



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE**  
*PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*

**LAIANY RODRIGUES MARINHO**

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE INVESTIMENTOS EM  
RESILIÊNCIA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA  
SUJEITOS A INTERRUPÇÕES**

Caruaru

2019

LAIANY RODRIGUES MARINHO

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE INVESTIMENTOS EM  
RESILIÊNCIA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA  
SUJEITOS A INTERRUPÇÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada à UFPE para a obtenção de grau de Mestre como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste.

**Área de Concentração:** Otimização de processos.

**Orientador:** Profº. Dr. Márcio José das Chagas Moura.

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

M338m Marinho, Laiany Rodrigues.  
Modelo de otimização de investimentos em resiliência de sistemas de distribuição de água sujeitos a interrupções. / Laiany Rodrigues Marinho. – 2019.  
99 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Márcio José das Chagas Moura.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Mestrado em Engenharia de Produção, 2019.  
Inclui Referências.

1. Água - Distribuição. 2. Processo estocástico. 3. Otimização estrutural (Brasil, Nordeste). 4. Investimentos - Análise. 5. Administração de conflitos (Brasil, Nordeste). 6. Solução de problemas. I. Moura, Márcio José das Chagas (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-028)

LAIANY RODRIGUES MARINHO

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE INVESTIMENTOS EM  
RESILIÊNCIA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA  
SUJEITOS A INTERRUPÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 18/02/2019.

**BANCA EXAMINANDORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. MÁRCIO JOSÉ DAS CHAGAS MOURA (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARCELE ELISA FONTANA (Examinadora Interna)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. ISIS DIDIER LINS (Examinadora Externa)

Universidade Federal de Pernambuco

A Deus, que me faz persistir, e nunca desistir,

Dedico

## ***AGRADECIMENTOS***

Sou grata a Deus por tudo em minha vida, pelos momentos alegres que me fazem comemorar, e pelas dificuldades que me fazem aprender. E pelo seu infinito amor, presente na simplicidade da vida.

Agradeço à minha família, pelo amor, incentivo e suporte, sempre presentes. À minha mãe, que com seu amor e zelo, me mostra os caminhos certos a seguir. Ao meu pai, que com seu amor e coragem, me ensina a ver a leveza da vida. À minha irmã, Elâiny, que com seu amor e força, me inspira a ter determinação, e também às suas inúmeras contribuições.

Agradeço à minha avó, Tercília (*in memoriam*), que mesmo ausente, ainda assim, permanece em mim, e me inspira o melhor.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Márcio Moura, que amistosamente me conduziu na construção desta dissertação, e por seus comentários perspicazes que foram indispensáveis para esta pesquisa.

À Beatriz Sales, agradeço enormemente suas valiosas discussões para esta pesquisa. E agradeço também à Thaís Lucas e Rafael Azevedo, pelo apoio a este estudo.

Agradeço a Leonardo, pela generosa contribuição para o estudo de caso. E também agradeço à Prof.<sup>a</sup> Marcele Elisa e a Prof.<sup>a</sup> Isis Lins, por suas sugestões úteis sobre uma versão anterior desta pesquisa.

Agradeço aos meus amigos e colegas da universidade, pela amizade, apoio e vivência diária, na qual dividimos momentos indescritíveis.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da UFPE/CAA, pela oportunidade de estudo e estrutura disponibilizada. Agradeço ao coordenador do programa, Prof. Rodrigo Sampaio, por me guiar no estágio de docência, e também, por juntamente com o secretário do programa, George, estarem prontamente disponíveis aos alunos.

Agradeço a todos os professores do PPGEP/CAA, por compartilharem, generosamente, seu conhecimento com os alunos e, assim, nos motivarem no caminho da pesquisa e docência.

Agradeço também, aos demais funcionários da UFPE/CAA, por prestarem serviços tão essenciais ao funcionamento da mesma, e assim, fazerem parte da construção do meu aprendizado.

E, por fim, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Brasil - Código de Financiamento 001.

## ***RESUMO***

O sistema urbano moderno é constituído pelos sistemas de infraestrutura essenciais à sobrevivência em todos os diferentes aspectos, como energia, água, comunicações, etc. Quando um desses sofre algum evento disruptivo, todo o sistema e suas interconexões existentes sofrem os agravos resultantes. Entre esses, as redes de distribuição de água podem ser consideradas umas das mais importantes e vitais, especialmente após eventos extremos que podem comprometer sua capacidade de fornecer água. Além disso, as interdependências entre os diferentes sistemas de infraestrutura tornam-se cada vez mais vulneráveis aos eventos disruptivos e em cascata. Eventos passados causaram danos significativos ao sistema hídrico, tornando-o disfuncional e afetando assim, a sociedade. Com isso, os tomadores de decisão enfrentam profundas incertezas sobre uma miríade de fatores externos, incluindo falhas aleatórias, atos humanos e eventos catastróficos. Além disso, a capacidade de uma rede para se recuperar de interrupções aparentemente inevitáveis é uma consideração vital, e a esta recuperação chama-se resiliência. Embora a resiliência seja um conceito útil, sua diversidade no uso torna complexa a sua interpretação e medição. A literatura emergente sobre a ruptura e resiliência tem sido confusa em relação à conceituação e nível de análise. Embora existam muitas pesquisas realizadas para o projeto dos sistemas hídricos, há poucos estudos sobre os investimentos necessários para aumentar a resiliência dos sistemas de distribuição de água propensos a interrupções. Nesta dissertação foi proposto um modelo de otimização de investimentos, que enfatiza o aumento das capacidades de resiliência, a saber, absorção (capacidade adicional para reservatórios e tubulações), adaptação (tubulações adicionais, transporte alternativo e compra de água) e recuperação (aumento das taxas de recuperação dos reservatórios e tubulações). Os investimentos podem ser realizados antes ou depois da ocorrência da interrupção, através de um modelo estocástico de programação linear inteira mista. Além da fundamentação teórica, foi realizado um estudo de caso, em uma companhia de distribuição de água no Brasil, como forma de compreender a natureza do problema e formular o modelo proposto. Para testar a aplicabilidade do modelo, um exemplo numérico da literatura foi utilizado e os resultados demonstraram a importância de se investir de maneira adequada nas capacidades necessárias, devido às variações das probabilidades de ocorrência dos eventos disruptivos. Como esperado, ao aumentar a probabilidade de interrupção do sistema, os investimentos foram mais destinados a serem realizados antes da ocorrência do evento. Caso contrário, se a probabilidade de interrupção for baixa, a decisão foi para realizar mais investimentos depois da ocorrência da interrupção. Além do mais, o modelo proposto contribui à literatura por meio de considerações sobre diferentes gravidades para as interrupções, do tempo para atendimento do nível de serviço e de recuperação do sistema, e diferenciação de clientes entre prioritários (como exemplo, instalações industriais, hospitais, etc.) ou não. Todas essas considerações são importantes e necessárias para que os gestores de recursos hídricos tomem uma decisão adequada sobre a alocação dos investimentos a serem realizados tendo em vista as possíveis interrupções no sistema.

Palavras-chave: Resiliência. Capacidades resilientes. Sistemas de distribuição de água. Eventos disruptivos. Programação estocástica.

## ***ABSTRACT***

The modern urban system consists of the infrastructure systems essential to survival in all different aspects, such as energy, water, communications, etc. When one of these suffers some disruptive event, the entire system and its existing interconnections suffer the resulting grievances. Among these, water distribution networks can be considered one of the most important and vital, especially after extreme events that may compromise their ability to provide water. In addition, the interdependencies between different infrastructure systems become increasingly vulnerable to disruptive and cascading events. Past events have caused significant damage to the water system, making it dysfunctional and thus affecting society. As a result, decision makers face deep uncertainties about a myriad of external factors, including random failures, human acts, and catastrophic events. In addition, a network's ability to recover from seemingly unavoidable disruptions is a vital consideration, and this recovery is called resilience. While resilience is a useful concept, its diversity in use makes its interpretation and measurement complex. The emerging literature on rupture and resilience has been confusing in relation to conceptualization and level of analysis. Although there is much research done for water systems design, there are few studies on the investments needed to increase the resilience of water supply systems that are prone to disruption. In this dissertation, an investment optimization model was proposed, emphasizing the increase of resilience capacities, namely, absorption (additional capacity for reservoirs and pipelines), adaptation (additional pipelines, alternative transport and water purchase) and recovery (increase of reservoir and pipeline recovery rates). The investments can be made before or after the occurrence of the interruption, through a stochastic model of mixed integer linear programming. In addition to the theoretical basis, a case study was carried out at a water distribution company in Brazil to understand the nature of the problem and formulate the proposed model. To test the applicability of the model, a numerical example of the literature was used and the results demonstrated the importance of investing adequately in the required capacities due to variations in the probability of occurrence of disruptive events. As expected, by increasing the likelihood of system disruption, the investments were more likely to be realized before the event occurred. Otherwise, if the probability of interruption is low, the decision was to make more investments after the disruption occurred. In addition, the proposed model contributes to the literature by considering different severities for interruptions, time to service level and system recovery, and differentiation of priority customers (e.g. industrial facilities, hospitals, etc.) or not. All these considerations are important and necessary for water managers to make an appropriate decision on the allocation of investments to be made in view of possible disruptions to the system.

**Keywords:** Resilience. Resilient capabilities. Water distribution systems. Disruptive events. Stochastic programming.



## ***LISTA DE ILUSTRAÇÕES***

Quadro 1 -	Parâmetros do modelo de Turnquist e Vugrin (2013) .....	22
Quadro 2 -	Variáveis do modelo de Turnquist e Vugrin (2013) .....	22
Figura 1 -	Propriedades da resiliência .....	40
Quadro 3 -	Relação entre as capacidades de resiliência .....	42
Figura 2 -	Capacidades resilientes .....	43
Figura 3 -	Grafo da rede de distribuição de água .....	47
Figura 4 -	Rede de água Gessler 1985 .....	63
Figura 5 -	Evento aleatório (cenário 1) .....	64
Figura 6 -	Evento ato intencional (cenário 2) .....	64
Figura 7 -	Evento desastre natural (cenário 3) .....	65
Quadro 4 -	Descrição dos cenários .....	65
Figura 8 -	Custo total esperado do sistema .....	69
Figura 9 -	Capacidade adicional dos reservatórios .....	71
Figura 10 -	Recursos de recuperação .....	72
Figura 11 -	Recursos depois do evento .....	73
Figura 12 -	Linhas adicionais .....	74
Figura 13 -	Custos totais esperados por gravidades .....	75
Figura 14 -	Capacidade adicional por gravidades .....	77
Figura 15 -	Recursos de recuperação para reservatórios .....	78
Figura 16 -	Recursos de recuperação para linhas .....	79
Figura 17 -	Recursos depois do evento por gravidades .....	80
Figura 18 -	Linhas adicionais do experimento 2 .....	81
Figura 19 -	Linhas adicionais do experimento 3 .....	81
Figura 20 -	Linhas adicionais do experimento 4 .....	81
Figura 21 -	Tempo de recuperação .....	82

## ***LISTA DE TABELAS***

Tabela 1 - Probabilidades das simulações.....	66
Tabela 2 - Distância entre os nós (metros).....	67
Tabela 3 - Demais parâmetros .....	67
Tabela 4 - Demanda e nível de atendimento.....	68
Tabela 5 - Taxas de recuperação.....	68

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.2.1	<i>Geral.....</i>	<i>16</i>
1.2.2	<i>Específicos.....</i>	<i>17</i>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Resiliência.....</b>	<b>19</b>
2.1.1	<i>Resiliência e outros conceitos .....</i>	<i>25</i>
<b>2.2</b>	<b>Sistemas de distribuição de água .....</b>	<b>28</b>
2.2.1	<i>Projetos de sistemas de distribuição de água .....</i>	<i>29</i>
2.2.2	<i>Resiliência em sistemas de distribuição de água.....</i>	<i>32</i>
2.2.2.1	<i>Projetos resilientes dos sistemas de distribuição de água .....</i>	<i>34</i>
2.2.3	<i>Delimitação dos eventos.....</i>	<i>36</i>
2.2.4	<i>Métodos de otimização.....</i>	<i>38</i>
<b>2.3</b>	<b>Capacidades resilientes.....</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>FORMULAÇÃO DO MODELO.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Estudo de caso.....</b>	<b>44</b>
3.1.1	<i>Análise do questionário.....</i>	<i>44</i>
<b>3.2</b>	<b>Delimitando o sistema.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Declaração do problema.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4</b>	<b>Suposições do modelo.....</b>	<b>48</b>
<b>3.5</b>	<b>Construção do modelo.....</b>	<b>49</b>
3.5.1	<i>Função-objetivo.....</i>	<i>52</i>
3.5.2	<i>Restrições do modelo.....</i>	<i>55</i>
<b>4</b>	<b>APLICABILIDADE DO MODELO.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Exemplo numérico.....</b>	<b>63</b>
4.1.1	<i>Modelagem dos cenários.....</i>	<i>63</i>
4.1.2	<i>Dados utilizados.....</i>	<i>66</i>
<b>4.2</b>	<b>Resultados e discussões.....</b>	<b>69</b>
4.2.1	<i>Análise para diferentes gravidades.....</i>	<i>74</i>

<b>5</b>	<b><i>CONCLUSÕES</i></b> .....	<b>83</b>
<b>5.1</b>	<b>Limitações e pesquisas futuras</b> .....	<b>87</b>
	<b><i>REFERÊNCIAS</i></b> .....	<b>88</b>
	<b><i>APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO</i></b> .....	<b>98</b>

## ***1 INTRODUÇÃO***

Com o passar dos anos, os sistemas organizaram-se de forma interconectada e as sociedades passaram a depender dos sistemas de infraestrutura crítica, que assumiram a forma de redes. Essas redes fornecem serviços, permitindo fluxos (de materiais, informações, energia elétrica, combustíveis, etc.), dada sua capacidade ou estado de operacionalidade (TURNQUIST; VUGRIN, 2013). A ocorrência de falhas desses sistemas pode resultar na interrupção de outras infraestruturas, causando perdas econômicas e sociais, juntamente com agitação pública e os desafios de governança (OUYANG; DUEÑAS-OSORIO, 2011).

No que diz respeito às interrupções, Cimellaro *et al.* (2016) esclareceram que estas alteram o estado de operabilidade de partes do sistema e as ações de recuperação restauram a funcionalidade das partes danificadas, permitindo que o seu desempenho retorne aos níveis normais o mais rápido possível. Ponomarov e Holcomb (2009) destacaram que as interrupções em sistemas podem surgir de muitas fontes, incluindo externas, como um desastre natural e/ou internas, como uma falha na integração de todas as funções, ocasionando efeito adverso na receita e nos custos. Essas interrupções podem assumir muitas formas, como destacado em muitos eventos recentes altamente divulgados, incluindo o tsunami do Oceano Índico em 2004, os terremotos do Haiti e do Chile em 2010 e a erupção do vulcão islandês Eyjafjallajökull em 2010 (BHAMRA; DANI; BURNARD, 2011). Logo após o terremoto de Tohoku, que atingiu o Japão em março de 2011 (DIDIER *et al.*, 2018), diversos fabricantes mobilizaram-se: do centro técnico da General Motors Company, em Detroit, à sede da empresa de entrega de encomendas FedEx Corporation, em Memphis, funcionários avaliaram o impacto nas equipes, fábricas e produtos (SONI; JAIN, 2011).

Dessa forma, para evitar ou minimizar os impactos após a ocorrência de um evento desta natureza, as empresas estão buscando ferramentas que apoiem as decisões relacionadas à sua estratégia de resiliência (CUNHA *et al.*, 2016). Essencialmente, a resiliência é uma medida de como o sistema executa quando está sujeito às ameaças inesperadas que excedem as condições de projeto e o sistema não consegue atender ao nível de serviço exigido (BUTLER *et al.*, 2016). Suribabu (2017) explicou que sistemas resilientes são capazes de fornecer uma resposta eficiente e, muitas vezes, recuperar seu estado original ou até melhor do que quando ocorrido o evento disruptivo. No entanto, estudos sobre sistemas resilientes sujeitos a interrupções receberam atenção recentemente (GOVINDAN; FATTAHI; KEYVANSHOKOOH, 2017), caracterizando uma nova área de gestão a ser explorada (MENSAH; MERKURYEV, 2014) e, portanto, os métodos para seu planejamento estão em desenvolvimento (HOSSEINI; BARKER;

RAMIREZ-MARQUEZ, 2016). Dado isto, é necessária a avaliação da resiliência alinhada com o planejamento de projeto do sistema em análise, de forma a atenuar consequências indesejáveis.

