOUS, A.; CHRISTODOULOU, C.; CHRISTODOULOU, S. E. Topological Robustness and Vulnerability Assessment of Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, v. 31, n. 12, p. 4007–4021, 2017a.
- AGATHOKLEOUS, A.; CHRISTODOULOU, M. C.; CHRISTODOULOU, S. E. Robustness and vulnerability assessment of water networks by use of centrality metrics. **European Water**, n. 58, p. 489–495, 2017b.
- AGATHOKLEOUS, A.; CHRISTODOULOU, S. Vulnerability of Urban Water Distribution Networks under Intermittent Water Supply Operations. **Water Resources Management**, v. 30, n. 13, p. 4731–4750, 3 out. 2016.
- ALBARAKATI, A.; TASSADDIQ, A.; KALE, Y. Evaluation of the vulnerability in water distribution systems through targeted attacks. **Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society**, v. 70, n. 8, p. 1257–1271, 2021.
- ALBERT, R.; JEONG, H.; BARABÁSI, A. L. Error and attack tolerance of complex networks. **Nature**, v. 406, n. 6794, p. 378–382, 2000.
- ARAUJO, L. F. DE et al. Análise da cobertura de abastecimento e da qualidade da água distribuída em diferentes regiões do Brasil no ano de 2019. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 27, n. 7, p. 2935–2947, 2022.
- ARENALES, A. **Avaliação da resiliência de uma empresa de saneamento frente às mudanças climáticas-Estudo de caso do município de Araraquara/SP**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 27 ago. 2019.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.



- ARSIC, B. et al. Graph spectral techniques in computer sciences. **Applicable Analysis and Discrete Mathematics**, v. 6, n. 1, p. 1–30, 2012.
- ASH, J.; NEWTH, D. Optimizing complex networks for resilience against cascading failure. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 380, n. 1–2, p. 673–683, jul. 2007.
- ASSAD, A.; BOUFERGUENE, A. Resilience assessment of water distribution networks – Bibliometric analysis and systematic review. **Journal of Hydrology**, v. 607, 1 abr. 2022.
- AWUMAH, K.; GOULTER, I.; BHATT, S. K. Assessment of reliability in water distribution networks using entropy based measures. **Stochastic Hydrology and Hydraulics**, v. 4, n. 4, p. 309–320, 1990.
- AZEVEDO NETTO, J. M. et al. Manual de hidráulica. **8ª Ed.**, v. 8ª Ed., p. 669, 1998.
- BARTON, N. A. et al. Improving pipe failure predictions: Factors effecting pipe failure in drinking water networks. **Water Research**, v. 164, p. 114926, 2019.
- BAVELAS, A. Communication Patterns in Task-Oriented Groups. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 22, n. 6, p. 725–730, nov. 1950.
- BEHZADI, G. et al. Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models. **Omega**, v. 79, p. 21–42, set. 2018.
- BELL, J. R. Subgroup centrality measures. **Network Science**, v. 2, n. 2, p. 277–297, 7 ago. 2014.
- BETTENCOURT, L. M. A.; KAISER, D. I.; KAUR, J. Scientific discovery and topological transitions in collaboration networks. **Journal of Informetrics**, v. 3, n. 3, p. 210–221, 2009.
- BOLDI, P.; VIGNA, S. Axioms for centrality. **Internet Mathematics**, v. 10, n. 3–4, p. 222–262, 1 jan. 2014.
- BONACICH, P. Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification. **The Journal of Mathematical Sociology**, v. 2, n. 1, p. 113–120, jan. 1972.
- BORGATTI, S. P.; EVERETT, M. G. A Graph-theoretic perspective on centrality. **Social Networks**, v. 28, n. 4, p. 466–484, out. 2006.
- BRANDES, U. A faster algorithm for betweenness centrality\*. **The Journal of Mathematical Sociology**, v. 25, n. 2, p. 163–177, jun. 2001.

BRANDES, U. On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation. **Social Networks**, v. 30, n. 2, p. 136–145, 2008a.

BRANDES, U. On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation. **Social Networks**, v. 30, n. 2, p. 136–145, 2008b.

BRASIL. **Lei N° 14.026/2020**. Brasil, 2020a.

BRASIL. **ENSIC**. , 2020b. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/decreto/d10569.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10569.htm)>

BUHL, J. et al. Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements. **The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems**, v. 49, n. 4, p. 513–522, fev. 2006.

CADINI, F.; ZIO, E.; PETRESCU, C. A. Using centrality measures to rank the importance of the components of a complex network infrastructure. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**, v. 5508 LNCS, p. 155–167, 2009.

CANDELIERI, A.; SOLDI, D.; ARCHETTI, F. Network analysis for resilience evaluation in water distribution networks. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 14, n. 6, p. 1261–1270, 2015.

CHANG, S. E.; SHINOZUKA, M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities. **Earthquake Spectra**, v. 20, n. 3, p. 739–755, 2004.

CHRISTENSEN, R. T. **Age effects on iron-based pipes in water distribution systems**. [s.l.] Utah State University, 2009.

CREACO, E.; FRANCHINI, M.; TODINI, E. The combined use of resilience and loop diameter uniformity as a good indirect measure of network reliability. **Urban Water Journal**, v. 13, n. 2, p. 167–181, 2016.

DANKELMANN, P.; GODDARD, W.; SWART, C. S. The Average Eccentricity of a Graph and its Subgraphs. In: **Utilitas Mathematica**. [s.l: s.n.]. p. 65.

DHS, D. OF H. S. **A Guide to a Critical Infrastructure Security and Resilience**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/Guide-Critical-Infrastructure-Security-Resilience-110819-508v2.pdf>>.