Em seu boletim de infraestrutura de 2017, a American Society of Civil Engineers (ASCE) alertou sobre a necessidade de se investir em infraestruturas como forma de melhorar o desempenho e se manter globalmente competitivo, além de criar oportunidades econômicas, melhorar a qualidade de vida e, garantir a saúde pública e segurança da sociedade. Devido aos recentes desastres significativos, o estudo da resiliência de infraestruturas críticas (incluindo sistemas de infraestrutura de água) atraiu uma atenção crescente como parte de uma estratégia mais ampla de segurança interna (ALJADHAI; ABRAHAM, 2018). Chung, Lansey e Bayraksan (2009) destacaram o sistema de infraestrutura hídrico como um exercício desafiador, devido a sua complexidade e incertezas correlacionadas. Isto é atribuído ao fato de que os sistemas de distribuição de água estão se expandindo junto com a evolução urbana (DIAO; ZHOU; RAUCH, 2013; GIUSTOLISI et al, 2016). As expectativas dos clientes quanto ao fornecimento de água provavelmente aumentarão com o tempo, levando à necessidade de se melhorar o sistema de distribuição de água para reduzir as interrupções. Por exemplo: após enchentes no Reino Unido, aumentaram-se as preocupações sobre a garantia de fornecimento de água (VAIRAVAMOORTHY et al., 2015); e depois dos atentados terroristas de 11 de setembro de 2001 nos Estados Unidos, houve esforços gradativos para aumentar a segurança dos sistemas de distribuição de água (CUNHA; SOUSA, 2010; OSTFELD et al., 2008; PREIS; OSTFELD, 2008).

Dado o estado atual da interdependência global da água, ela se tornará ainda mais crítica e difícil de se gerenciar sob cenários futuros altamente variáveis que envolvam numerosos estressores globais interconectados (ZIMMERMAN; MIHELICIC; SMITH, 2008). Devido a crescente preocupação em relação à incerteza que aumenta ao passar do tempo, a necessidade de planejamento, projeto e gerenciamento a longo prazo dos sistemas de distribuição de água tem se tornado mais clara (BASUPI; KAPELAN, 2015). Como exemplo: depois da ocorrência do furacão Katrina, que atingiu parte da região litorânea dos Estados Unidos em agosto de 2005, foram relatados diversos impactos no sistema hídrico (CHISOLM; MATTHEWS, 2012); e em 2012, o furacão Sandy atingiu a costa atlântica dos Estados Unidos, inundando grandes áreas metropolitanas em Nova York e Nova Jersey, deixando grandes populações sem água potável ou instalações de saneamento (LINKOV et al., 2014).

Nesta conjuntura, no entanto, as decisões de investimento ainda são um dos principais desafios para os sistemas de infraestrutura de água que estão atuando em um ambiente de

mudanças inevitáveis (VAIRAVAMOORTHY et al., 2015). Dessa forma, para Ghelichi, Tajik e Pishvae (2018), os altos custos de fornecimento e distribuição de água motivaram os profissionais de tomada de decisão sobre o projeto de redes de água para considerarem as preocupações financeiras enquanto atendem a demanda. Para essa tomada de decisão é necessário um método de otimização que solucione o modelo de projeto dessas redes. Como o sistema de distribuição de água é complexo e variável, a programação linear inteira mista pode ser aplicada ao modelo com a finalidade de ser encontrar uma solução ótima para função objetivo de acordo com as restrições impostas pelo modelo.

### 1.1 Justificativa

Diante das inúmeras interconexões entre os sistemas no mundo globalizado, pesquisas recentes (ALJADHAI; ABRAHAM, 2018; DIAO et al., 2016b; GHELICHI; TAJIK; PISHVAEE, 2018; ROACH; KAPELAN; LEDBETTER, 2018) mostraram que sistemas com maior resiliência podem lidar com uma ampla gama de incertezas futuras, pois como explicaram Cimellaro *et al.* (2016), a resiliência é uma quantidade dinâmica que deve ser constantemente gerenciada e é caracterizada por incertezas, tornando-se importante o uso de cenários. Os meios convencionais para gerenciar a incerteza são o gerenciamento de riscos, o que é especialmente desafiador quando as ameaças são imprevisíveis (SONI; JAIN, 2011). Como forma de superar essa barreira, a resiliência emergiu para avaliar sistemas sujeitos a esses tipos de ameaças.

Neste âmbito, as abordagens reativas precisam ser substituídas ou complementadas por proativas que incluam a incerteza dos eventos no projeto da rede. Por isso, o projeto da rede com alguma consideração para superar esses potenciais problemas, em termos de medidas como a resiliência, devem ser adicionadas como parâmetros do projeto (SURIBABU, 2017). Por conseguinte, o projeto resiliente está se tornando essencial para permitir que os sistemas mantenham um nível aceitável de desempenho, mesmo quando desafiados por eventos inesperados e se adaptem continuamente em um ambiente dinâmico (LEVALLE; NOF, 2017). Porém, infelizmente, o projeto de sistemas de infraestrutura resilientes ainda é um tópico amplamente inexplorado (ZHANG et al., 2018). Para isso, é necessário avaliar a resiliência inerente ao sistema considerando as suas capacidades de resiliência, pois como ressaltaram Shin *et al.* (2018), a identificação de capacidades fracas e fortes de um sistema é necessária para que o processo de tomada de decisão invista em opções de infraestrutura baseadas em resiliência. Seguindo essa mesma linha, Juan-García *et al.* (2017) corroboraram que o desempenho de um sistema projetado em relação à resiliência pode ser melhorado por meio de intervenções que aumentem as suas capacidades. No entanto, apesar de algumas pesquisas anteriores sobre o

projeto resiliente de sistemas hídricos (BASUPI; KAPELAN, 2015; BI; DANDY; MAIER, 2016; CHOI et al., 2017; FARAHMANDFAR; PIRATLA; ANDRUS, 2017; FU; KAPELAN; REED, 2012; RECA et al., 2008; VASAN; SIMONOVIC, 2010), existe uma limitação em relação à uma visão ampla das capacidades resilientes aplicadas ao projeto do sistema de distribuição de água. Chmielewski *et al.* (2016) explicaram que o sistema de infraestrutura de água envolve subsistemas, como captação, armazenamento, tratamento e distribuição de água. Sendo assim, esta pesquisa se concentrou no projeto resiliente do sistema de distribuição de água, através do investimento em três capacidades de resiliência amplamente citadas na literatura, a saber, capacidade de absorção, adaptação e recuperação, que serão discutidas no capítulo 2.

Devido ao fato do conceito de resiliência ainda não ter sido amplamente aplicado no gerenciamento dos sistemas de distribuição de água (AMARASINGHE et al., 2016; FARAHMANDFAR; PIRATLA; ANDRUS, 2017; ZHANG; FENG; QIAN, 2009) e este ser um dos mais importantes sistemas complexos de infraestrutura (YAZDANI; JEFFREY, 2011), há pressão sobre as organizações desses sistemas para garantir aos clientes um fornecimento contínuo de água durante um tempo determinado (MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017). Dessa maneira, esta dissertação contribui para a literatura ao elaborar o projeto resiliente de um sistema de distribuição de água, estudando o comportamento da rede quando alguns dos seus componentes não estão operando devido aos eventos disruptivos, para isso, um estudo de caso em uma rede de distribuição de água e pesquisas na literatura serviram de apoio na construção do modelo proposto. Onde medir a resiliência dos sistemas de água pode fornecer aos tomadores de decisão, informações apropriadas sobre os componentes mais vulneráveis do sistema e da comunidade, bem como a duração da recuperação em caso de interrupções (BALAEI et al., 2018). Como o conceito de resiliência nos sistemas de água evoluiu, medidas de resiliência têm sido reconhecidas como importantes no processo de tomada de decisão para o desenvolvimento de estratégias de preparação, resposta e recuperação dos sistemas de infraestrutura hídrica contra eventos inesperados de ruptura (SHIN et al., 2018). Além disso, o fato de que o projeto desses sistemas precisa ser realizado agora para fornecer água adequada aos clientes no futuro, agrava o desafio de tomar decisões apropriadas a longo prazo (BASUPI; KAPELAN, 2015), ao mesmo tempo em que reafirma a importância de um adequado projeto de rede resiliente a fim de evitar consequências indesejáveis para a sociedade. Cunha e Sousa (2010) alertaram que as consequências provocadas pela ruptura destas infraestruturas agravam os efeitos que são, por vezes, difíceis de antecipar. À vista disso, espera-se que os sistemas de infraestrutura de água com um alto nível de resiliência recuperem-se rapidamente após um



desastre, enquanto os sistemas com baixa resiliência sofram uma recuperação lenta (MATTHEWS, 2016). Assim, é imprescindível um adequado projeto resiliente para sistemas de infraestrutura de água, de forma que as interrupções não agravem o fornecimento de água à população.

Soni e Jain (2011) pontuaram que empresas com poder de mercado que respondem rapidamente às interrupções têm a oportunidade de solidificar sua posição de liderança, e o investimento em resiliência é justificado devido às altas margens associadas às posições de mercado tão fortes. Juan-García *et al.* (2017) complementaram que é necessário se entender a resiliência através da eficácia de suas intervenções para, assim, desbloquear as novas oportunidades de investimento. Assim, há uma necessidade de se desenvolver planos de projeto ideais (VAIRAVAMOORTHY *et al.*, 2015). Dongre e Gupta (2017) estimaram que o custo do sistema de distribuição de água geralmente é responsável por 60% a 70% do custo total do sistema de infraestrutura de água e, como resultado, é importante que tais sistemas sejam projetados para serem tão eficientes quanto possível.

Com isso, a incerteza sobre a avaliação de custos será decisiva na tomada de decisões. No entanto, o projeto de menor custo pode falhar quando um futuro imprevisto se desdobra. Portanto, o desempenho do sistema sob perturbações é considerado imprescindível em um projeto de sistemas de distribuição de água (CHOI *et al.*, 2017). Avaliar e quantificar a resiliência desses sistemas melhora a compreensão do seu comportamento sob condições perturbadoras e auxilia na tomada de decisões nos esforços de melhoria da resiliência (ALJADHAI; ABRAHAM, 2018). Haasnoot *et al.* (2013) alertaram que, tradicionalmente, os decisores em muitos domínios, incluindo o gerenciamento da água, assumem que o futuro pode ser previsto e desenvolvem um plano estático ótimo usando um único futuro mais provável, no entanto, se o futuro for diferente do futuro hipotético, o plano provavelmente falhará. Por conseguinte, esta dissertação utilizou uma abordagem estocástica a fim de modelar os diferentes cenários de interesse relacionados a perturbações da rede de distribuição de água. Para isso, a programação linear inteira mista é utilizada como forma de se obter uma solução ótima, não obtida necessariamente em programações heurísticas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

O objetivo geral desta dissertação foi desenvolver um modelo de programação linear inteira mista para a otimização de investimentos em capacidades resilientes do projeto de

sistemas de distribuição de água sujeitos a interrupções, sendo estas modeladas através de uma análise estocástica dos cenários disruptivos.

### 1.2.2 *Específicos*

O objetivo geral implica o atendimento de alguns objetivos específicos, a saber:

- a) Destacar estudos na literatura sobre resiliência, capacidades resilientes, sistemas de distribuição de água, resiliência destes sistemas e seus projetos com/sem resiliência;
- b) Entender o funcionamento do sistema de distribuição de água e identificar pontos relevantes para a análise da resiliência, por meio de um estudo de caso;
- c) Desenvolver um modelo de otimização para o projeto resiliente, que se adapte as particularidades de um sistema de distribuição de água, com base nos estudos da literatura e do estudo de caso;
- d) Testar a aplicabilidade do modelo, através de um exemplo numérico, com diferentes probabilidades associadas aos cenários disruptivos;
- e) Identificar o comportamento dos resultados na aplicabilidade do modelo, devido às mudanças nas diferentes gravidades dos eventos disruptivos.

## 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi dividida em seis capítulos explicados nos parágrafos a seguir.

Este Capítulo 1 contemplou o enquadramento da dissertação realizada dentro da área de pesquisa estudada, delimitando o seu objetivo geral e os objetivos específicos necessários para o seu atendimento. Foram mostradas também, as devidas justificativas para a realização deste estudo e a necessidade de se modelar um projeto resiliente para sistemas de distribuição de água.

O Capítulo 2 se referiu à revisão da literatura. Constituindo essa fundamentação teórica um importante embasador para a construção do modelo proposto nesta pesquisa. Na revisão teórica foram agrupados uma miríade de trabalhos relativos à resiliência, sistemas e projetos de distribuição de água, delimitação dos eventos disruptivos, e métodos de otimização, assim como foram detalhadas e explicadas as capacidades resilientes que são fundamentais para esta pesquisa.

O Capítulo 3 compreendeu a principal etapa da pesquisa, que foi o desenvolvimento do modelo. Os primeiros subcapítulos compreenderam o estudo de caso, a contextualização do

estudo, delimitação do problema e as suposições do modelo. Em seguida foi desenvolvido o modelo, através de equações e restrições que foram devidamente descritas e explicadas.

O Capítulo 4 constituiu a aplicação do modelo desenvolvido, por meio da descrição do exemplo numérico utilizado da literatura, e com isso foram elencados os cenários abordados neste estudo juntamente com os dados utilizados. E, na sequência, foram mostrados os resultados com a aplicabilidade do modelo proposto, através do exemplo numérico. Além disso, foram realizadas outras simulações, a fim de se obterem análises com as diferentes possibilidades de gravidades para os eventos disruptivos.

O Capítulo 5 relatou as conclusões do trabalho e a importância do estudo realizado, bem como foram discutidas as limitações do trabalho e novas propostas para investigações na área.

E, por fim, foram apresentadas as referências destacadas ao longo desta dissertação e o apêndice contendo o questionário aplicado no estudo de caso.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi estruturada em três subcapítulos. O subcapítulo 2.1 englobou as definições sobre resiliência e outros conceitos relacionados à resiliência, contendo algumas características das publicações de várias áreas do conhecimento acerca do termo. Em seguida, no subcapítulo 2.2, abordaram-se os assuntos relacionados ao sistema de distribuição de água, que foi o sistema de análise para esta pesquisa. Neste subcapítulo foram reunidos trabalhos sobre resiliência do sistema em estudo, bem como trabalhos que tem como objetivo o projeto de redes de distribuição de água com/sem a consideração da resiliência, também foram agrupadas informações sobre eventos disruptivos e métodos de otimização em sistemas de distribuição de água, bem como do método adotado para esta pesquisa, a programação linear inteira mista. Por fim, o subcapítulo 2.3 enfatizou as capacidades de resiliência que foram fundamentais para a construção do modelo proposto.