DI NARDO, A. et al. Water Network Sectorization Based on Graph Theory and Energy Performance Indices. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 5, p. 620–629, maio 2014.

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

DI NARDO, A. et al. Water Supply Network Partitioning Based On Weighted Spectral Clustering. In: CHERIFI, H. et al. (Eds.). **Studies in Computational Intelligence**. Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer International Publishing, 2017b. v. 693p. 797–807.

DI NARDO, A. et al. Complex network and fractal theory for the assessment of water distribution network resilience to pipe failures. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 18, n. 3, p. 767–777, 2018a.

DI NARDO, A. et al. Applications of graph spectral techniques to water distribution network management. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 1, 2018b.

DI NARDO, A. et al. Simplified Approach to Water Distribution System Management via Identification of a Primary Network. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 2, fev. 2018c.

DI NARDO, A. et al. Complex network and fractal theory for the assessment of water distribution network resilience to pipe failures. **Water Supply**, v. 18, n. 3, p. 767–777, 1 jun. 2018d.

DIAO, K. et al. Global resilience analysis of water distribution systems. **Water Research**, v. 106, p. 383–393, 2016.

DONETTI, L.; HURTADO, P. I.; MUÑOZ, M. A. Entangled networks, synchronization, and optimal network topology. **Physical Review Letters**, v. 95, n. 18, p. 1–4, 2005.

DONETTI, L.; NERI, F.; MUÑOZ, M. A. Optimal network topologies: expanders, cages, Ramanujan graphs, entangled networks and all that. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, v. 2006, n. 08, p. P08007–P08007, 7 ago. 2006.

DUTHEUIL, C. **L'état de l'art de la bibliométrie et de la scientométrie en France et à l'étranger** Rapport pour le compte du SGDN. [s.l: s.n.].

DZIEDZIC, R.; KARNEY, B. W. Performance Index for Water Distribution Networks under Multiple Loading Conditions. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 1, p. 04015040, jan. 2016.

DZIEDZIC, R. M.; KARNEY, B. W. Water distribution system performance metrics. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 363–369, 2014.

ESTRADA, E. Network robustness to targeted attacks. the interplay of expansibility and degree distribution. **European Physical Journal B**, v. 52, n. 4, p. 563–574, 2006.

EU, E. U. Resilience of critical infrastructure protection - Guidelines. **Humanitarian Aid and Civil Protection**, p. 72, 2015.

FARMANI, R.; WALTERS, G. A.; SAVIC, D. A. Trade-off between Total Cost and Reliability for Anytown Water Distribution Network. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. 3, p. 161–171, 2005.

FIEDLER, M. Algebraic connectivity of graphs. **Czechoslovak Mathematical Journal**, v. 23, n. 2, p. 298–305, 1973.

FORMIGA, K. **Otimização Multiobjetivo De Projetos De Redes De Distribuição de Água**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 2005.

FOSTER, J. G. et al. Edge direction and the structure of networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107, n. 24, p. 10815–10820, 2010.

FREEMAN, J. R. The arrangement of hydrants and water-pipes for the protection of a city against fire. **Journal of New England Water Works Association (JNEWWA)**, v. 7, n. 1, p. 49–81, 1892.

FREEMAN, L. C. Centrality in social networks. **Social Networks**, v. 1, n. 3, p. 215–239, 1979.

GAMA, B. C. Avaliação comparativa entre medidas de redes complexas para a classificação de dados. p. 45, 2020.

GHEISI, A.; FORSYTH, M.; NASER, G. Water Distribution Systems Reliability: A Review of Research Literature. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 11, p. 04016047, 2016.

GHEISI, A.; NASER, G. Water distribution system reliability under simultaneous multicomponent failure scenario. **Journal - American Water Works Association**, v. 106, n.

7, p. 83–84, 2014.

GHEISI, A.; NASER, G. Multistate Reliability of Water-Distribution Systems: Comparison of Surrogate Measures. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 10, p. 04015018, 2015.

GHEISI, A. R.; NASER, G. On the significance of maximum number of components failures in reliability analysis of water distribution systems. **Urban Water Journal**, v. 10, n. 1, p. 10–25, 2013.

GIRVAN, M.; NEWMAN, M. E. J. Community structure in social and biological networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 99, n. 12, p. 7821–7826, 2002.

GIUDICIANNI, C. et al. Topological taxonomy of water distribution networks. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 2018.

GIUDICIANNI, C. et al. A Community-Structure-Based Method for Estimating the Fractal Dimension, and its Application to Water Networks for the Assessment of Vulnerability to Disasters. **Water Resources Management**, v. 35, n. 4, p. 1197–1210, 13 mar. 2021.

GIUSTOLISI, O.; SIMONE, A.; RIDOLFI, L. Network structure classification and features of water distribution systems. **Water Resources Research**, v. 53, n. 4, p. 3407–3423, 1 abr. 2017.

GOMES, H. P. et al. **EPANET 2.0 Brasil - Manual do Usuário**. João Pessoa-PB: [s.n.]. Disponível em: <<http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/menu/assuntos/epanet>>.

GONÇALVES, E.; LIMA, C. V. DE. **Guias práticos: técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água | Controle de pressões e operação de válvulas reguladoras de pressão**. Brasília: Ministério das Cidades, 2007.

GRECO, R.; DI NARDO, A.; SANTONASTASO, G. Resilience and entropy as indices of robustness of water distribution networks. **Journal of Hydroinformatics**, v. 14, n. 3, p. 761–771, 2012.

HAGBERG, A. A.; SCHULT, D. A.; SWART, P. J. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. **7th Python in Science Conference (SciPy 2008)**, n. SciPy, p. 11–15, 2008.

HANSEN, D. L. et al. Calculating and visualizing network metrics. **Analyzing Social Media**

**Networks with NodeXL: Insights from a Connected World**, p. 79–94, 2019.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 14–20, 1982.

HENRY, D.; EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ, J. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 99, p. 114–122, 2012.

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

HESARKAZAZI, S. et al. **Implication of Different Pipe-Sizing Strategies for the Resilience of Stormwater Networks**. World Environmental and Water Resources Congress 2021. **Anais...**Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 3 jun. 2021. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483466.022>>

HOLLING, C. S. Engineering Within Ecological Constraints. In: **Engineering Within Ecological Constraints**. Washington, D.C.: National Academies Press, 1996. p. 31–43.

HOLME, P. et al. Attack vulnerability of complex networks. **Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics**, v. 65, n. 5, p. 14, 7 maio 2002.

HOSSEINI, S.; BARKER, K.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. A review of definitions and measures of system resilience. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 145, p. 47–61, 2016.

HOWLAND, W. E. Expansion of the Freeman method for the solution of pipe flow problems. **JNEWWA**, v. 48, p. 408, 1934.

IBGE. **Panorama do Município de Araraquara/SP**.

IDIYATULLIN, D. et al. Fast and quiet MRI using a swept radiofrequency. **Journal of magnetic resonance (San Diego, Calif. : 1997)**, v. 181, n. 2, p. 342–9, ago. 2006.

IFRC. **Characteristics of a Safe and Resilient Community Community Based Disaster Risk Reduction Study**. Genebra: [s.n.]. Disponível em: <[www.ifrc.org](http://www.ifrc.org)>.

IZADI, A.; YAZDANDOOST, F.; RANJBAR, R. Asset-Based Assessment of Resiliency in

Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, v. 34, n. 4, p. 1407–1422, 24 mar. 2020.

JACOBS, P.; GOULTER, I. C. Optimization of redundancy in water distribution networks using graph theoretic principles. **Engineering Optimization**, v. 15, n. 1, p. 71–82, 1 out. 1989.

JAMAKOVIC, A.; UHLIG, S. **NETWORKS AND HETEROGENEOUS MEDIA ON THE RELATIONSHIPS BETWEEN TOPOLOGICAL MEASURES IN REAL-WORLD NETWORKS**Institute of Mathematical Sciences. [s.l: s.n.].

JAYARAM, N.; SRINIVASAN, K. Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing. **Water Resources Research**, v. 44, n. 1, p. 1–15, 2008.

JORGE, N. L. **Avaliação de Resiliência dos Serviços de Abastecimento de Água frente a Cenários de Seca: estudo de caso no Município de Jundiaí/SP**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos/SP, 10 set. 2022.

JUNG, D. et al. Robustness-Based Design of Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 11, p. 04014033, nov. 2014.

JUNG, D. et al. Linear Model for Estimating Water Distribution System Reliability. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 8, p. 04016022, ago. 2016.

JUNG, D.; LEE, S.; KIM, J. H. Robustness and water distribution system: State-of-the-art review. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 5, p. 1–12, 2019.

KIMUTAI, E. et al. Comparison of Statistical Models for Predicting Pipe Failures: Illustrative Example with the City of Calgary Water Main Failure. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 6, n. 4, 2015.

KLISE, K. et al. **Water Network Tool for Resilience (WNTR) | User Manual: Version 0.2.3**. Albuquerque, New Mexico: [s.n.]. Disponível em: <[www.epa.gov/homeland-security-research](http://www.epa.gov/homeland-security-research)>.

KLISE, K. A. et al. A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. **Environmental Modelling and Software**, v. 95, p. 420–431, 2017.

LAUCELLI, D.; GIUSTOLISI, O. Vulnerability Assessment of Water Distribution Networks

under Seismic Actions. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 6, p. 04014082, 2015.

LAWYER, G. Understanding the influence of all nodes in a network. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 8665, 2 mar. 2015.

LIU, W. et al. Recovery-based seismic resilience enhancement strategies of water distribution networks. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 203, n. August 2019, p. 107088, 2020.

LIU, W.; SONG, Z. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 193, n. August 2018, p. 106617, 2020.

LOZARES, C. et al. The structure of global centrality measures. **International Journal of Social Research Methodology**, v. 18, n. 2, p. 209–226, 2015.

MACRUZ, L. F. et al. **NOVOS PARADIGMAS PARA A ELABORAÇÃO DE PLANOS DIRETORES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**. Congresso ABES. **Anais...**2017.

MAIOLO, M. et al. A new vulnerability measure for water distribution network. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 8, 30 jul. 2018.

MARCONDES, R. A. DE C. **Estudo do uso das tubulações de PEAD em sistemas de distribuição de água no Brasil**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

MASZCZYK, T.; DUCH, W. Comparison of Shannon , Renyi and Tsallis. p. 643–651, 2008.

MAYS, L. W. **Water Distribution System Handbook**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2000. v. 1

MEADOWS, D. **Leverage Points Places to Intervene in a System**. [s.l: s.n.].

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

MOTIEE, H.; GHASEMNEJAD, S. Prediction of pipe failure rate in Tehran water distribution networks by applying regression models. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 19, n. 3, p. 695–702, 2019.

MUGUME, S. N. et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. **Water Research**, v. 81, p. 15–26, 2015.



MURRAY, A. T. An overview of network vulnerability modeling approaches. **GeoJournal**, v. 78, n. 2, p. 209–221, 2013.

NEWMAN, M. E. J. The structure and function of complex networks. In: Santa Fe: [s.n.].