### 2.1 Resiliência

O termo resiliência é aplicado no campo da análise e gestão de ecossistemas no início dos anos de 1970, com Holling (1973), que definiu a resiliência como sendo a persistência das interações dentro de um sistema e uma medida da capacidade de absorver mudanças das variáveis. Um *insight* fundamental obtido a partir desse campo socio-ecológico é a ideia de que a resiliência deve considerar os distúrbios como uma oportunidade para se reorganizar e se adaptar à mudança (JUAN-GARCÍA et al., 2017). O uso comum da palavra resiliência implica a capacidade de uma entidade ou sistema retornar à condição normal após a ocorrência de um evento que perturba o seu estado (HOSSEINI; BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2016). Zhang *et al.* (2018) enfatizaram que a resiliência melhora a capacidade do sistema para se recuperar dos eventos disruptivos rapidamente e oferecer o nível desejado de desempenho, porém, talvez, um nível de desempenho diferente do original após a interrupção. Além disso, a resiliência depende da capacidade de se adaptar às mudanças inesperadas e sem precedentes (AHERN, 2011). Labaka, Hernantes e Sarriegi (2015) definiram a resiliência como a capacidade do sistema para prevenir a ocorrência de uma crise e, quando ocorre uma crise, a capacidade de absorver o impacto e se recuperar eficientemente para o estado normal de operação. Em geral, a resiliência é definida como a capacidade do sistema para se recuperar de sua falha, contratempos e para se adaptar bem à mudança (SURIBABU, 2017). Angeler e Allen (2016) pontuaram que a resiliência ganhou popularidade por ser um termo destinado para descrever a capacidade de um sistema para resistir às perturbações. Ela permite que os

operadores do sistema evitem falhas catastróficas, identificando pontos de gatilho para ação oportuna e implementação das medidas corretivas (AMARASINGHE et al., 2016). Jackson e Ferris (2013) alertaram que a resiliência é um atributo, e não um complemento para o sistema. O aspecto essencial de um sistema resiliente é que ele tem uma capacidade adequada para evitar consequências adversas sob perturbações e uma capacidade de auto-organização e adaptação, exibindo uma maior capacidade de fornecer serviços desejados (WANG et al., 2009). Para Soni e Jain (2011), os sistemas resilientes devem ser projetadas para incorporar prontidão aos eventos, fornecer uma resposta eficiente e eficaz, e devem ser capazes de se recuperar para seu estado original ou até melhor após a interrupção. Características resilientes de um sistema são a maneira como um sistema reage quando sua resistência é quebrada (ROACH; KAPELAN; LEDBETTER, 2018).

Resiliência é um termo multidisciplinar (ANGELER; ALLEN, 2016; BHAMRA; DANI; BURNARD, 2011; FRANCIS; BEKERA, 2014; JUAN-GARCÍA et al., 2017; PONOMAROV; HOLCOMB, 2009; SHARIFI; YAMAGATA, 2016b; WANG et al., 2009) e a falta de um consenso para a sua definição resultou em múltiplas definições. Segundo Butler *et al.* (2016), a resiliência refere-se ao desempenho durante a vida útil do projeto, mas trata do desempenho durante períodos em que o nível de serviço exigido não é atendido, ou seja, quando sujeito às ameaças. Enquanto isso, Ponomarov e Holcomb (2009) propuseram um conceito de resiliência representado por uma abordagem multidimensional, englobando a capacidade de adaptação do sistema em preparar-se para eventos inesperados, resposta às interrupções e recuperação, com a continuidade das operações com o nível desejado. Em seu trabalho, Woods (2015) agrupou os diferentes conceitos para resiliência em quatro conceitos básicos: (1) recuperação da disrupção e retorno ao equilíbrio; (2) sinônimo de robustez; (3) o oposto da fragilidade; e a (4) forma de se adaptar às surpresas futuras. Francis e Bekera (2014) conceituaram a resiliência como uma propriedade dotada ou enriquecida de um sistema que é capaz de efetivamente combater (absorver, adaptar-se ou recuperar-se rapidamente) eventos disruptivos. Chmielewski *et al.* (2016) referiram-se à resiliência como a capacidade de preparar-se e adaptar-se às condições de mudança, e de se recuperar rapidamente de rupturas. Em sua visão, Dziedzic e Karney (2016) relacionaram a resiliência ao conceito de persistência, mostrando que um sistema resiliente pode sofrer flutuações significativas, uma vez que a estabilidade indica a capacidade dos sistemas retornarem para um estado de equilíbrio após uma perturbação temporária. Enquanto isso, Cutter *et al.* (2008) denominaram a resiliência como a capacidade do sistema para responder e se recuperar de desastres, incluindo as condições inerentes que permitam que o sistema absorva impactos e lide com um evento, bem como com

processos adaptativos pós-evento, que facilitem a capacidade do sistema para se reorganizar, mudar e aprender em resposta às ameaças. Para Ganin *et al.* (2016), a resiliência deve avaliar comparativamente as alternativas dos projetos para melhorar a capacidade do sistema de (i) planejar eventos adversos, (ii) absorver o estresse, (iii) recuperar e (iv) prever e preparar-se para futuras ameaças potenciais. Outros estudos foram mais sucintos, como Zhang *et al.* (2017), e descreveram a resiliência como a rapidez com que um sistema provavelmente se recuperará após a ocorrência de uma falha, enquanto Todini (2000) descreveu a resiliência como a capacidade de superar as condições de estresse ou falha, e Gay e Sinha (2012) a definiram como a capacidade de um sistema para recuperar eficientemente a sua função perdida após a interrupção. Outros trabalhos (DAVIDSON *et al.*, 2016; LEVALLE; NOF, 2017) procuraram dar maior clareza à definição do termo no geral.

Uma vez que a resiliência tende a ser comumente considerada como um conceito qualitativo é, portanto, difícil de avaliar (AMARASINGHE *et al.*, 2016). Por essa razão, alguns trabalhos abordaram a utilização de métricas de resiliência (ASADZADEH; KÖTTER, 2015; CUTTER, 2016; GANIN *et al.*, 2016; HENRY; RAMIREZ-MARQUEZ, 2012), enquanto outros estudaram-na em um determinado setor, como: automotivo (CARVALHO *et al.*, 2012), energético (SHARIFI; YAMAGATA, 2016a), hidroviário (BAROUD *et al.*, 2014), nuclear (LABAKA; HERNANTES; SARRIEGI, 2015), organizacional (BHAMRA; DANI; BURNARD, 2011), petroquímico (VUGRIN; WARREN; EHLEN, 2011), químico (DINH *et al.*, 2012). Apesar de multidisciplinares, as definições para resiliência compartilham vários elementos comuns: capacidade de absorção, capacidade de adaptação e capacidade de recuperação. Turnquist e Vugrin (2013) explicaram a necessidade dessas três capacidades como: capacidade de absorção para que a rede possa resistir às interrupções; capacidade de adaptação para que o fluxo através da rede possa ser acomodado através de caminhos alternativos; e capacidade restauradora para que a recuperação de um evento disruptivo possa ser realizada rapidamente, com um custo mínimo. Incluindo os conceitos dessas capacidades, eles modelaram o investimento em projeto resiliente de cadeias de suprimentos sujeitas a interrupções, estando as descrições dos parâmetros e variáveis de seu modelo nos Quadros 1 e 2, respectivamente:

Quadro 1 - Parâmetros do modelo de Turnquist e Vugrin (2013)

Parâmetros	Descrição
$T$	Número total dos períodos de tempo considerados
$B_t$	Capacidade disponível para restauração no período $t$ (unidades)
$c_j$	Recurso para restaurar uma unidade da capacidade do Centro de Distribuição (CD) $j$
$F_i$	Custo de uma unidade adicional da capacidade do CD $j$
$G_{ij}$	Custo do estabelecimento de uma ligação secundária entre o consumidor $i$ e o CD $j$
$K_j$	Capacidade inicial do CD $j$
$H$	Investimento inicial requerido para capacidade de recuperação adicional (por unidade)
$q_i$	Demanda do consumidor $i$
$d_{ij}$	Distância do CD $j$ para o consumidor $i$
$O_s$	Probabilidade do cenário $s$
$\theta$	Limite do custo total para um evento extremo
$\gamma_j^s$	Fração da capacidade do CD $j$ disponível depois da interrupção no cenário $s$
$j^*(i)$	Índice das ligações pré-definidas do CD para o consumidor $i$
$\epsilon, \epsilon, \beta, \vartheta, \mu$	Coefficientes de custo

Fonte: Adaptado de Turnquist e Vugrin (2013)

Quadro 2 - Variáveis do modelo de Turnquist e Vugrin (2013)

Variáveis	Descrição
$w_j$	Capacidade inicial adicional para o CD $j$
$z_{ij}$	Conexão adicional do CD para o consumidor $\{0,1\}$
$R$	Investimento em capacidade adicional de restauração (unidades/período)
$r_{jt}^s$	Capacidade do CD $j$ restaurada no período $t$ do cenário $s$
$U_{jt}^s$	Capacidade acumulada disponível do CD $j$ no período $t$ do cenário $s$
$x_{ijt}^s$	Proporção da demanda do consumidor $i$ atendida pelo CD $j$ no período $t$ do cenário $s$
$y_{it}^s$	Proporção da demanda do consumidor $i$ não atendida no período $t$ do cenário $s$
$v^s$	Montante que excedem um limite no cenário $s$

Fonte: Adaptado de Turnquist e Vugrin (2013)

Com a descrição dos parâmetros e variáveis utilizados, Turnquist e Vugrin (2013) modelaram seu projeto através das equações (2.1) – (2.13):

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } & \sum_j F_j w_j + \sum_i \sum_j G_{ij} z_{ij} + HR \\
 & + \sum_s p^s \left[ \epsilon \sum_i \sum_j q_i d_{ij} \sum_t x_{ijt}^s + \epsilon \sum_i q_i \sum_t y_{it}^s + \mu \sum_j c_j \sum_t r_{jt}^s \right] \\
 & + \sum_s p^s \left[ \vartheta \sum_j \sum_t (K_j + w_j - U_{jt}^s) + \beta v^s \right]
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

sujeito à

$$\sum_j z_{ij} \leq 2 \quad \forall i \quad (2.2)$$

$$z_{i,j^*(i)} = 1 \quad \forall i \quad (2.3)$$

$$\sum_j c_j r_{jt}^s \leq B_t + R \quad \forall t, s \quad (2.4)$$

$$U_{jt}^s = \gamma_j^s (K_j + w_j) + \sum_{\tau=1}^{t-1} r_{j\tau}^s \quad \forall j, t, s \quad (2.5)$$

$$U_{jt}^s \leq K_j + w_j \quad \forall j, t < T, s \quad (2.6)$$

$$U_{jT}^s = K_j + w_j \quad \forall j, s \quad (2.7)$$

$$x_{ijt}^s - z_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j, t, s \quad (2.8)$$

$$\sum_j x_{ijt}^s + y_{it}^s = 1 \quad \forall i, t, s \quad (2.9)$$

$$\sum_i q_i x_{ijt}^s \leq U_{jt}^s \quad \forall j, t, s \quad (2.10)$$

$$v^s \geq \varepsilon \sum_i \sum_j q_i d_{ij} \sum_t x_{ijt}^s + \epsilon \sum_i q_i \sum_t y_{it}^s + \sum_j c_j \sum_t r_{jt}^s - \theta \quad \forall s \quad (2.11)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (2.12)$$

$$w_j, x_{ijt}^s, y_{it}^s, r_{jt}^s, U_{jt}^s, v^s \geq 0 \quad \forall i, j, t, s \quad (2.13)$$

De forma sucinta, o objetivo (2.1) é minimizar a soma de todos os custos considerados. A primeira linha do objetivo é o conjunto dos custos relacionados ao projeto, incorridos para a expansão da capacidade do centro de distribuição (capacidade de absorção), ao estabelecimento das ligações de *backup* entre clientes e centros de distribuição (capacidade de adaptação) e capacidade adicional para restaurar a capacidade dos centros após uma interrupção (capacidade de recuperação). A segunda linha do objetivo reflete os custos esperados (em cenários) dos movimentos dos centros de distribuição para os clientes, além dos custos da demanda não atendida e dos custos de restauração. A terceira linha do objetivo inclui as penalidades esperadas (em cenários) para a capacidade não restaurada e os impactos dos cenários extremos. As restrições (2.2) e (2.3) propiciam a criação de ligações adicionais entre centros de distribuição e clientes. A restrição (2.4) reflete a limitação de recursos nas atividades de restauração em cada período. As restrições (2.5) - (2.7) representam a evolução da capacidade dos centros de distribuição ao longo do tempo em cada cenário. Restrições (2.8) - (2.10)



definem fluxos viáveis na rede, a restrição (2.11) limita o impacto extremo e as restrições (2.12) e (2.13) definem os valores viáveis para as variáveis.

Porém, este modelo não aborda algumas questões que são essenciais para o contexto resiliente, como: diferenciação entre clientes (quando algum cliente necessitar de atendimento prioritário em relação aos demais); a magnitude do impacto do evento (onde diferentes impactos ocasionam diferentes consequências); e o tempo de recuperação do sistema (capturando a velocidade de retorno aos níveis nominais). Seguindo esse modelo, outros autores (CUNHA et al., 2016; MOURA et al., 2017) incluíram esses conceitos de capacidades resilientes em seus modelos matemáticos. Cunha *et al.* (2016) formularam um modelo de otimização para apoiar decisões de investimento em uma rede logística, incluindo conceitos de atendimento aos níveis de serviço dos clientes. Porém não consideraram a diferenciação entre clientes, que no caso dos sistemas de distribuição de água, são essenciais, pois instalações prioritárias (hospitais, bombeiros, indústrias, etc.) necessitam de um rápido atendimento. Além do mais não incorporaram um tempo máximo para se iniciar o atendimento à demanda. Enquanto isso, Moura *et al.* (2017) propuseram um modelo de otimização para o investimento em projeto de redes elétricas que atendem a clientes industriais. Eles consideraram a taxa de recuperação para as linhas elétricas, porém não consideraram a possibilidade da mudança dessa taxa devido à gravidade do evento disruptivo.

Contribuindo com a literatura, esta pesquisa adaptou o modelo de Turnquist e Vugrin (2013), incluindo também considerações abordadas dos modelos de Cunha *et al.* (2016) (sobre nível de serviço) e Moura *et al.* (2017) (sobre taxa de recuperação), para o projeto de sistemas resilientes. Ainda propõe-se um modelo envolvendo resiliência em outro contexto, sistemas de distribuição água, em que as capacidades da resiliência são adaptadas para uma estrutura hídrica e suas particularidades. Vários autores (ALJADHAI; ABRAHAM, 2018; FRANCIS; BEKERA, 2014; GANIN et al., 2016; LABAKA; HERNANTES; SARRIEGI, 2015; NAN; SANSAVINI, 2017; SHARIFI; YAMAGATA, 2016b; SHIN et al., 2018; TRAN et al., 2017; VUGRIN; WARREN; EHLEN, 2011; WANG; BLACKMORE, 2009; WANG et al., 2009) delimitaram em seus estudos essas três capacidades da resiliência vistas anteriormente, e uma explicação mais consistente e abrangente sobre as capacidades da resiliência foi elucidada no subcapítulo 2.3.

Aljadhaj e Abraham (2018) destacaram que diferentes aspectos da resiliência na literatura (como robustez, confiabilidade, etc.) podem ser vinculados com essas três capacidades de resiliência. Devido a essa proximidade entre o conceito de resiliência e outros termos na literatura, algumas pesquisas (BLACKMORE; PLANT, 2008; GALLOPÍN, 2006; MILLER et

al., 2010; PARK et al., 2013) objetivaram discutir essas relações, que foi realçada no próximo tópico.

### 2.1.1 *Resiliência e outros conceitos*

Na esfera da resiliência, Francis e Bekera (2014) e Turnquist e Vugrin (2013) reforçaram que as avaliações de vulnerabilidade são importantes e podem ajudar na identificação de elementos do sistema que são prováveis candidatos para investimentos no reforço da resiliência, mas não fornecem orientação direta para o projeto do sistema. A vulnerabilidade é mais alta quando a probabilidade da ocorrência de um evento e o impacto da interrupção são altos. Por outro lado, eventos de baixa consequência representam um nível mais baixo de vulnerabilidade e exigem pouco planejamento ou ação (SONI; JAIN, 2011). Aven (2011) esclareceu que enquanto a vulnerabilidade está relacionada com um tipo de evento, a resiliência se difere por estar aberta aos diversos tipos de eventos que possam ocorrer. Dentro de um contexto mais amplo, o conceito de vulnerabilidade é mais frequentemente definido como estando sujeito a uma variedade de efeitos (BHAMRA; DANI; BURNARD, 2011). Gallopín (2006) observou que um sistema resiliente é menos vulnerável do que um sistema não resiliente, mas essa relação não implica necessariamente simetria, no qual o conceito de resiliência não inclui exposição (termo associado à vulnerabilidade), mas refere-se à reação do sistema quando exposto às perturbações. Farahmandfar, Piratla e Andrus (2017) afirmaram que uma segunda abordagem para caracterizar a resiliência contra falhas aleatórias é definir a resiliência como o antônimo de vulnerabilidade do sistema e quantificá-lo, avaliando a vulnerabilidade contra diferentes ataques. Yazdani, Otoo e Jeffrey (2011) também confirmaram que a vulnerabilidade do sistema é consequentemente considerada como o antônimo da resiliência. Com isso, percebe-se a importância de se projetar um sistema resiliente para que o mesmo seja capaz de retornar rapidamente aos seus níveis nominais ao estar exposto a perturbações, ao contrário de um sistema sem resiliência que estará vulnerável quando exposto a interrupções, sem uma adequada estrutura para retorno.