NEWMAN, M. E. J. A measure of betweenness centrality based on random walks. **Social Networks**, v. 27, n. 1, p. 39–54, jan. 2005.

NIAC, I. A. C. N. **NIAC Water Sector Resilience Final Report and Recommendations**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.cisa.gov/publication/niac-water-sector-resilience-final-report>>.

ONU. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html>>.

OSTFELD, A. Water Distribution Systems Connectivity Analysis. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. 1, p. 58–66, jan. 2005.

OSTFELD, A. et al. Battle of the Water Calibration Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 5, p. 523–532, 2012.

OSTFELD, A.; KOGAN, D.; SHAMIR, U. **Reliability simulation of water distribution systems-single and multiquality**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/urbwat](http://www.elsevier.com/locate/urbwat)>.

PAGANO, A. et al. Water Distribution Networks Resilience Analysis: a Comparison between Graph Theory-Based Approaches and Global Resilience Analysis. **Water Resources Management**, v. 33, n. 8, p. 2925–2940, 11 jun. 2019.

PMA, P. M. DE A.; WALM, E. E T. A. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. Araraquara, SP: [s.n.]. Disponível em: <[https://daearaquara.com.br/wp-content/uploads/2020/08/PMSB\\_araraquara-compactado.pdf](https://daearaquara.com.br/wp-content/uploads/2020/08/PMSB_araraquara-compactado.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2023.

PMSS, P. DE M. DO S. DO S. **Projeto COM+ÁGUA**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/pmss/projeto-com-agua>>.

PONTI, A. et al. A Novel Graph-Based Vulnerability Metric in Urban Network Infrastructures: The Case of Water Distribution Networks. **Water**, v. 13, n. 11, p. 1502, 27 maio 2021.

PRASAD, T. D.; HONG, S.-H.; PARK, N. Reliability based design of water distribution networks using multi-objective genetic algorithms. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 7,

n. 3, p. 351–361, 2003.

PRASAD, T. D.; PARK, N.-S. Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 1, p. 73–82, 2004.

RAAD, D. N.; SINSKE, A. N.; VAN VUUREN, J. H. Comparison of four reliability surrogate measures for water distribution systems design. **Water Resources Research**, v. 46, n. 5, p. 1–11, 2010.

RENYI, A. **Probability Theory**. North-Holland, Amsterdam: [s.n.].

RIBEIRO, P.; GONÇALVES, L. Urban resilience: A conceptual framework. **Sustainable Cities and Society**, v. 50, p. 101625, out. 2019.

RODRIGUES, F. A. **Caracterização, classificação e análise de redes complexas**. São Carlos, SP: Universidade de São Paulo (USP), 2007.

ROSSMAN, L. et al. EPANET 2.2 User Manual. **U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati**, 2020.

ROSSMAN, L. A.; VAN ZYL, J. E. **The Open Sourcing of EPANET**. Water Distribution Systems Analysis 2010. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 21 dez. 2010. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41203%28425%294>>

ROWELL, W. F.; BARNES, J. W. Obtaining Layout of Water Distribution Systems. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 108, n. 1, p. 137–148, jan. 1982.

SANTONASTASO, G. F. et al. Scaling-laws of flow entropy with topological metrics of water distribution networks. **Entropy**, v. 20, n. 2, p. 1–15, 2018.

SANTOS, P. L. F. DOS. **Teoria Espectral de Grafos Aplicada ao Problema de Isomorfismo de Grafos**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

SANTOS, R. N. M. Produção científica: por que medir? O que medir? **Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, v. 1, n. 1, p. 22–38, 2003.

SHAMIR, U. Y.; HOWARD, C. D. D. Water Distribution Systems Analysis. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 94, n. 1, p. 219–234, jan. 1968.

SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 4, p. 623–656, 1948.

SHIN, S. et al. A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 2, p. 1–25, 2018.

SHUANG, Q. et al. System reliability evaluation in water distribution networks with the impact of valves experiencing cascading failures. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 6, 2017.

SHUANG, Q.; LIU, H. J.; PORSE, E. Review of the quantitative resilience methods in water distribution networks. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 6, p. 1–27, 2019.

SILVA, J. V. V. **AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA DE ADUTORAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA CONSIDERANDO EFEITOS TRANSITÓRIOS- ESTUDO DE CASO: FRANCA/SP**. Campinas: UNICAMP, 1 fev. 2018.

SIMONE, A.; DI CRISTO, C.; GIUSTOLISI, O. Analysis of the isolation valve system in water distribution networks using the segment graph. **Water Resources Management**, v. 36, n. 10, p. 3561–3574, 2022.

SINGH, V. P. **Theory and its Application in Environmental and Water Engineering**. [s.l.: s.n.].

SINGH, V. P.; OH, J. A Tsallis entropy-based redundancy measure for water distribution networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 421, p. 360–376, 2015.

SNIS. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto - Visão Geral Ano de Referência 2020. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS**, p. 1–91, 2021.

SNIS, S. N. DE I. SOBRE S. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília-DF: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnosticos>>.

SNIS, S. N. DE I. SOBRE S. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto Serviços de Água e Esgoto Visão Geral**. Brasília-DF: [s.n.].

SOLDI, D.; CANDELIERI, A.; ARCHETTI, F. Resilience and Vulnerability in Urban Water Distribution Networks through Network Theory and Hydraulic Simulation. **Procedia Engineering**, v. 119, n. 1, p. 1259–1268, 2015.

SPIESS, O. V. Graphische lösung von hydraulischen aufgaben (Graphical Method for Hydraulic Problems). **Journal fur Gasbeleuchtung und Wasserversorgung**, v. 17, p. 563–574, 1887.

STRANG, G. **35. Finding Clusters in Graphs**. Disponível em:

<[https://www.youtube.com/watch?v=cxTmmasBiC8&ab\\_channel=MITOpenCourseWare](https://www.youtube.com/watch?v=cxTmmasBiC8&ab_channel=MITOpenCourseWare)>.

SWART, C. S. **Distance Measures in Graphs and Subgraphs**. Durban: University of Natal, 1996.

TANYIMBOH, T. T. et al. Comparison of Surrogate Measures for the Reliability and Redundancy of Water Distribution Systems. **Water Resources Management**, v. 30, n. 10, p. 3535–3552, 2016.

TANYIMBOH, T. T.; TABESH, M.; BURROWS, R. Appraisal of Source Head Methods for Calculating Reliability of Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 4, p. 206–213, ago. 2001.

TODINI, E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. v. 2, p. 115–122, 2000.

TORRES, J. M. et al. Exploring Topological Effects on Water Distribution System Performance Using Graph Theory and Statistical Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 1, jan. 2017.

TSALLIS, C.; MENDES, R. S.; PLASTINO, A. R. The role of constraints within generalized nonextensive statistics. **Physica A**, n. 261, p. 534–554, 1998.

VIGIAGUA, P. N. DE V. DA Q. DA Á. PARA C. H. **Manual de Procedimentos de Entrada de Dados do Sistema de Informações de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua)**. Brasília-DF: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.saude.gov.br/images/imagens\\_migradas/upload/arquivos/2016-03/manual-de-procedimentos-de-entrada-de-dados-do-sisagua-08-01-2016-1.pdf](https://www.saude.gov.br/images/imagens_migradas/upload/arquivos/2016-03/manual-de-procedimentos-de-entrada-de-dados-do-sisagua-08-01-2016-1.pdf)>.

Wael, A. A.; NOORI, M.; ZHAO, Y. A strategic framework for resilient and sustainable urban infrastructure systems - an overview, modelling, design and assessment. **International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems**, v. 5, n. 1/2, p. 121, 2021.

WAGNER, J. M.; SHAMIR, U.; MARKS, D. H. Water Distribution Reliability: Analytical Methods. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 114, n. 3, p. 253–275, 1988.

WANG, R. et al. Pipe Burst Risk State Assessment and Classification Based on Water Hammer Analysis for Water Supply Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 6, jun. 2014.

WANG, Y. et al. Resilience-oriented design for complex MEP systems in BIM. **Advanced Engineering Informatics**, v. 55, n. February, p. 101902, jan. 2023.

WÉBER, R.; HUZSVÁR, T.; HŐS, C. Vulnerability analysis of water distribution networks to accidental pipe burst. **Water Research**, v. 184, 2020.

WÉBER, R.; HUZSVÁR, T.; HŐS, C. Isolation Valve Placement Optimization of Water Distribution Networks to Reduce Vulnerability. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, v. 67, n. 1, p. 51–58, 2023.

WOODITCH, A. et al. The Normal Distribution and Single-Sample Significance Tests. In: **A Beginner's Guide to Statistics for Criminology and Criminal Justice Using R**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 155–168.

WRIGHT, R.; PARPAS, P.; STOIANOV, I. Experimental investigation of resilience and pressure management in water distribution networks. **Procedia Engineering**, v. 119, n. 1, p. 643–652, 2015.

YANG, S. et al. Water Distribution Network Reliability: Connectivity Analysis. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 2, n. 2, p. 54–64, jun. 1996.

YANG WANG et al. **Epidemic spreading in real networks: an eigenvalue viewpoint**. 22nd International Symposium on Reliable Distributed Systems, 2003. Proceedings. **Anais...IEEE Comput. Soc**, 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1238052/>>

YAZDANI, A.; JEFFREY, P. A complex network approach to robustness and vulnerability of spatially organized water distribution networks. p. 1–18, 2010.

YAZDANI, A.; JEFFREY, P. Complex network analysis of water distribution systems. **Chaos**, v. 21, n. 1, 2011.

YAZDANI, A.; JEFFREY, P. **Robustness and vulnerability analysis of water distribution networks using graph theoretic and complex network principles**. Water Distribution Systems Analysis 2010 - Proceedings of the 12th International Conference, WDSA 2010. **Anais...2012a**.

YAZDANI, A.; JEFFREY, P. Applying Network Theory to Quantify the Redundancy and Structural Robustness of Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 2, p. 153–161, 2012b.

YAZDANI, A.; JEFFREY, P. Water distribution system vulnerability analysis using weighted and directed network models. **Water Resources Research**, v. 48, n. 6, p. 1–10, 2012c.

YAZDANI, A.; OTOO, R. A.; JEFFREY, P. Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, n. 12, p. 1574–1582, 2011.

ZARGHAMI, A.; GUNAWAN, I.; SCHULTMANN, F. The application of graph theory to public infrastructure asset management. n. November, 2019a.

ZARGHAMI, S. A.; GUNAWAN, I. A domain-specific measure of centrality for water distribution networks. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 27, n. 2, p. 341–355, 2019.

ZARGHAMI, S. A.; GUNAWAN, I. The emergence and evolution of reliability theory for water distribution networks. **Built Environment Project and Asset Management**, n. 1, 2020.

ZARGHAMI, S. A.; GUNAWAN, I.; SCHULTMANN, F. Integrating entropy theory and cospanning tree technique for redundancy analysis of water distribution networks. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 176, p. 102–112, 2018a.