Enquanto isso, para Juan-García *et al.* (2017), a resiliência deve ser definida como uma mudança em nossa filosofia para avaliar e prevenir riscos. O risco geralmente é quantificado pela avaliação de uma função da frequência do evento e a magnitude da consequência (BLACKMORE; PLANT, 2008; LAUCELLI; GIUSTOLISI, 2015). Caracterizando a mitigação uma das formas de gerenciamento de riscos, Cimellaro, Reinhorn e Bruneau (2005) afirmaram que enquanto a mitigação pode enfatizar o uso de novas tecnologias e a implementação de políticas para reduzir as perdas, a resiliência também considera o processo

de recuperação, incluindo o comportamento dos indivíduos e organizações em face de um desastre. Kanta e Brumbelow (2013) afirmaram que, se realizada antecipadamente, a mitigação reduz a vulnerabilidade de um sistema, e embora a análise de vulnerabilidades identifique componentes e mecanismos suscetíveis pelos quais os danos potenciais possam ocorrer sem levar em conta as probabilidades dos eventos, o risco unifica as consequências e a probabilidade de falha em um único conceito. Com relação aos eventos em que a probabilidade de um cenário é incalculável, Diao *et al.* (2016b) disseram que é precisamente nesse ponto que uma abordagem de resiliência é de maior benefício, pois o risco não pode ser calculado, mas isso não significa que tais ocorrências devam ser ignoradas e a avaliação de resiliência fornece uma ferramenta na qual eles podem ser considerados. Embora a avaliação de risco tradicional se concentre nos estados de controle em componentes específicos do sistema e na probabilidade e nas consequências da falha de controle, a teoria da resiliência trata do comportamento de todo o sistema (BLACKMORE; PLANT, 2008). É cada vez mais compreendido que a análise de risco sozinha é insuficiente para a proteção dos sistemas críticos de infraestrutura no contexto de ameaças emergentes (PARK *et al.*, 2013). Em muitas disciplinas de engenharia, o conceito de resiliência está intimamente ligado ao conceito de risco (FRANCIS; BEKERA, 2014), e nesse sentido, Gay e Sinha (2012) enfatizaram que a avaliação de riscos deve ser complementada com conceitos baseados em resiliência que avaliem não apenas o risco geral, mas também considerem os processos de recuperação necessários e um conceito mais abrangente de análise e gerenciamento de riscos. Linkov *et al.* (2014) esclareceram que o gerenciamento de resiliência vai além do gerenciamento de riscos para abordar as complexidades de grandes sistemas integrados, uma vez que a análise de risco deve ser usada sempre que possível para ajudar a se preparar e prevenir as consequências de eventos previsíveis, mas a resiliência deve ser embutida nos sistemas para ajudá-los a se recuperar e se adaptar rapidamente quando ocorrem eventos adversos. Dessa forma, a resiliência supera limitações da análise de risco e inclui uma abordagem mais ampla, através da consideração de resposta rápida e das baixas probabilidades associadas aos eventos disruptivos.

Em outro contexto, Todini (2000) observou que a introdução do conceito de resiliência supera o conceito de confiabilidade, onde embora o conceito de resiliência não envolva considerações estatísticas sobre falhas, seu aumento levará para uma melhor confiabilidade do sistema. A confiabilidade atende ao desempenho dentro da vida útil do sistema e durante os períodos em que se espera que o nível de serviço exigido seja cumprido, isto é, quando sujeito à carga padrão e na ausência de condições excepcionais (BUTLER *et al.*, 2016). Atkinson *et al.* (2014) definiram confiabilidade como o grau em que o sistema é capaz de alcançar suas

condições operacionais, sob condições normais e anormais. Torii e Lopez (2012) sintetizaram que os métodos de confiabilidade avaliam apenas a probabilidade de o sistema operar de acordo com suas especificações, enquanto Jung *et al.* (2014) pontuaram que o projeto baseado na confiabilidade requer a definição da condição de demanda, sua distribuição de probabilidade e suas estatísticas, que não são simples na prática, diferindo assim do conceito de resiliência. Expandindo essa ideia, Butler *et al.* (2016) esclareceram que enquanto o projeto baseado em confiabilidade tem como objetivo fornecer um desempenho à prova de falhas, ou seja, evitar falhas, o projeto baseado em resiliência visa superar falhas e garantir que o sistema esteja seguro para falhar. Com isso, Turnquist e Vugrin (2013) explicaram que as análises baseadas em confiabilidade geralmente se concentram no grau em que uma rede pode suportar certos tipos de interrupções, mas não inclui os processos de recuperação que são importantes na resiliência. Por consequência, a confiabilidade de um sistema está restrita a determinadas condições que possam ocorrer, diferente da resiliência, que engloba uma miríade de eventos e de reações perante a interrupção.

Jung *et al.* (2014) esclareceram que o projeto baseado em confiabilidade não incorpora a variação do desempenho do sistema, enquanto o projeto robusto a incorpora, em que a robustez é geralmente definida como a capacidade do sistema para manter sua função sob um conjunto definido de distúrbios, evitando ou minimizando a gravidade da falha ao invés de se concentrar na probabilidade de operação bem-sucedida. Desenvolvendo o conceito de robustez, Sweetapple, Fu e Butler (2017) definiram-na como o grau em que o sistema é capaz de manter um nível aceitável de serviço quando sujeito a uma dada incerteza. Enquanto isso, para Babayan *et al.* (2005), a robustez do sistema foi definida como a capacidade de fornecer um suprimento adequado aos clientes, apesar das flutuações em alguns ou todos os parâmetros do projeto. Para Gay e Sinha (2012), a robustez é a capacidade dos componentes do sistema para suportar um evento perturbador sem perda de função. Já Francis e Bekera (2014) apontaram que algumas definições de resiliência estão em competição com o termo de robustez, pois na engenharia, a robustez é frequentemente usada como sinônimo ou no lugar da resiliência. Porém, a resiliência não considera apenas estar em determinado nível de desempenho, pode-se diminuir o nível, desde que o sistema se recupere em determinado tempo para os níveis estabelecidos por meio de ações de recuperação, o que não é abordado no todo pela robustez, sendo ela inserida na resiliência sob a forma da capacidade de absorção, relativa a manter um determinado nível de impacto sistêmico logo após o evento disruptivo.

Ante o exposto neste tópico, percebeu-se que a resiliência e outros conceitos estão inter-relacionados, contudo, possuem características que os tornam particulares. E, nos últimos anos,

as particularidades da resiliência destacaram-se em relação aos demais conceitos, e diversas pesquisas se concentraram no desenvolvimento de projetos de sistemas resilientes. Em vista disto, esta dissertação evidenciou o conceito da resiliência para o projeto de sistemas de distribuição de água.

## **2.2 Sistemas de distribuição de água**

Sistemas de infraestrutura de água variam de simples a complexos. O objetivo principal do sistema é fornecer água potável ao público em quantidade suficiente em todos os momentos (ATKINSON et al., 2014; CHOI et al., 2017; KANTA; BRUMBELOW, 2013; VAIRAVAMOORTHY et al., 2015). Um objetivo de utilidade de água é fornecer esse serviço com um custo mínimo (HAMILTON, 2009; KANG; LANSEY, 2012). Um sistema de infraestrutura de água convencional é uma combinação de subsistemas, consistindo em captação, reservatório de armazenamento, estação de tratamento e rede de distribuição (AMARASINGHE et al., 2016; SIQUEIRA, 2014). Interrupções em qualquer um desses subsistemas pode atrapalhar as funções críticas da comunidade e causar efeitos, influenciando a economia e o bem-estar geral das comunidades (CHMIELEWSKI et al., 2016). Devido às várias partes inerentes a um sistema de infraestrutura de água, este trabalho analisou o sistema de distribuição de água, que é responsável pelo fornecimento de água à população e, portanto, um sistema considerado crítico para a sociedade e que impacta diretamente a vivência da população, incorrendo em custos materiais e imateriais.

Normalmente, os sistemas de distribuição de água são compostos por tanques, tubulações e bombas que distribuem água tratada das estações de tratamento para os consumidores (PREIS; OSTFELD, 2008; SHIN et al., 2018). Após um evento de risco, Farahmandfar, Piratla e Andrus (2016) alertaram que é desejável que as redes de distribuição de água continuem a funcionar satisfatoriamente para facilitar os processos de recuperação, pois terremotos do passado, incluindo Northridge (Califórnia-1994), Kobe (Japão-1995), Porto Príncipe (Haiti-2010), Christchurch (Nova Zelândia-2011) e Tahoka (Japão-2011) causaram graves danos às redes de distribuição de água. Davis (2014) exemplificou que o terremoto de Northridge em 1994, que atingiu a área norte de Los Angeles, resultou no reparo de 14 condutos de distribuição de água bruta, mais de 60 reparos nos tubos de transmissão de água tratada, 1.013 reparos nos tubos de distribuição, mais de 200 reparos nos serviços de conexão, 7 reservatórios danificados, além de que metade da estação de tratamento foi temporariamente removida de serviço e, alguns outros danos acidentais. Isto posto, os custos totais de reparo do sistema de água atingiram US\$ 41

milhões. E recentemente, após o terremoto de 2015 em Gorkha, no Nepal, o sistema hídrico da cidade foi afetado e quase todos os tubos foram danificados (DIDIER et al., 2018).

Luna, Balakrishnan e Dagli (2011) ressaltaram que dependendo da importância do componente e de sua localização no sistema de distribuição, até mesmo uma pequena interrupção pode ocasionar um dano grande o suficiente para interromper todas as suas funcionalidades. Até mesmo uma rede moderada (com poucos pontos de demanda) pode ter centenas de quilômetros de tubulações, tornando-a inerentemente vulnerável (PREIS; OSTFELD, 2008). Uma séria preocupação para os gestores dos serviços de distribuição de água é a vulnerabilidade das infraestruturas críticas, que estão expostas às perturbações e perigos (YAZDANI; JEFFREY, 2012a). Uma falha pode comprometer a integridade do sistema de distribuição de água e diminuir o atendimento à demanda e, conseqüentemente, os consumidores podem ser fornecidos parcialmente (GHEISI; NASER, 2015). Assim sendo, sistemas de distribuição de água do mundo real geralmente têm um grande número de componentes com propriedades dinâmicas (taxas de fluxo, demandas de água, etc.) organizadas em topologias complexas (por exemplo, uma combinação de *loops* e ramificações de tubulações) (DIAO et al., 2016a).

Em vista disso, o sistema de distribuição de água constitui um imprescindível sistema a ser analisado, tendo em vista as suas implicações essenciais para a população, juntamente com as interrupções nas quais pode estar sujeito e os altos custos associados na ocorrência destas. Sendo assim, esta dissertação enfocou a possibilidade de eventos disruptivos no projeto ótimo deste sistema, que é um problema complexo a ser resolvido devido às diversas variáveis envolvidas no sistema. Trabalhos envolvendo projetos de sistemas de distribuição de água foram elencados no próximo tópico.

### 2.2.1 *Projetos de sistemas de distribuição de água*

O projeto ideal e a recuperação de um sistema de distribuição de água têm atraído atenção substancial nas últimas décadas (FU; KAPELAN; REED, 2012). Inicialmente, os projetos econômicos eram orientados principalmente para minimizar o custo de transportar água para a cidade, em termos do custo de um ou mais reservatórios, dos tubos e da rede de distribuição de água (TODINI, 2000). Esses métodos tradicionais de otimização consideraram as preocupações locais, como o custo das tubulações, bombas e tanques, e atendem aos requisitos mínimos de pressão e velocidade máxima (HERSTEIN; FILION; HALL, 2009). Todavia, não incluíram as incertezas relacionadas a interrupções no projeto do sistema, havendo uma preocupação maior com o projeto hidráulico, sem ter em consideração a sua resiliência inerente. Com o tempo,

outras questões foram consideradas nesses projetos. Por exemplo, na visão de Chung, Lansey e Bayraksan (2009), o projeto do sistema de distribuição representa uma compensação entre os tamanhos de tubos e bombas, consumo de energia, tamanhos de componentes, tempo de fluxo e qualidade da água. Enquanto para Bi, Dandy e Maier (2016), o problema do projeto da rede de distribuição normalmente envolve a seleção de tamanhos de diâmetro de tubulação para uma topologia de rede pré-definida, a fim de atender aos objetivos de projeto selecionados e satisfazer as restrições hidráulicas e de projeto. Assim como Bi, Dandy e Maier (2016), a maioria dos autores (CHOI et al., 2017; DONGRE; GUPTA, 2017; KADU, GUPTA; BHAVE, 2008; TODINI, 2000; VASAN; SIMONOVIC, 2010) modelou seu projeto dessa forma, considerando apenas questões hidráulicas/técnicas sobre dimensionamento e seleção de tamanhos de tubos, com o objetivo de se alcançar o custo mínimo.

Em seu estudo, Kang e Lansey (2012) projetaram uma rede de distribuição com o objetivo de minimizar os custos gerais do sistema, atendendo às demandas de água e satisfazendo os requisitos de pressão. Em contrapartida, o projeto da rede de água de Diao, Zhou e Rauch (2013) consistiu no desenvolvimento de um método para criar limites para as áreas metropolitanas da região englobada por essa rede, de forma que esses limites contribuíssem para um melhor sistema de distribuição de água. Enquanto isso, Jung *et al.* (2014) elaboraram um projeto de rede através de um índice de robustez, que limita o intervalo da variabilidade da função do sistema em relação à pressão, e Righetto (2002) projetou o sistema de distribuição de água envolvendo parâmetros relacionados com o consumo de energia, confiabilidade operacional, satisfação quanto ao atendimento da demanda e controle de pressões nodais. E as variáveis de decisão consideradas foram: número de bombas em operação de cada estação; a velocidade rotacional das bombas; e a condição de abertura das válvulas de controle de vazão. Fu *et al.* (2013) modelaram um problema multiobjetivo com seis objetivos: (1) custo de capital, (2) custo operacional, (3) falha hidráulica, (4) vazamento, (5) qualidade da água e (6) capacidade de combate a incêndio, os quais foram otimizados com base nas decisões relacionadas ao dimensionamento de tubos, localização e dimensionamento de tanques, e programação das bombas, sujeito às restrições de pressões.

Várias abordagens foram desenvolvidas no contexto do projeto das redes de distribuição de água, como recuperação pós-terremoto (LUNA; BALAKRISHNAN; DAGLI, 2011), incerteza da demanda (BABAYAN et al., 2005), qualidade da água (FENG; SEIDER, 2001; PALLETI et al., 2018), localização de sensores (ARAL; GUAN; MASLIA, 2010; OSTFELD et al., 2008; PREIS; OSTFELD, 2008), controle de bombas (DIAO et al., 2016a), volume e/ou localização de tanques (BATCHABANI; FUAMBA, 2014), impacto ambiental (HERSTEIN;

FILION; HALL, 2009), controle de válvulas (JUN et al., 2007). Babayan *et al.* (2005), por sua vez, projetaram uma rede de menor custo sob restrições hidráulicas e técnicas, formulando um problema de otimização de objetivo estocástico sujeito à incerteza da demanda, e depois aplicaram uma abordagem determinística para resolvê-lo. Feng e Seider (2001) elaboraram o projeto do sistema hídrico com foco principal na quantidade de concentração de contaminantes na rede de água. Em seu trabalho, Preis e Ostfeld (2008) projetaram a localização ótima de sensores para contaminantes do sistema de distribuição de água, onde o problema multiobjetivo foi maximizar a probabilidade de detecção do sensor e a sua redundância, e minimizar o tempo de detecção esperado pelo sensor. Enquanto isso, Diao *et al.* (2016a) otimizaram a operação das bombas, a fim de encontrar os melhores níveis para abertura e fechamento de cada bomba dentro de um intervalo de tempo. E Batchabani e Fuamba (2014) mostraram diversas abordagens para a consideração de tanques na otimização dos projetos de sistemas hídricos, além disso examinaram as lacunas existentes entre os modelos apresentados. Em outra situação, Herstein, Filion e Hall (2009) avaliaram o impacto ambiental no projeto dos sistemas de distribuição de água e, para isso, incluíram o efeito ambiental através dos índices de consumo dos recursos não renováveis, emissões de poluentes e impactos ambientais. Devido à importância das válvulas para a função de desligamento de subsistemas em uma rede de distribuição de água, Jun *et al.* (2007) avaliaram o impacto de falhas dessas válvulas, em termos de expansão da rede e aumento do número de clientes sem atendimento e com isso, analisaram a propagação da falha através da rede quando as válvulas não fecham e depois enumeram todas as possíveis combinações de falhas e probabilidades de eventos correspondentes.

Além dos projetos para sistemas de distribuição citados anteriormente, a confiabilidade nesses sistemas foi objeto de várias investigações (ATKINSON et al., 2014; CHUNG; LANSEY; BAYRAKSAN, 2009; GIUSTOLISI; LAUCELLI; COLOMBO, 2009; JUNG; KIM, 2018; TORII; LOPEZ, 2012; YOO et al., 2017). Através da otimização multiobjetivo, Atkinson *et al.* (2014) avaliaram dois indicadores de confiabilidade no projeto do sistema de distribuição de água. Em sua otimização multiobjetivo, Giustolisi, Laucelli e Colombo (2009) incorporaram a incerteza da demanda da água e da rugosidade dos tubos, visando minimizar os custos e maximizar a confiabilidade hidráulica das variáveis de decisão relacionadas ao diâmetro dos tubos, sujeitas às restrições de limites de pressão. Enquanto isso, Yoo *et al.* (2017) objetivaram minimizar o custo e maximizar a confiabilidade sísmica de uma rede de distribuição de água sujeita aos eventos sísmicos estocásticos, onde as decisões foram relativas ao número de tanques e tamanho de tubos, sujeitos a restrições hidráulicas e de pressão. Todavia, nos últimos anos, tem ocorrido uma atenção crescente para a resiliência nos sistemas



de infraestrutura de água, com uma mudança de paradigma de confiabilidade para resiliência (BUTLER et al., 2016).

Em tese, as variáveis dos projetos de sistemas de distribuição de água envolvem muitas formas, por exemplo, a seleção de diâmetros para os tubos, tipos e locais de bombas, o dimensionamento e a localização dos tanques, as configurações de pressão e localizações das válvulas, entre outras. Estando estas variáveis sujeitas ao atendimento dos requisitos hidráulicos e técnicos, que incluem pressão, velocidade, fluxo suficiente, etc. Esta dissertação não teve por objetivo o modelo hidráulico e/ou técnico de redes de distribuição de água, porém, foram relatados trabalhos desta natureza como forma de explanar a literatura acerca do tema e demonstrar que a maioria dos trabalhos relativos a esses projetos se concentraram neste objetivo, sem consideração da resiliência do mesmo, que constitui um importante fator a ser considerado nos dias atuais devido a diferentes interrupções inerentes ao sistema, bem como às altas consequências que possam ocorrer destas. Sendo assim, este estudo desenvolveu um modelo incorporando resiliência para apoiar os tomadores de decisão quanto aos investimentos em sistemas de distribuição de água. Farahmandfar, Piratla e Andrus (2017) destacaram a importância do estudo da resiliência em sistemas hídricos e o próximo tópico elencou trabalhos sobre resiliência em sistemas de distribuição de água.

### **2.2.2 Resiliência em sistemas de distribuição de água**

Como forma de análise conceitual, Li e Lence (2007) pontuaram que o conceito de resiliência é operacionalizado para os recursos hídricos como uma medida da capacidade de recuperação do sistema. Enquanto isso, Chmielewski *et al.* (2016) caracterizaram a resiliência do sistema de infraestrutura de água como a capacidade do sistema para atender ao desempenho e as funções pretendidas da comunidade, por meio de planos e ações de prevenção, projeto e recuperação.

Para analisar a resiliência global do sistema de distribuição de água, Diao *et al.* (2016b) focaram nos modos de falha potenciais: falha de tubulação; excesso de demanda; e intrusão de substância. Enquanto isso, também analisando a resiliência por meio das falhas, Kanta e Brumbelow (2013) analisaram três tipos de falhas em um sistema de distribuição de água: (1) falha acidental de tubulações devido a interações do solo com as tubulações; (2) falha acidental devido a evento sísmico; e (3) falha intencional ou ação malévola. De forma numérica, Zhang, Feng e Qian (2009) quantificaram a resiliência em uma rede de água em função da quantidade de tolerância definida para contaminantes em relação à qualidade da água. E Yazdani e Jeffrey

(2012a) analisaram a resiliência do sistema de distribuição de água em termos de redundância e conectividade de seus componentes.

Diferentemente de algumas práticas, quando se consideram muitas vezes apenas aspectos individuais e isolados do desempenho de um sistema, Roach, Kapelan e Ledbetter (2018) constataram que várias métricas de desempenho baseadas em resiliência devem ser usadas simultaneamente para a gestão de recursos hídricos sob incerteza em um cenário de oferta e demanda. Estes autores selecionaram, analisaram e compararam métricas alternativas para diferentes aspectos da resiliência, incluindo duração, frequência e magnitude, e como forma de avaliar as métricas, analisou-se um estudo de caso no Reino Unido. No mesmo contexto de métricas, Balaei *et al.* (2018) desenvolveram um indicador de resiliência multidimensional para medir a resiliência do sistema de distribuição de água sujeito aos terremotos. E para o leitor interessado no assunto, uma ampla análise sobre resiliência em sistemas hídricos pós-terremotos pode ser vista em Davis (2014).

Para Shin *et al.* (2018) não existe uma definição de resiliência consistente e inteiramente aprovada para sistemas de água, nem uma medida exclusiva para avaliar a resiliência do sistema. Porém, diversos pesquisadores (AMARASINGHE *et al.*, 2016; CIMELLARO *et al.*, 2016; DZIEDZIC; KARNEY, 2016; JEONG; WICAKSONO; KANG, 2017) na literatura desenvolveram índices quantitativos como forma de avaliar a resiliência em sistemas de distribuição de água. No contexto da redução da precipitação de água devido às mudanças climáticas, Amarasinghe *et al.* (2016) propuseram três indicadores técnicos de resiliência para avaliar um sistema de distribuição de água sob diminuição de chuvas, sendo estes relacionados ao excesso de pressão no projeto da rede, à capacidade de serviço na rede e à relação entre pressão e capacidade de serviço. Para isso, elaboraram um modelo conceitual, identificando as correlações existentes no sistema hídrico e esse foi convertido em um modelo de simulação, na forma do diagrama de fluxo e estoque, sendo possível observar as variações das saídas dos indicadores propostos com as mudanças de parâmetros inseridas no modelo. Para combinar as dimensões social, técnica e ambiental da resiliência, Cimellaro *et al.* (2016) elaboraram um índice de resiliência como o produto de três índices, a saber: (1) número de usuários temporariamente sem água; (2) nível de água no reservatório; e (3) qualidade da água. Após isso, a aplicabilidade do índice foi testada em um estudo de caso, utilizando diferentes cenários disruptivos. Dzedzic e Karney (2016) propuseram um índice de desempenho para sistemas de distribuição de água, que enfocou a eficiência de entrega para fornecer fluxo e pressão adequada à rede. Esse índice foi baseado em quatro métricas: confiabilidade, vulnerabilidade, resiliência

e conectividade. Uma revisão sistemática para medidas de resiliência quantitativa em sistemas de infraestrutura de água é encontrada em Shin *et al.* (2018).

Como pode-se ver, os trabalhos expostos neste tópico não englobaram as três capacidades de resiliência (absorção, adaptação e recuperação) amplamente citadas na literatura acerca da resiliência, a maioria abordou métricas/indicadores, porém em contextos abrangentes, como social, ambiental, técnico, etc. No entanto, Aljadhai e Abraham (2018) desenvolveram um índice de resiliência que incorporou as três capacidades de resiliência, porém não incluíram as estimativas do custo com a recuperação do sistema. Superando essa limitação e a das outras pesquisas que não envolveram as capacidades da resiliência, esta dissertação abordou os investimentos envolvidos com o aumento das capacidades resilientes do sistema, sendo estas pouco citadas na literatura sobre resiliência dos sistemas de distribuição de água, como foi explanado através dos trabalhos citados neste tópico. Além do mais, este trabalho abordou a resiliência nesses sistemas, através de um modelo de otimização, capturando uma visão mais ampla dos sistemas de água, ao invés de indicadores, que por vezes, limitam-se a poucos parâmetros, não retratando assim, a realidade na qual estes sistemas possam estar expostos. No próximo tópico foram destacados os projetos resilientes dos sistemas de distribuição de água encontrados na literatura.

#### 2.2.2.1 Projetos resilientes dos sistemas de distribuição de água

Devido à resiliência ser um termo que emergiu ao longo dos últimos anos e o seu conceito ser multidisciplinar e inter-relacionado com outros conceitos, como visto anteriormente, algumas abordagens utilizaram a resiliência em projetos dos sistemas de distribuição de água como uma medida substituta para um projeto baseado na robustez (JUNG *et al.*, 2014) ou em medidas de confiabilidade (GHEISI; NASER, 2015; LIU *et al.*, 2017; RAAD; SINSKE; VUUREN, 2010). Por exemplo, Jung *et al.* (2014) utilizaram um índice de robustez baseado na variabilidade das pressões do sistema, e com isso, alegaram que esse projeto robusto aumenta a resiliência do sistema. Enquanto isso, Raad, Sinske e Vuuren (2010) utilizaram medidas de confiabilidade como forma de quantificar a resiliência em um problema multiobjetivo dos projetos de sistemas de distribuição de água. Dessa forma, utilizaram uma medida para resiliência da rede, em termos do excesso da capacidade ou redundância, ponderado pela uniformidade dos diâmetros do tubo de conexão dos nós. Nestes trabalhos, a resiliência foi mais vista como inter-relacionada com outros conceitos, como visto no tópico 2.1.1, deixando assim, de utilizar-se das inúmeras particularidades inerentes à resiliência que a diferenciam dos demais conceitos.

Além dos projetos resilientes terem por objetivo a determinação dos diâmetros das tubulações e adição e/ou substituição de componentes para que o material seja resiliente, os projetos resilientes em sistemas de distribuição de água englobam diferentes abordagens, como localização de sensores (COMBOUL; GHANEM, 2013) e reservatórios de água (ZHANG et al., 2017). O problema da localização de sensores para Comboul e Ghanem (2013), objetivou encontrar os locais dos dispositivos de monitoramento que melhorassem a qualidade da água e fosse resiliente no sentido de proteger os consumidores contra acidentes e intrusões de contaminantes. Em contrapartida, Zhang *et al.* (2017) modelaram um problema multiobjetivo para projeto de reservatórios considerando as relações entre confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, sendo os objetivos da resiliência relacionados aos tempos médio e máximo de recuperação. Com isso, englobou a resiliência apenas em relação ao tempo de recuperação (capacidade de recuperação), sem consideração da adaptação do sistema (capacidade de adaptação) ou absorção do impacto (capacidade de absorção).

Índices para resiliência são frequentemente usados como funções-objetivo dos problemas de otimização para projetos resilientes dos sistemas de distribuição de água. Um dos trabalhos mais citados na literatura que utilizaram um índice de resiliência para o projeto dos sistemas de distribuição de água é o de Todini (2000), que formulou um problema multiobjetivo com custo e resiliência, e seu índice de resiliência foi baseado no conceito de energia excedente, destinando-se a medir a capacidade ociosa de uma rede de distribuição de água, que pode ser usada no caso do aumento da demanda e/ou falha do sistema. Assim, um aumento na resiliência indica um incremento na energia redundante dentro do sistema. E, utilizando essa métrica de Todini (2000), outros autores (BASUPI; KAPELAN, 2015; FU; KAPELAN; REED, 2012) também projetaram sua infraestrutura hídrica resiliente. Basupi e Kapelan (2015) modelaram um projeto multiobjetivo com as intervenções de projeto sendo as variáveis de decisão, como duplicação e/ou substituição de tubos, adição de tanques e bombas, e valores limiares para demanda, sujeitos a restrições hidráulicas. Reza *et al.* (2008) utilizaram o índice de resiliência sem a consideração das bombas para seu projeto resiliente. Posteriormente, Prasad e Park (2004) revisaram o índice de Todini (2000) e incorporaram o efeito da uniformidade dos diâmetros dos tubos conectados aos nós. Outros autores (CHOI et al., 2017; VASAN; SIMONOVIC, 2010) também aplicaram este índice modificado em suas pesquisas.

Farahmandfar, Piratla e Andrus (2017) apresentaram um índice de resiliência baseado na dimensão do risco, estimativa de recuperação da tubulação e topologia da rede, onde esse índice pode ser utilizado em um modelo de otimização com variáveis de decisão relativas às tubulações e sujeitas às restrições orçamentárias. Demais autores (BI; DANDY; MAIER, 2016;

CHOI et al., 2017) também modelaram o seu problema resiliente através de um índice ou equação para a resiliência, em termos de medidas como pressão, demanda, altura e diâmetro do tubo, sendo o modelo sujeito às restrições hidráulicas e limites de velocidade, pressão, etc. No entanto, as métricas de resiliência geralmente não incluem a dimensão de tempo, porque se negligencia a recuperação do sistema a partir da ocorrência dos eventos (FRANCIS; BEKERA, 2014). Superando essa limitação e outras, de apenas retratar a resiliência através de um índice, esta pesquisa englobou a dimensão do tempo de recuperação no modelo proposto, sendo este um importante fator para representar a resiliência, através da velocidade de recuperação do sistema para os seus níveis nominais de serviço. Além do mais, os trabalhos citados neste tópico englobaram a resiliência em relação aos projetos hidráulicos/técnicos dos materiais e componentes da rede, sem consideração das demais possibilidades para o abastecimento de água à população, o que este estudo abordou no modelo proposto. Ademais, um projeto baseado apenas em um índice de resiliência pode-se levar à avaliação apenas de níveis relativos da resiliência para fins comparativos, não refletindo, contudo, a capacidade resiliente do sistema como um todo, deixando de incorporar aspectos fundamentais que agregam valor para a resiliência do sistema em análise e, à vista disto, este estudo incorporou as capacidades resilientes na análise do sistema de distribuição de água, que foram pouco citadas na literatura desses sistemas.

Para o projeto do sistema de distribuição de água sujeitos a interrupções são necessárias informações acerca dos eventos disruptivos que possam acontecer nestes sistemas. Logo, o próximo tópico concentrou-se nessas considerações.

### 2.2.3 *Delimitação dos eventos*

A maioria dos modelos de interrupções dos sistemas de água consideraram danos rotineiros aos componentes do sistema (por exemplo, efeitos ambientais de longo prazo, materiais envelhecidos ou falhas mecânicas periódicas), em oposição aos eventos do risco de ruptura (CHMIELEWSKI et al., 2016). Embora isso seja necessário para quantificar a importância dos elementos isolados do sistema, não enfatizaram o risco inerente às demais interrupções às quais o sistema está sujeito, e devido à variedade de componentes, os sistemas de água são vulneráveis a vários eventos. Superando isso, este estudo englobou a possibilidade de diferentes eventos para o sistema de distribuição de água. Os eventos disruptivos destacam a necessidade de um projeto inovador dos sistemas de infraestrutura, cujo desempenho possa ser restaurado em tempo hábil após a interrupção (ZHANG et al., 2018), pois se nenhum esforço

de recuperação for feito após a interrupção, a perda de desempenho do sistema pode ser elevada (VUGRIN; WARRE; EHLEN, 2011).