ZARGHAMI, S. A.; GUNAWAN, I.; SCHULTMANN, F. Vulnerability analysis of Water Distribution Networks using betweenness centrality and information entropy. **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**, v. 2018, n. JUL, p. 1811–1820, 2018b.

ZARGHAMI, S. A.; GUNAWAN, I.; SCHULTMANN, F. Entropy of centrality values for topological vulnerability analysis of water distribution networks. **Built Environment Project and Asset Management**, v. 9, n. 3, p. 412–425, 5 jul. 2019b.

ZHAO, X.; CHEN, Z.; GONG, H. Effects comparison of different resilience enhancing strategies for municipal water distribution network: A multidimensional approach. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015.

ZHOU, K. et al. World Environmental and Water Resources Congress. v. 1, n. i, p. 489, 2018.

ZHUANG, B.; LANSEY, K.; KANG, D. Resilience/availability analysis of municipal water distribution system incorporating adaptive pump operation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 5, p. 527–537, 2013.



APÊNDICE A – PRESSÕES E VAZÕES MÁXIMAS E MÍNIMAS PARA CADA CENÁRIO.

Cenário Original				
	Condições hidráulicas diárias	Valores aferidos	Hora do dia	Vértice / Trecho
Pressões (m)	Max	73,217	2 AM	n536
	Min	3,706	2 AM	n3eCR
	Média	34,20 ( $\sigma$ 13,99)	-	-
Vazões (m <sup>3</sup> /s)	Max	70,566	10 AM	3CR
	Min	1,429 E -27	2 PM	p605
	Média	1,663 ( $\sigma$ 4,97)	-	-

Fonte: Autor (2022)

Cenário I				
	Condições hidráulicas diárias	Valores aferidos	Hora do dia	Vértice / Trecho
Pressões (m)	Max	73,20	2 AM	n536
	Min	7,783	9 PM	n3eCR
	Média	36,46 ( $\sigma$ 12,95)	-	-
Vazões (m <sup>3</sup> /s)	Max	70,63	10 AM	3CR
	Min	2,859E-27	0 AM	
	Média	1,705 ( $\sigma$ 4,905)	-	-

Fonte: Autor (2022)

Cenário II										
	Condições hidráulicas diárias	Valores aferidos			Hora do dia			Vértice / Trecho		
		p22e	p1p	p24q	p22e	p1p	p24q	p22e	p1p	p24q
Pressões (m)	Max	65,62	72,67	72,52	2A M	2A M	2AM	n536	n53 6	n536
	Min	2,783	2,783	2,568	9PM	9P M	8PM	n3eCR	n3e CR	n27e
	Média	29,87 ( $\sigma$ 12,02)	33,20 ( $\sigma$ 14,02)	32,51 ( $\sigma$ 14,28)	-	-	-	-	-	-
Vazões (m <sup>3</sup> /s)	Max	70,57	70,57	70,57	10 AM	10 A M	10A M	3CR	3C R	p5o
	Min	2,29E- 26	1,43E -27	1,43E -27	8A M	6A M	8AM	p467	p60 5	p605
	Média	1,83 ( $\sigma$ 5,28)	1,78 ( $\sigma$ 5,60)	1,97 ( $\sigma$ 6,60)	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2022)



<b>Subcenário III de 2,5 % de falhas</b>							
	<b>Condições hidráulicas diárias</b>	<b>Valores aferidos</b>			<b>Vértice / Trecho</b>		
		10AM	2PM	6PM	10AM	2PM	6PM
<b>Pressões (m)</b>	Max	71,30	71,81	71,80	n536	n536	n536
	Min	3,36	3,47	3,33	n27e	n27e	n27e
	Média	32,72 ( $\sigma$ 14,52)	33,64 ( $\sigma$ 14,16)	33,43 ( $\sigma$ 14,22)	-	-	-
<b>Vazões (m<sup>3</sup>/s)</b>	Max	70,56	64,93	65,60	3CR	3CR	3CR
	Min	6,71E-12	1,16E-11	5,31E-12	p208	p605	p292
	Média	1,95 ( $\sigma$ 5,80)	1,79 ( $\sigma$ 5,34)	1,81 ( $\sigma$ 5,40)	-	-	-

Fonte: Autor (2022)

<b>Subcenário III de 5 % de falhas</b>							
	<b>Condições hidráulicas diárias</b>	<b>Valores aferidos</b>			<b>Vértice / Trecho</b>		
		10AM	2PM	6PM	10AM	2PM	6PM
<b>Pressões*</b> (m)	Max	70,96	71,56	71,59	n536	n536	n536
	Min	3,37	3,48	3,33	n27e	n27e	n27e
	Média	32,61 ( $\sigma$ 14,47)	33,58 ( $\sigma$ 14,12)	33,45 ( $\sigma$ 14,14)	-	-	-
<b>Vazões*</b> (m <sup>3</sup> /s)	Max	70,57	64,93	65,60	3CR	3CR	3CR
	Min	5,97E-11	1,16E-11	9,14E-26	p652	p605	p8t
	Média	2,07 ( $\sigma$ 5,94)	1,90 ( $\sigma$ 5,46)	1,84 ( $\sigma$ 5,43)	-	-	-

\*No presente caso foram averiguadas pressões negativas para alguns nós ao longo dos instantes de falha e nulos para determinados trechos. Fonte: Autor (2022)

## APÊNDICE B – RELATÓRIO EPANET 2.0 DE ADVERTÊNCIAS PARA O SUBCENÁRIO

```

*****
*                               E P A N E T                               *
* Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento *
* Simulação de Redes de Distribuição                               *
* Versão 2.0 - Português (Brasil) - Build(2.00.12)                 *
*****