Prevenir e se preparar para algo que é inesperado é quase impossível, pois ninguém sabe quando ou como uma crise ocorrerá ou o que seria afetado pela crise (LABAKA; HERNANTES; SARRIEGI, 2016). Dessa forma, este trabalho utilizou cenários associados às probabilidades para ocorrência dos eventos disruptivos, em que a avaliação da resiliência é comumente realizada para avaliar o desempenho de um sistema em cenários específicos para os quais as abordagens de modelagem possam ser usadas (AMARASINGHE et al., 2016). Esses cenários são baseados nas possíveis ameaças às quais o sistema está sujeito, uma vez que falhas direcionadas são usadas para enriquecer a amostra aleatória e reduzir o potencial de falta dos cenários críticos (DIAO et al, 2016b).

Como causadores de interrupções, vários autores (ALJADHAI; ABRAHAM, 2018; BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ; ROCCO, 2013; BAROUD et al., 2014; BERARDI et al., 2014; DINH et al., 2012; GAY; SINHA, 2012; HAMILTON, 2009; HERNANDEZ; ORMSBEE, 2017; KANTA; BRUMBELOW, 2013) destacaram três tipos principais de eventos disruptivos em sistemas de distribuição de água: (1) falha aleatória, (2) atos humanos intencionais e, (3) desastres naturais, como furacões, tornados e terremotos. A forma de modelagem desses eventos pode ser vista a seguir:

- 1) falha aleatória: pode ser desenvolvida aleatoriamente usando padrões de falha de ativos de acordo com o tipo de interrupção e distribuições de probabilidades específicas (GAY; SINHA, 2012). Atkinson *et al.* (2016) e Zhuang, Lansey e Kang (2013) modelaram também, estes eventos, através das falhas dos componentes. E Aljadhai e Abraham (2018) acrescentaram a utilização de uma fração fixa de componentes inicialmente com falha;
- 2) atos humanos intencionais: podem ser modelados pela falha de um número específico de nós mais críticos na rede (como um cenário de pior caso) ou pela falha de nós com maior grau entrópico (nós com mais ligações na rede) (ALJADHAI; ABRAHAM, 2018). Tran *et al.* (2017) modelaram também essa ameaça por meio de graus. Enquanto isso, Yazdani e Jeffrey (2012b) ajustaram o grau entrópico à demanda que flui por essas ligações. E Yazdani e Jeffrey (2011) relataram que uma maneira de identificar os locais críticos na rede é detectando os conjuntos de corte, ou seja, os conjuntos de componentes cuja remoção resulta em desconexão;

- 3) desastres naturais, como furacões, tornados e terremotos: Gay e Sinha (2012) atribuíram probabilidades de falha para todos os ativos, de acordo com fatores de risco específicos, dependendo do tipo de evento perturbador considerado. Aljadhai e Abraham (2018) e Kanta e Brumbelow (2013) citaram o uso das curvas de fragilidade usando dados de danos das tubulações disponíveis dos terremotos históricos.

O próximo tópico elencou os métodos de otimização utilizados na literatura para projetos de distribuição de água, bem como, fez alusão ao método utilizado nesta pesquisa.

#### 2.2.4 *Métodos de otimização*

A exploração das abordagens de soluções eficientes em projetos de sistemas hídricos variam na literatura, mas nos últimos anos foram principalmente abordagens heurísticas (BI; DANDY; MAIER, 2016; RECA et al., 2008; TODINI, 2000), incluindo algoritmos genéticos (BASUPI; KAPELAN, 2015;) e evolução diferencial (RAAD; SINSKE; VUUREN, 2010; VASAN; SIMONOVIC, 2010). Isso se deveu ao fato da utilização de equações não-lineares que governam o sistema hidráulico, uma vez que os projetos desses sistemas tiveram por maior foco a resiliência hidráulica da rede, e com isso, as abordagens heurísticas são implementadas para lidar com essa intratabilidade de problemas em grande escala e NP-difíceis.

Porém, nas últimas décadas, a fim de contornar esse problema das equações não-lineares, vários estudos foram realizados no campo do projeto e planejamento dos sistemas de distribuição de água, incluindo uma variedade dos modelos de otimização matemática usando métodos de programação linear (GHELICHI; TAJIK; PISHVAEE, 2018; PRICE; OSTFELD, 2013; PRICE; OSTFELD, 2016; SAMANI; ZANGANEH, 2010). Samani e Zanganeh (2010) projetaram um sistema de distribuição de água por meio de programação linear inteira mista. Para isso, como forma de evitar as restrições hidráulicas não lineares de sistemas hídricos (relativas ao fluxo e pressões dos nós), estas foram convertidas em restrições lineares por meio da utilização de valores máximos e mínimos para a variável de decisão. Com isso intercalaram a execução do modelo linear com a do solucionador hidráulico para determinação das demais equações hidráulicas. Enquanto isso, Price e Ostfeld (2013) apresentaram uma metodologia baseada em programação linear interativa para linearização das equações não lineares do sistema de distribuição de água. Dessa forma, a solução gradualmente convergiu para o resultado de uma equação não-linear e o processo interativo foi encerrado quando uma aproximação satisfatória foi alcançada. E também utilizando a programação linear interativa, Price e Ostfeld (2016) modelaram um sistema de distribuição de água com o objetivo de dimensionar a tubulação, planejar o custo mínimo para bombas e minimizar o vazamento da

água, mantendo as pressões de serviço para os consumidores. Para resolver esse problema, os autores executaram duas vezes o modelo, uma primeira vez para determinar os diâmetros dos tubos equivalentes, e uma segunda vez para determinar a programação ótima das bombas, minimizando o vazamento da água. Dessa forma, o modelo foi resolvido (primeira e segunda execução) várias vezes, com diferentes tamanhos das bombas e volumes de água. Apesar destes trabalhos utilizarem a programação linear, tornam-se dispendiosos em relação ao tempo, uma vez que demandam diversas execuções. Por este motivo, e pelo fato de análises hidráulicas/técnicas da rede de água não serem o foco desta dissertação, mas sim, a otimização dos investimentos em capacidades resilientes, utilizou-se neste estudo, a programação linear inteira mista sem a consideração hidráulica/técnica da rede. Segundo Taha (2008), um modelo de programação linear, como qualquer modelo de pesquisa operacional, tem três componentes básicos:

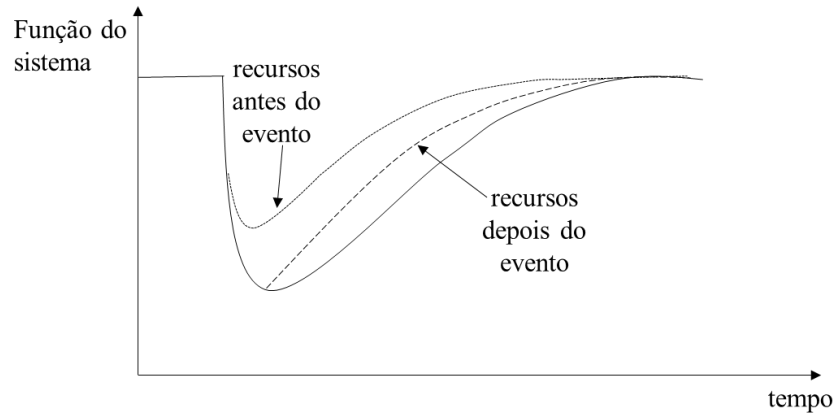
1. Variáveis de decisão, que se procuram determinar;
2. Objetivo, que se precisa otimizar (maximizar ou minimizar);
3. Restrições, que a solução deve satisfazer.

Hillier (2006) denominou a programação linear inteira mista como um modelo de programação linear, onde apenas algumas variáveis têm valores inteiros (podendo ser binárias ou não) e as demais são contínuas. Além disso, este estudo possuiu uma estrutura de otimização estocástica de dois estágios, referentes aos investimentos em capacidades de resiliência pré-evento (antes da ocorrência do evento disruptivo) e pós-evento (depois da ocorrência do evento), no qual os investimentos pós-evento estão associados às probabilidades de ocorrência da interrupção. Esses dois estágios da resiliência são melhor compreendidos pela Figura 1, na qual McDaniels *et al.* (2008) forneceram uma ilustração das propriedades da resiliência, onde a resiliência é medida com referência a algum nível de desempenho do sistema, sendo representada pela linha contínua na referida figura, na qual a linha horizontal mostra a operação estável do sistema. Porém, em determinado momento, essa operação sofre uma interrupção e passa para um nível de desempenho diferente do anterior. Com o tempo, após a interrupção, o sistema recupera algum nível de estabilidade ou equilíbrio. A figura ilustra que o nível de desempenho do sistema pode ser melhorado tanto pelos recursos antes do evento (representados pela linha pontilhada na Figura 1), que diminuem o impacto no sistema, quanto pelos recursos depois do evento (representados pela linha tracejada na Figura 1), que aumentam a velocidade de recuperação do sistema. Por isso, é importante a distinção e utilização desses dois tipos de recursos para resiliência, que podem ocorrer antes ou depois da interrupção. Sendo assim, esta



dissertação utilizou esses recursos na forma de investimentos que aumentem a resiliência inerente ao sistema.

*Figura 1 - Propriedades da resiliência*



*Fonte: Adaptado de McDaniels et al. (2008)*

Para retratar o estágio pós-evento no sistema é utilizada uma visão mais realista do seu desempenho, obtida através de uma análise estocástica, sendo esta, aplicada aos sistemas de distribuição de água em vários estudos, como: incerteza da demanda (COMBOUL; GHANEM, 2013), incerteza da pressão (JUNG et al., 2014) e precipitação (GHELICHI; TAJIK; PISHVAEE, 2018). Para este estudo foi considerada uma análise estocástica em relação aos cenários dos eventos disruptivos na rede de distribuição de água, retratando assim, as diversas possibilidades da ocorrência de eventos disruptivos na qual a rede possa estar exposta, e expandindo assim, a literatura em relação à utilização de cenários disruptivos nesse sistema. O próximo subcapítulo detalhou e explicou as capacidades resilientes abordadas neste estudo.

### **2.3 Capacidades resilientes**

Soni e Jain (2011) relataram que para aumentar a resiliência de um sistema são necessárias capacidades dinâmicas que possam conter interrupções e também gerar vantagem competitiva em tempos normais de operação. Francis e Bekera (2014) enfatizaram que a abordagem da resiliência inclui uma avaliação da capacidade do sistema para (i) antecipar e absorver possíveis rupturas, (ii) desenvolver meios adaptativos para acomodar mudanças dentro ou ao redor do sistema, e (iii) estabelecer comportamentos de resposta destinados a construir uma capacidade para resistir à ruptura ou recuperar o mais rapidamente possível após o impacto. Vugrin, Warren e Ehlen (2011) enumeraram as capacidades de absorção, adaptação e restauração como as três capacidades fundamentais de um sistema para determinar a sua resiliência, e denotar que estas capacidades são afetadas por recursos de aprimoramento da

resiliência, e identificar esses recursos permite uma melhor compreensão das características fundamentais que contribuem para a resiliência. Assim, a delimitação dessas capacidades pode ser vista a seguir:

*Capacidade de absorção* - Magnitude da perturbação que pode ser absorvida sem mudar para um estado alternativo (DAVIDSON et al., 2016; WANG; BLACKMORE, 2009), ou seja, é a capacidade do sistema para absorver e/ou minimizar as consequências do choque com uma quantidade de esforço aceitável (VUGRIN; WARREN; EHLEN, 2011). A absorção é responsável pela capacidade do sistema para absorver os efeitos de uma ruptura (TRAN et al., 2017). A modernização da infraestrutura do sistema de água e redundância das tubulações são exemplos de atividades que aumentam essa capacidade (BALAEI et al., 2018), bem como o armazenamento de capacidade extra (FRANCIS; BEKERA, 2014; VUGRIN; WARREN; EHLEN, 2011). Para avaliar esse recurso, o limite de funcionalidade precisa ser definido primeiro, e está relacionado ao nível mínimo aceitável ou ao estado normal da funcionalidade do sistema (SHIN et al., 2018).

*Capacidade de adaptação* - A capacidade adaptativa é definida como a capacidade do sistema de se ajustar às consequências indesejáveis do choque externo, e começar a funcionar imediatamente após o desastre durante as atividades de resposta e restauração (BALAEI et al., 2018). Esse tipo de resiliência representa a capacidade do sistema para manter um estado dinamicamente estável, que permita a continuidade da operação após um acidente ou na presença de um estresse contínuo (WANG et al., 2009). Blackmore e Plant (2008) citaram a redundância e a conectividade como os possíveis parâmetros para descrever a capacidade adaptativa. Em relação à conectividade, Farahmandfar, Piratla e Andrus (2017) disseram que uma rede altamente em *looping* terá um desempenho melhor quando um ou mais de seus componentes falharem em comparação com uma rede ramificada, devido ao maior número dos caminhos alternativos entre os nós de origem e de demanda, e quanto à redundância, caracteriza-se como a capacidade do sistema para compensar a perda de um componente atribuível à falha. Para Shin *et al.* (2018), a redundância do sistema foi considerada como um requisito para avaliar a capacidade adaptativa, onde um sistema com mais redundância pode minimizar o dano causado pela alteração de eventos prejudiciais, pela substituição parcial ou completa dos componentes do sistema com falha, e manter as funcionalidades do sistema dentro de níveis aceitáveis durante um período mais longo. Matthews (2016) assegurou que a redundância em um sistema de distribuição de água é essencial para a funcionalidade do sistema, durante e após um desastre, e sua principal função é garantir que o serviço seguro de água não seja interrompido quando uma tubulação falhar. Nessa mesma visão, Todini (2000)

disse que a redundância ajuda a garantir que haja capacidade suficiente no sistema para permitir a superação de falhas locais e garantir a distribuição de água para os usuários. Yazdani e Jeffrey (2011) complementaram que a redundância em sistemas de distribuição de água pode ser vista como a existência de caminhos alternativos de distribuição.

*Capacidade de recuperação* - A principal preocupação nessa capacidade é minimizar as perdas econômicas e de sistema após o choque, por meio de uma resposta apropriada e rápida, e promover a pronta recuperação da comunidade afetada para um estado viável (WANG et al., 2009). Para Davidson *et al.* (2016), significa a suposição de que os sistemas retornarão ao estado estável anterior após a perturbação. De forma objetiva, Wang e Blackmore (2009) definiram-na como a velocidade ou taxa de recuperação do sistema após perturbações, onde essa foi descrita pela rapidez de retorno do sistema para um nível aceitável de manutenção. A capacidade de recuperação pode se manifestar após uma interrupção da rede durante o tempo necessário para recuperar a funcionalidade do componente da rede (BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ; ROCCO, 2013) e, assim como a capacidade adaptativa, é formada antes do desastre por meio das atividades de preparação, e será ativada durante o tempo de recuperação (BALAEI et al., 2018). Essa capacidade deve ser avaliada em relação a um conjunto definido dos requisitos derivados do nível desejável de serviço ou controle (FRANCIS; BEKERA, 2014). Consequentemente, a identificação rápida de falhas do sistema e a rápida recuperação são consideradas como requisitos das medidas de resiliência para avaliar esta capacidade (SHIN et al., 2018).

No que se refere às relações entre as capacidades, Balaei *et al.* (2018) explicaram que quando a capacidade de absorção é excedida, a capacidade adaptativa atua para minimizar as consequências adversas do evento, e o fator de rapidez da recuperação pode variar de baixo para alto, dependendo das capacidades de resiliência (ver Quadro 3): se a capacidade de absorção não for excedida, uma recuperação muito rápida ocorrerá sem perder o nível de serviço (1º caso do Quadro 3); porém, se a capacidade de absorção for excedida, mas a capacidade adaptativa não, espera-se uma recuperação de médio prazo (2º caso do Quadro 3); e se as capacidades de absorção e adaptação forem ambas ultrapassadas, a recuperação será longa (3º caso do Quadro 3).