```

```

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 9:00:00 horas.
ADVERTÊNCIA: Nó n433 desligado às 9:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n432 desligado às 9:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n431 desligado às 9:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n263 desligado às 9:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n262 desligado às 9:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n261 desligado às 9:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p295
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p248

```

```

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 10:00:00 horas.
ADVERTÊNCIA: Nó n433 desligado às 10:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n432 desligado às 10:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n431 desligado às 10:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n263 desligado às 10:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n262 desligado às 10:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n261 desligado às 10:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p295
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p248

```

```

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 11:00:00 horas.
ADVERTÊNCIA: Nó n433 desligado às 11:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n432 desligado às 11:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n431 desligado às 11:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n263 desligado às 11:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n262 desligado às 11:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n261 desligado às 11:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p295
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p248

```

```

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 12:00:00 horas.
ADVERTÊNCIA: Nó n433 desligado às 12:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n432 desligado às 12:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n431 desligado às 12:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n263 desligado às 12:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n262 desligado às 12:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n261 desligado às 12:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p295
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p248

```

```

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 13:00:00 horas.
ADVERTÊNCIA: Nó n433 desligado às 13:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n432 desligado às 13:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n431 desligado às 13:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n263 desligado às 13:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n262 desligado às 13:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n261 desligado às 13:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p295
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p248

```

```

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 14:00:00 horas.
ADVERTÊNCIA: Nó n433 desligado às 14:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n432 desligado às 14:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n431 desligado às 14:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n263 desligado às 14:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n262 desligado às 14:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n261 desligado às 14:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p295
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p248

```

```

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 15:00:00 horas.
ADVERTÊNCIA: Nó n263 desligado às 15:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n262 desligado às 15:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Nó n261 desligado às 15:00:00 horas
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p295
ADVERTÊNCIA: Sistema desligado devido o Trecho p248

```

## APÊNDICE C – CONTROLES SIMPLES PARA FALHAS DO SUBCENÁRIO III – 2,5%

LINK p287 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p663 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p90 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p5i CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p545 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p490 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p655 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p150 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p254 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p313 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p351 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p620 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p515 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p407 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p529 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p538 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p173 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p579 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p417 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p664 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p474 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p177 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p248 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p98 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p181 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p280 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p287 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p663 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p90 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p5i OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p545 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p490 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p655 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p150 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p254 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p313 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p351 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p620 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p515 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p407 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p529 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p538 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p173 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p579 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p417 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p664 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p474 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p177 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p248 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p98 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p181 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM  
LINK p280 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM

## APÊNDICE D – CONTROLES SIMPLES PARA FALHAS DO SUBCENÁRIO III – 5%

LINK p148 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p351 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p98 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p74h CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p195 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p138 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p352 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p282 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p257 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p344 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p614 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p414 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p183 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p190 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p387 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p719 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p313 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p528 CLOSED AT CLOCKTIME 8 AM  
LINK p223 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p412 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p567 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p248 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p333 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p371 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p127 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p162 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p597 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p111 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p259 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p545 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p312 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK 13 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK 11 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p325 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p295 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p495 CLOSED AT CLOCKTIME 9 AM  
LINK p731 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p137 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p569 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p180 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK 26 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p667 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p280 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p9t CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p725 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p62 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p72 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p186 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p438 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p235 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p538 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p644 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p572 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM  
LINK p148 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p351 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p98 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p74h OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p195 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p138 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM

LINK p352 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p282 OPEN AT CLOCKTIME 2 PM  
LINK p257 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p344 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p614 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p414 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p183 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p190 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p387 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p719 OPEN AT CLOCKTIME 3 PM  
LINK p313 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p528 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p223 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p412 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p567 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p248 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p333 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p371 OPEN AT CLOCKTIME 4 PM  
LINK p127 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p162 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p597 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p111 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p259 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p545 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK p312 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK 13 OPEN AT CLOCKTIME 5 PM  
LINK 11 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p325 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p295 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p495 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p731 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p137 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p569 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK p180 OPEN AT CLOCKTIME 6 PM  
LINK 26 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p667 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p280 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p9t OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p725 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p62 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p72 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p186 OPEN AT CLOCKTIME 7 PM  
LINK p438 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM  
LINK p235 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM  
LINK p538 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM  
LINK p644 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM  
LINK p572 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM

APÊNDICE E – RELATÓRIO DE CONDIÇÕES ELEMENTARES DO MODELO  
EPANET ORIGINAL DO SETOR.

<b>Options</b>	Generated by WNTR from EPANET Water Network Model.
<b>Time</b>	duration=86400.0, hydraulic_timestep=3600, quality_timestep=240, rule_timestep=360, pattern_timestep=3600, pattern_start=0.0, report_timestep=3600, report_start=0.0, start_clocktime=0.0, statistic='NONE', pattern_interpolation=False
<b>Hydraulic</b>	headloss='H-W', hydraulics=None, hydraulics_filename=None, viscosity=1.0, specific_gravity=1.0, pattern='2', demand_multiplier=1.0, demand_model='DDA', minimum_pressure=0.0, required_pressure=0.07, pressure_exponent=0.5, emitter_exponent=1.18, trials=40, accuracy=0.001, unbalanced='CONTINUE', unbalanced_value=10, checkfreq=10, maxcheck=10, damplimit=0.0, headerror=0.0, flowchange=0.0, inpfile_units='LPS', inpfile_pressure_units=None
<b>Report</b>	pagesize=0, report_filename=None, status='NO', summary='NO', energy='NO', nodes=False, links=False, report_params={'elevation': False, 'demand': True, 'head': True, 'pressure': True, 'quality': True, 'length': False, 'diameter': False, 'flow': True, 'velocity': True, 'headloss': True, 'position': False, 'setting': False, 'reaction': False, 'f- factor': False}, param_opts={'elevation': {}, 'demand': {}, 'head': {}, 'pressure': {}, 'quality': {}, 'length': {}, 'diameter': {}, 'flow': {}, 'velocity': {}, 'headloss': {}, 'position': {}, 'setting': {}, 'reaction': {}, 'f-factor': {}}
<b>Quality</b>	parameter='NONE', trace_node=None, chemical_name='CHEMICAL', diffusivity=1.0, tolerance=0.01, inpfile_units='mg/L'