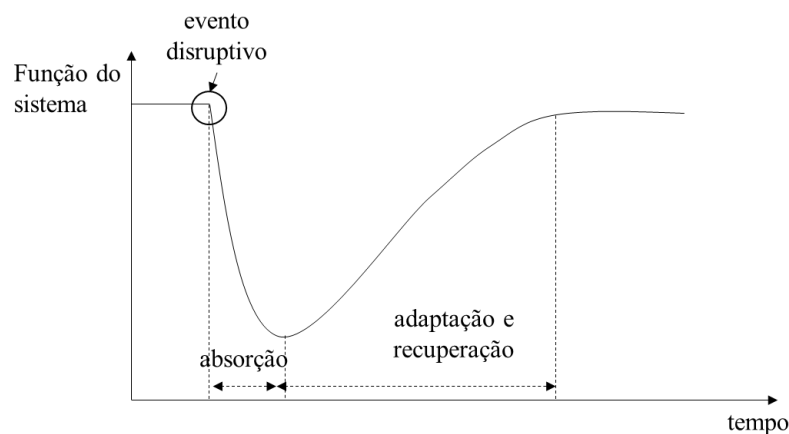
*Quadro 3 - Relação entre as capacidades de resiliência*

	<b>Absorção</b>	<b>Adaptação</b>	<b>Recuperação</b>
<b>1º caso</b>	<i>Não excedida</i>	<i>Não excedida</i>	<i>Curto prazo</i>
<b>2º caso</b>	<i>Excedida</i>	<i>Não excedida</i>	<i>Médio prazo</i>
<b>3º caso</b>	<i>Excedida</i>	<i>Excedida</i>	<i>Longo prazo</i>

*Fonte: Adaptado de Balaei et al. (2018)*

Butler *et al.* (2016) resumiram que, essencialmente, as ameaças resultam em falhas do sistema, se as medidas de absorção forem insuficientes; que falhas do sistema resultam em impactos, se as medidas de adaptação forem insuficientes; e os impactos resultam em consequências, se as medidas de recuperação forem insuficientes. Outros autores (ALJADHAI; ABRAHAM, 2018; CUTTER *et al.*, 2008; FRANCIS; BEKERA, 2014) também pontuaram essa inter-relação entre as capacidades resilientes. Nan e Sansavini (2017) demonstraram na Figura 2, o efeito das capacidades resilientes na ocorrência de um evento disruptivo. Na qual é possível observar que a capacidade de absorção atua num primeiro momento, influenciando o nível de impacto do sistema e, após isto, a capacidade de adaptação e recuperação são responsáveis pelo reestabelecimento aos níveis nominais do sistema, na forma de velocidade de recuperação. Fazendo uma análise com relação à Figura 1, vê-se que a capacidade de absorção associa-se aos recursos alocados para serem usados antes da ocorrência do evento, de forma que se reduza o impacto sistêmico, e as capacidades de adaptação e recuperação, em determinados sistemas, associam-se aos recursos realizados depois do evento, de forma a diminuir o tempo de recuperação do sistema e restabelecê-lo aos seus níveis nominais.

Figura 2 - Capacidades resilientes



Fonte: Adaptado de Nan e Sansavini (2017)

As capacidades da resiliência são fundamentais para a construção do modelo proposto neste estudo. Na literatura para projetos resilientes dos sistemas de distribuição de água, essas capacidades são pouco encontradas e, quando existem, foram representadas na forma de índice, limitando a sua especificidade para o sistema em análise. No capítulo seguinte foi formulado o modelo proposto, através da literatura estudada e de embasamento confirmado com o estudo de caso realizado.

### **3 FORMULAÇÃO DO MODELO**

Com o reconhecimento das contribuições dos modelos existentes na literatura e suas limitações no contexto da resiliência e dos sistemas de distribuição de água, neste capítulo foi proposto um modelo para o projeto dos sistemas de distribuição de água sujeito aos eventos perturbadores. Este modelo foi formulado para apresentar de que forma investimentos podem ser aplicados para aumentar as capacidades resilientes do sistema em estudo, que é teoricamente fundamentado e que pode ser prontamente aplicado para resolver problemas reais. Nos subcapítulos seguintes foram descritos o estudo de caso, o sistema em análise, as suposições do modelo e as explicações para cada equação.

#### **3.1 Estudo de caso**

Como forma de analisar e ampliar a compreensão sobre as necessidades de um sistema de distribuição de água real, foi realizado um estudo de caso em uma empresa de água, nome fictício *Companhia das Águas*. A empresa está presente em mais de 170 municípios de um estado brasileiro, localizado na região Nordeste, e para este estudo foi visitada a unidade em um desses municípios, em que abastece mais de 300.000 habitantes. A pesquisadora se fez presente na companhia em estudo para entrevista no mês de outubro de 2018, com duração aproximadamente de 30 minutos, e o gerente de produção da companhia explicou o funcionamento geral da mesma, desde a coleta de água, passando pelo tratamento, até a distribuição para a população. Como o gerente de produção não possuía disponibilidade de tempo para a aplicação do questionário (ver Apêndice A), este foi enviado via *e-mail* para posterior resposta, onde nele foram elucidados os principais assuntos acerca desta pesquisa para o desenvolvimento do modelo proposto e sua análise consta no próximo tópico.

##### **3.1.1 Análise do questionário**

Como citado anteriormente, o questionário com pontos importantes acerca da resiliência e da proposta deste estudo foi enviado via *e-mail* para o gerente de produção da companhia, e o *e-mail* foi respondido em novembro de 2018. O questionário (ver Apêndice A) foi dividido em quatro blocos, que correspondem aos principais levantamentos considerados por essa pesquisa sobre as necessidades das capacidades resilientes e informações relevantes para a construção do modelo proposto. Com isso as principais análises extraídas das 21 perguntas elaboradas dos quatro blocos principais constam a seguir:

1. *Interrupção do fluxo de água:* este bloco abordou os principais questionamentos acerca da ocorrência de interrupções nas tubulações, impedindo assim, o fluxo de água até os pontos de demanda. Na Companhia das Águas, em relação a tubulações, o principal tipo de evento que possa ocorrer é o aleatório, porém ato intencional ocorreu com a finalidade de furtos, enquanto não há registro de desastre natural que ocasionasse interrupção na rede. Relativo aos reservatórios, vazamentos caracterizam o principal problema que possa interromper o fluxo de água;
2. *Falhas em tubos e reservatórios:* abordaram-se questões relativas aos procedimentos na ocorrência de falhas, na qual é necessário a interrupção do fluxo de água e fechamento de válvulas. A Companhia das Águas também informou que as tubulações podem falhar simultaneamente, porém não há um monitoramento de quantas vezes ocorreram. Foi relatado que diferentes falhas nas tubulações têm diferentes tempos de conserto, pois depende da extensão do problema. Quanto as equipes de conserto para tubulações e reservatórios, estas são constituídas geralmente por um profissional e dois ajudantes, porém dependendo da gravidade do dano é necessário o apoio de máquinas. Onde ao se aumentar o número de máquinas, são necessários mais operadores na equipe;
3. *Ações para evitar interrupção do fluxo de água:* relativo as ações nas quais a empresa realiza investimentos como forma de evitar a interrupção no fluxo de água, a Companhia das Águas relatou que para o sistema de distribuição de água pode ser necessário o aumento da capacidade dos reservatórios e também já utilizou caminhões-pipa na ocorrência de interrupção via tubulação. No que diz respeito a tubulações redundantes, a companhia citou que geralmente não tem. Quanto à possibilidade de comprar água de outra região, não é necessário, pois se tem outorga do País para explorar as suas águas, sendo limitada pela regulação ambiental. E os recursos (dinheiro) para se investir nessas ações provem de capital próprio da companhia, verbas do País e/ou linhas de financiamento, sendo as prioridades para investimentos estabelecidas em nível de diretoria. A Companhia das Águas considera importante o investimento em ações que possam evitar a interrupção do fluxo de água para a população, porque água é um direito básico e inalienável da população e a sua ausência é sinônimo de problema para a saúde pública;
4. *Instalações essenciais:* a Companhia das Águas afirmou que existem instalações (ex.: indústrias, hospitais, etc.) que possuem prioridade no atendimento, e estas instalações repassam a sua necessidade diária para que a Companhia avalie tecnicamente as alternativas para abastecimento a atingimento das metas. Estas instalações geralmente

têm contratos de demanda, e a questão de multas é estipulada mediante assinatura do contrato. Quanto ao abastecimento para bombeiros, estes são prioritários também e os hidrantes da cidade tem que estar constantemente abastecidos, caso haja necessidade de caminhão-pipa, a companhia também precisa disponibilizar a água.

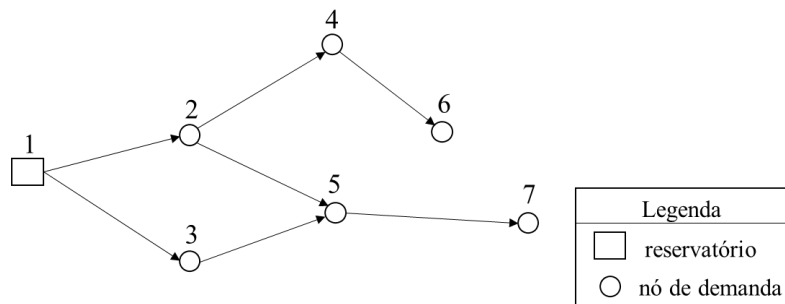
Com isso, esse questionário contribuiu para a comprovação do modelo proposto, juntamente com as informações da literatura que serviram de fundamentação. O próximo subcapítulo delimita o sistema em estudo para entendimento do modelo.

### 3.2 Delimitando o sistema

Como o objetivo da resiliência é a continuidade da função normal do sistema, é necessário identificar qual a função do sistema estudado. Como garantiu Ganin *et al.* (2016), a avaliação da resiliência deve, portanto, identificar a funcionalidade crítica de um sistema e avaliar o perfil temporal da recuperação do sistema em resposta aos eventos adversos. Com isso, para avaliar a funcionalidade do sistema de distribuição de água são necessárias as definições da função do sistema. Na literatura encontraram-se diversas funções para o sistema, como visto no capítulo anterior, como o atendimento à demanda, manter as pressões do sistema e garantir níveis de qualidade aceitáveis para a água. Como esta dissertação considerou o atendimento à demanda de água como a função crítica do sistema e o objetivo desta pesquisa não envolveu estudos hidráulicos e nem de contaminantes do sistema, ao longo deste trabalho foi modelado o sistema de distribuição de água com a função de garantir o acesso à água para os consumidores que dela são abastecidos.

Uma rede de distribuição de água pode ser representada como um grafo de  $G(N, A)$  com um conjunto de nós  $N$  conectados por arestas  $A$  (GANIN et al., 2016; PALLETI et al, 2018; YAZDANI; JEFFREY, 2011). Para uma melhor compreensão do problema, uma representação esquemática do grafo da rede é mostrada na Figura 3, onde um nó é representado como um ponto de fornecimento de água, como reservatórios, ou um ponto de demanda de água, que pode ser uma residência, uma instalação industrial, hospital, ou demais pontos que requeiram demanda por água (na figura, os nós estão representados pelos pontos de 1 à 7), e uma aresta representa uma tubulação ou simplesmente um tubo entre os nós que são definidas por  $(i, j)$  na forma de arco, onde os sobrescritos distinguem os nós uns dos outros, e uma seta entre os nós representa uma aresta na figura e a direção do fluxo da demanda.

Figura 3 - Grafo da rede de distribuição de água



Este trabalho não visou considerar todas as possíveis eventualidades de uma rede de distribuição de água, como exemplo: estações de bombeamento, poços, etc. Nesta dissertação enfocou-se nos reservatórios e nos pontos de consumo. A declaração do problema estudado constou no próximo subcapítulo.

### 3.3 Declaração do problema

Como visto anteriormente, uma rede de distribuição de água pode ser caracterizada como um grafo de rede com nós (isto é, locais de fornecimento ou demanda) e arestas de ligação (isto é, tubulações). Uma ou mais falhas em um desses nós de fornecimento e/ou arestas de ligação podem causar danos elevados ao sistema, onde Kim, Chen e Linderman (2015) citaram que na ocorrência de uma interrupção no nó/arco é como se removesse o mesmo do grafo da rede, ou seja, o nó ou o arco torna-se inoperante e a demanda não flui mais pelo nó ou ao longo do arco. Dessa forma, motivado pelas deficiências da literatura quanto ao desenvolvimento de modelos de otimização para investimentos em resiliência dos projetos das redes de distribuição de água, o presente estudo analisou esse sistema sujeito a um número conhecido de tubulações e/ou reservatórios que possam ficar completamente inoperáveis devido a um evento perturbador.

Para este trabalho foram consideradas interrupções nos nós de fornecimento e/ou arestas entre todos os nós da rede considerada, caracterizando um cenário com falha. Um cenário com falha refere-se ao caso em que há pelo menos um nó com falha no sistema, ou seja, que não pode atingir o nível de serviço prescrito e a água fornecida não pode atender à demanda (LIU et al., 2017). O modelo apresentado procurou encontrar a solução mais econômica para o projeto de uma rede de distribuição de água, em que o principal objetivo foi minimizar os custos em investimentos tendo em vista as capacidades resilientes (absorção, adaptação e recuperação) da rede, de modo que a demanda por água seja atendida. Além disso, uma programação



estocástica baseada em cenários (isto é, um conjunto de possíveis condições futuras que possam ocorrer) foi empregada para lidar com as incertezas das interrupções do fluxo de água.

Depois de declarado o problema em estudo, o próximo subcapítulo delineou as suposições admitidas para a construção do modelo proposto.

### 3.4 Suposições do modelo

As suposições assumidas para esta pesquisa foram:

- *layout* da rede é pré-definido e conhecido;
- fluxo de água é unidirecional;
- capacidade máxima das tubulações é conhecida;
- não há aumento e/ou diminuição dos nós de demanda na rede;
- o evento adverso acontece no tempo  $t=0$ ;
- o tempo é considerado discreto e finito;
- apenas tubulações do *layout* pré-definido são atingidas pelo evento adverso;
- questões hidráulicas e técnicas não são consideradas, como: pressão, velocidade, perda de carga, bombeamento e suas variantes (como exemplo, custo de energia), escolha e/ou substituição do tamanho de tubulações e materiais;
- não ocorrem eventos adversos depois do tempo  $t=0$ ;
- as operações de reparo são iniciadas no tempo  $t=0$ ;
- não ocorrem falhas nos nós de demanda;
- é determinado um tempo máximo para recuperação sem incorrer em custos;
- clientes prioritários (ex.: hospitais, indústrias, bombeiros, etc.) e clientes não prioritários (ex.: residências comuns, estabelecimentos que não necessitam de prioridade no atendimento, etc.) possuem um tempo mínimo para início do fornecimento mínimo de água estabelecido para cada tipo de cliente;
- não são consideradas muitas diferentes entre clientes prioritários;
- a demanda requerida é considerada igual à demanda fornecida durante a operação normal da rede;
- não há consideração da ordem de reparo das tubulações e reservatórios;
- os recursos utilizados para recuperar as tubulações diferem dos reservatórios;
- os tubos são tratados com criticidade semelhante, ou seja, não são consideradas diferenciações de tubos pela região a que pertencem;

- a interrupção dos reservatórios é ocasionada por meio de vazamentos, que foi uma das formas de interrupções citadas pela Companhia das Águas;
- não há consideração de falta de água para abastecer os reservatórios;
- consideram-se válvulas para fechamento das tubulações como forma de melhor se determinar o fluxo de água vindo das tubulações, pois no caso de tubulações redundantes, ao não considerar o fechamento de tubos, pode-se vir fluxo de água de duas tubulações e a restrição que calcula o fluxo de água considerar, erroneamente, apenas uma tubulação ativa, pois as duas tubulações possuem os mesmos índices. As válvulas são utilizadas apenas para essa finalidade descrita de abertura/fechamento, não havendo considerações técnicas/hidráulicas, nem de falhas sobre as mesmas.

Isto posto, a construção do modelo constou no próximo subcapítulo.