<b>Reaction</b>	bulk_order=1.0, wall_order=1.0, tank_order=1.0, bulk_coeff=0.0, wall_coeff=0.0, limiting_potential=0.0, roughness_correl=0.0
<b>Energy</b>	global_price=0.0, global_pattern=None, global_efficiency=75.0, demand_charge=0.0
<b>Graphics</b>	dimensions=['791901.48', '7584886.89', '795651.39', '7587557.99'], units='NONE', offset=['0.00', '0.00'], image_filename=None, map_filename=None
<b>User</b>	'NONE'

## ANEXO A – TABELA DE REDES E MÉTRICAS TOPOLÓGICAS

Name	$q$	$\bar{K}$	$D$	$l$	$\Delta\lambda^A$	$\lambda_2^L$	$1/\lambda_1^A$	$c_{opt}$
Two Loop	0.5333	2.67	4	1.90	1.2213	0.68862	0.404	2
Two Reservoirs	0.3778	3.40	6	2.59	0.8799	0.37909	0.303	2
New York tunnel	0.2456	4.42	9	4.21	0.5560	0.11799	0.400	3
Goyang	0.1299	2.73	9	3.75	0.2595	0.09969	0.331	3
Anytown	0.1861	3.91	7	2.94	0.4581	0.28044	0.218	2
Blacksburg	0.0805	2.33	9	4.37	0.3077	0.08998	0.372	2
Hanoi	0.0731	2.19	13	5.31	0.2739	0.06116	0.412	4
Bakryan	0.0975	3.31	12	4.30	0.4793	0.07860	0.299	3
Fossolo	0.0921	3.22	8	3.67	0.3516	0.21888	0.307	2
Richmond Skelton	0.0537	2.15	24	9.24	0.0266	0.01091	0.411	3
Pescara	0.0435	2.91	20	8.69	0.3024	0.00891	0.306	4
BWSN2008-1	0.0213	2.67	25	10.15	0.1004	0.00750	0.330	4
Skiathos	0.0124	2.16	27	11.52	0.0461	0.00835	0.374	3
Parete	0.0171	3.10	20	8.80	0.1714	0.02117	0.303	4
Villaricca	0.0130	2.54	32	11.29	0.1194	0.00665	0.334	4
Monteruscello	0.0110	2.25	47	20.24	0.0481	0.00152	0.352	5
Modena	0.0089	2.37	38	14.04	0.1385	0.00908	0.334	6
Celaya	0.0086	2.86	32	11.81	0.1915	0.01336	0.281	6
Castellamare	0.0066	2.41	37	13.62	0.1640	0.00627	0.311	6
D-Town	0.0056	2.22	66	26.32	0.0703	0.00065	0.350	5
Balerna Irrigation	0.0046	2.05	60	23.89	0.0845	0.00069	0.370	6
Oreto	0.0074	3.43	27	11.98	0.2016	0.00492	0.252	4
Richmond	0.0025	2.19	135	51.44	0.0727	0.00014	0.345	8
Giugliano	0.0022	2.17	51	21.22	0.1354	0.00243	0.327	9
Matamoros	0.0020	2.57	80	27.76	0.1439	0.00100	0.291	8
Wolf Cordera Ranch	0.0013	2.23	69	25.94	0.0612	0.00053	0.326	8
San Luis Rio Colorado	0.0015	2.84	76	28.86	0.0063	0.00089	0.268	7
Exeter	0.0017	3.21	54	20.61	0.6121	0.01021	0.257	10
Exnet	0.0014	2.61	59	21.31	0.1190	0.00102	0.257	10
Denia	0.0003	2.09	186	70.48	0.0797	0.00004	0.328	17
E-Town	0.0002	2.51	289	71.13	0.0570	0.00003	0.281	13
Alcala	0.0002	2.17	163	64.88	0.0957	0.00009	0.295	13
BWSN2008-2	0.0002	2.37	297	93.30	0.0147	0.00002	0.308	14
Chihuahua	0.0001	2.31	368	186.05	0.0175	0.00001	0.282	18
SG1	0.3333	2.67	4	2.00	1.4142	1.00000	0.354	-
SG2	0.0364	3.60	18	6.67	0.2365	0.09790	0.261	-
SG3	0.0037	3.88	62	21.33	0.0271	0.00963	0.251	-
SG4	0.0004	3.96	198	66.67	0.0029	0.00099	0.250	-
SG5	0.0001	3.98	398	124.67	0.0008	0.00028	0.250	-
RG1	0.3333	3.00	3	1.80	1.3820	1.38200	0.333	-
RG2	0.0303	3.00	8	4.73	0.2614	0.26142	0.333	-
RG3	0.0030	3.00	13	8.04	0.1805	0.18055	0.333	-
RG4	0.0003	3.00	17	11.37	0.1737	0.17368	0.333	-
RG5	0.0001	3.00	19	13.01	0.1717	0.17170	0.333	-

Fonte: (GIUDICIANNI et al., 2018)





***EESC • USP***