### 3.5 Construção do modelo

Para esta dissertação foram adaptados os modelos de Turnquist e Vugrin (2013), Cunha *et al.* (2016) e Moura *et al.* (2017), apresentados no capítulo 2. As capacidades de resiliência são retratadas no modelo através dos seguintes recursos: capacidade adicional para reservatórios e tubulações (capacidade de absorção); tubulações adicionais, transporte alternativo e compra de água (capacidade de adaptação); e aumento das taxas de recuperação dos reservatórios e tubulações (capacidade de recuperação). Para o entendimento do modelo é necessária a definição de notações, parâmetros e variáveis, que foram descritos a seguir com a sua unidade de medida correspondente, quando necessária:

#### Índices e conjuntos:

- $N$  conjunto de todos os nós da rede de água (fornecimento e demanda),  $k \in N$ ,  $i \in N$ ;
- $N_j$  conjunto dos nós de fornecimento (reservatórios),  $N_j \subset N$ ,  $j \in N_j$ ;
- $N_n$  conjunto de todos os nós de demanda (residências, hospitais, indústrias, etc.),  $N_n \subset N$ ,  $n \in N_n$ ,  $m \in N_n$ ;
- $N_p$  conjunto dos nós críticos, que necessitam de atendimento prioritário (hospitais, indústrias, bombeiros, etc.),  $N_p \subset N$ ,  $p \in N_p$ ;
- $N_s$  conjunto dos nós de demanda sem atendimento prioritário,  $N_s \subset N$ ,  $s \in N_s$ ;
- $G$  conjunto das gravidades dos eventos disruptivos  $gr$ ,  $gr \in G$ ;
- $T$  conjunto dos intervalos de tempo  $t$ ,  $t \in T$ ;

$C$  conjunto dos cenários  $c$ ,  $c \in C$ .

**Parâmetros técnicos:**

- $L_{ki}$  ligações definidas entre os nós  $k$  e  $i$  da rede de água  $\{0,1\}$ , onde 1 indica que existe uma ligação no *layout* da rede, e 0 indica a ausência;
- $E_{kic}$  ocorrência de algum evento disruptivo na linha de tubulação da rede entre os nós  $k$  e  $i$  no cenário  $c$   $\{0,1\}$ , onde 0 indica a ausência de evento disruptivo, e 1 indica a ocorrência do evento disruptivo, em que esse evento ocasiona a total interrupção da linha de tubulação;
- $Pr_{jc}$  porção do reservatório  $j$  afetada pela ocorrência de algum evento disruptivo na rede  $[0,1]$ ;
- $tx_{lg}$  taxa de recuperação normal das linhas de tubulação, dependente da ocorrência do evento disruptivo  $g$  (linhas/tempo);
- $tx_{rg}$  taxa de recuperação normal dos reservatórios, dependente da ocorrência do evento disruptivo  $g$  (volume/tempo);
- $l_g$  taxa de recuperação máxima da linha de tubulação na ocorrência do evento disruptivo  $g$  (linhas/tempo);
- $w_g$  taxa de recuperação máxima dos reservatórios na ocorrência do evento disruptivo  $g$  (volume/tempo);
- $g$  gravidade do evento disruptivo;
- $Q_{nt}$  demanda do cliente  $n$  no período de tempo  $t$  (volume);
- $Ci_{jt}$  capacidade inicial do reservatório  $j$  no tempo  $t$  (volume);
- $cl_{ki}$  comprimento da linha de tubulação entre os nós  $k$  e  $i$  (distância);
- $ts$  tempo permitido sem determinação de nível mínimo para fornecimento de água, para clientes que não são prioritários (tempo);
- $tp$  tempo permitido sem determinação de nível mínimo fornecimento de água, para clientes prioritários (tempo);
- $tr$  tempo permitido aceitável de recuperação, sem implicações de custo para o sistema (tempo);
- $dis_t$  disponibilidade de água comprada para reservatório, no tempo  $t$  (volume);
- $lim_t$  limite de transporte alternativo (como exemplo, caminhão-pipa) de água, no tempo  $t$  (volume);
- $cap_{ki}$  fluxo máximo de água para o tubo entre os nós  $k$  e  $i$  (volume);
- $NM_n$  nível mínimo do fluxo de água para atendimento do cliente  $n$  (%);

$p_c$  probabilidade de ocorrência do cenário  $c$  (%).

**Parâmetros técnicos de custo:**

- $\alpha$  custo de uma unidade de capacidade adicional (\$);
- $\gamma$  custo de aquisição e instalação de uma linha de *backup*, redundância ou conectividade (\$/distância);
- $\theta$  custo de investimento para aumento da taxa de recuperação dos reservatórios (\$/volume/tempo);
- $\rho$  custo de investimento para aumento da taxa de recuperação das linhas de tubulação (\$/linhas/tempo);
- $\omega$  custo de atendimento da demanda (\$/volume);
- $\varphi$  penalidade de não atendimento da demanda dos nós sem atendimento prioritário (\$/volume);
- $\vartheta_p$  penalidade de não atendimento da demanda para o cliente prioritário  $p$  (\$/volume);
- $\varepsilon$  penalidade por ultrapassar o tempo de recuperação estipulado (\$/tempo);
- $\epsilon$  custo do transporte alternativo de água (\$/volume);
- $\delta$  custo da compra de água (\$/volume);
- $\mu$  custo da utilização dos recursos de recuperação para reservatórios (\$/volume/tempo);
- $\pi$  custo da utilização dos recursos de recuperação para linhas (\$/linhas/tempo).

**Variáveis de decisão binárias {0,1}:**

- $Lr_{ki}$  1, se uma ligação de *backup*, redundância ou conectividade for atribuída do nó  $k$  para o nó  $i$ , e 0, caso contrário;
- $Ol_{kitc}$  1, se a ligação definida da rede entre os nós  $k$  e  $i$  está funcionando no tempo  $t$  e no cenário  $c$ , e 0, caso contrário;
- $Or_{jntc}$  1, se a ligação entre o reservatório  $j$  e o cliente  $n$  está funcionando no tempo  $t$  e no cenário  $c$ , e 0, caso contrário;
- $Z_{kitc}$  1, se existe uma ligação entre os nós  $k$  e  $i$  para a existência do fluxo de água no tempo  $t$  e no cenário  $c$ , e 0, caso contrário;
- $SR_{tc}$  1, se a rede de água estiver danificada no tempo  $t$  e no cenário  $c$ , e 0, caso esteja recuperada;
- $vl_{kitc}$  1, se a válvula das linhas originais do tubo entre os nós  $k$  e  $i$ , estiver aberta no tempo  $t$  e no cenário  $c$ , e 0, caso contrário;

$vr_{kitc}$  1, se a válvula da ligação de *backup*, redundância ou conectividade do tubo entre os nós  $k$  e  $i$ , estiver aberta no tempo  $t$  e no cenário  $c$ , e 0, caso contrário.

### Variáveis de decisão contínuas positivas:

- $Rl$  recursos de recuperação incrementados para recuperação das linhas de tubulação do sistema de água (linhas/tempo);
- $Rr$  recursos de recuperação incrementados para recuperação dos reservatórios do sistema de água (volume/tempo);
- $rl_{kitc}$  recursos de recuperação utilizados para recuperação da linha entre os nós  $k$  e  $i$ , no tempo  $t$  e no cenário  $c$  (linhas/tempo);
- $rr_{jtc}$  recursos de recuperação utilizados para recuperação do reservatório  $j$ , no tempo  $t$  e no cenário  $c$  (volume/tempo);
- $xa_{ntc}$  porção da demanda atendida do nó  $n$ , no tempo  $t$  e no cenário  $c$  [0,1];
- $xn_{ntc}$  porção da demanda não atendida do nó  $n$ , no tempo  $t$  e no cenário  $c$  [0,1];
- $f_{kitc}$  fluxo de água entre os nós  $k$  e  $i$ , no tempo  $t$  e cenário  $c$  (volume/tempo);
- $V_{ntc}$  volume de água recebido pelo cliente  $n$ , no período de tempo  $t$  e no cenário  $c$  (volume);
- $Cd_{jtc}$  capacidade de água disponível no reservatório  $j$ , no período de tempo  $t$  e no cenário  $c$  (volume);
- $Ca_j$  capacidade adicional para o reservatório  $j$  (volume);
- $TA_{jntc}$  volume de água transportado do reservatório  $j$ , por meio de transporte alternativo, para abastecimento do cliente  $n$ , no período de tempo  $t$  e no cenário  $c$  (volume);
- $AC_{ntc}$  volume de água comprada de outra região para abastecimento do cliente  $n$ , no período de tempo  $t$  e no cenário  $c$  (volume).

Diante das definições acima e assumindo a formulação conceitual que inclui a aceitação das suposições do modelo, foi possível descrever o modelo matemático a partir do próximo subcapítulo.

#### 3.5.1 Função-objetivo

O ponto de partida do modelo começa com a definição da função objetivo, vista na equação (3.1).

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar} \quad & \alpha \sum_j C a_j + \gamma \sum_k \sum_i c l_{ki} L r_{ki} + \theta R r + \rho R l \\
& + \sum_c p_c \left[ \mu \sum_j \sum_t r r_{jtc} + \pi \sum_k \sum_i \sum_t r l_{kitc} + \epsilon \sum_j \sum_n \sum_t T A_{jntc} + \delta \sum_n \sum_t A C_{ntc} \right] \\
& + \sum_c p_c \left[ \omega \sum_n \sum_t Q_{nt} x a_{ntc} + \varphi \sum_s \sum_{t>ts} Q_{st} x n_{stc} + \sum_p \vartheta_p \sum_{t>tp} Q_{pt} x n_{ptc} + \epsilon \sum_{t>tr} S R_{tc} \right]
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Como afirmou McDaniels *et al.* (2008), a resiliência pode ser aprimorada por ambas as atividades, tanto as realizadas antes da ocorrência do desastre, como as atividades de resposta após o evento. Dessa forma, neste modelo a função objetivo foi constituída de dois estágios, onde o primeiro estágio corresponde às decisões sobre investimentos realizados antes da ocorrência do evento disruptivo, que estão representados na primeira linha da equação (3.1).

Sendo assim, no primeiro estágio, o primeiro termo elenca a possibilidade do investimento em capacidade de absorção, através do aumento da capacidade de água nos reservatórios (em termos de volume de água), que foi citado pela Companhia das Águas. Enquanto isso, o segundo termo enfatiza tanto a capacidade de absorção como a de adaptação, através da redundância, como visto no subcapítulo 2.3, e realatado pela Companhia das Águas, que geralmente não há na empresa, porém foi considerado neste trabalho devido a sua importância no caso de interrupções. Dessa forma, Cimellaro, Reinhorn e Bruneau (2010) asseguraram que a redundância deve ser desenvolvida no sistema com antecedência e deve existir como um conjunto de possibilidades a serem atribuídas. Com isso, o segundo termo propicia a instalação de tubulações redundantes, de conectividade ou de *backup* entre os nós da rede de água, sendo o custo expresso por comprimento de tubulação instalada, onde a explicação dessas tubulações redundantes, de conectividade ou *backup* foi melhor delimitada no próximo subcapítulo. O terceiro e quarto termos representam o investimento na capacidade de recuperação do sistema, onde é possível o investimento no aumento da taxa de recuperação, tanto dos reservatórios (terceiro termo), como das linhas de tubulações (quarto termo). Nesse conjunto das equações antes do evento, a capacidade de absorção é utilizada como uma forma de absorver total ou parcial o impacto sistêmico ocasionado pela interrupção. No momento da interrupção, essa capacidade pode atuar de imediato com a capacidade adicional aumentada dos reservatórios e com as tubulações adicionais, onde estas últimas também fazem parte da capacidade de adaptação. Enquanto isso, na forma da capacidade de recuperação estão os investimentos no aumento da taxa de recuperação, por meio da aquisição de recursos humanos e/ou técnicos, como exemplo, materiais, equipamentos, etc. Porém, estes recursos de

recuperação só são utilizados, nesse caso abordado nesta dissertação, na ocorrência de alguma interrupção na rede, no qual o investimento ocorre antes, no entanto, a utilização dos recursos acontece depois do evento disruptivo.

Enquanto isso, o segundo estágio englobou as decisões pós-evento e, logo, influenciadas pela ocorrência dos eventos disruptivos a qual a rede pode estar suscetível, sendo representadas pela segunda e terceira linhas da equação (3.1). Este estágio pode ser compreendido em dois grupos: os investimentos esperados realizados pós-evento e os custos esperados do sistema. O primeiro grupo está representado na segunda linha da equação (3.1). O primeiro e segundo termos desse grupo referem-se à utilização dos recursos de recuperação tanto para reservatórios (primeiro termo) como para linhas (segundo termo). O terceiro e quarto termos englobam investimentos em capacidade de adaptação do sistema, o terceiro termo corresponde à compra de água de outra região quando algum reservatório não estiver fornecendo água devido a paradas para consertos na ocorrência de interrupção do mesmo. Apesar da compra de água não ser enfatizada pela Companhia das Águas, pois os mesmos podem explorar as águas do país sem custos, outros trabalhos, como Chung, Lansey e Bayraksan (2009), citaram a necessidade da compra de água em outros países. Dessa forma, como este trabalho teve o propósito de elaborar um modelo geral para sistemas de distribuição de água, foi englobada a possibilidade da compra de água. Enquanto isso, o quarto termo permite a utilização de transporte alternativo (como exemplo, caminhão-pipa) quando o reservatório tiver água para abastecer, porém a tubulação estiver danificada sendo possível assim, utilizar o transporte alternativo que também teve sua necessidade relatada pela Companhia das Águas. Como no primeiro estágio da equação (3.1), os termos procuram em maior destaque, diminuir o impacto sistêmico na forma de capacidade de absorção, a segunda linha da equação (3.1) visa aumentar a velocidade de recuperação do sistema, por meio das capacidades de adaptação e recuperação, em que o investimento para esta última é realizado no primeiro estágio, porém, sua utilização é efetivada no segundo estágio, por meio dos termos de utilização dos recursos de recuperação.

O segundo grupo do segundo estágio é representado pela terceira linha da equação (3.1), referente aos custos esperados do sistema depois da ocorrência dos cenários disruptivos. O primeiro termo corresponde ao custo esperado de atendimento da demanda dos clientes. O segundo e terceiro termos compreendem as penalidades esperadas envolvidas com o não atendimento da demanda, contabilizada a partir de um dado período de tempo estabelecido, e são termos separados, pois nós sem prioridade (segundo termo) e nós prioritários (terceiro termo) se distinguem, onde alguns nós são considerados nós críticos, porque alimentam infraestruturas cujo papel social torna-os essenciais, e cujo fornecimento eficiente deve ser

assegurado durante eventos críticos (CUNHA; SOUSA, 2010), além do mais, os nós críticos podem possuir contratos de fornecimento de água que os diferenciam dos demais, como relatado pela Companhia das Águas. E, como afirmaram Yazdani e Jeffrey (2011), uma avaliação abrangente da rede de distribuição de água deve levar em conta a importância e influência dos nós. E por fim, o quarto termo está relacionado à capacidade e velocidade de recuperação dos sistemas após o evento perturbador, e com isso uma penalidade esperada é incrementada ao ultrapassar um tempo estipulado para recuperação, pois como asseguraram Schultz e Smith (2016), uma maneira eficaz de avaliar a capacidade de recuperação é determinar um tempo de recuperação máximo desejável. E dessa forma, o modelo desenvolvido englobou a necessidade de os sistemas trabalharem com prazos definidos, que envolvem em custos, caso não sejam alcançados.

Com a função-objetivo determinada e explanada, o próximo tópico englobou as determinações das restrições do modelo, vistas a seguir.

### 3.5.2 Restrições do modelo

Segundo Vairavamoorthy *et al.* (2015), uma restrição é uma condição que deve ser satisfeita para que o projeto seja viável e para que possam refletir as limitações dos recursos, os requisitos do usuário ou os limites da validade dos modelos de análise. Sendo assim, o modelo proposto está sujeito às restrições que foram detalhadas ao longo deste subcapítulo.

Vários autores (AHERN, 2011; FARAHMANDFAR; PIRATLA; ANDRUS, 2017; TODINI, 2000; YAZDANI; JEFFREY, 2012b) relataram a importância e a necessidade de um sistema redundante, seja através dos tubos duplicados ou adição dos tubos para aumentar a conectividade do sistema no caso de falhas. Essa redundância está explicitada nas restrições (3.2) – (3.5).

$$\sum_j Lr_{jn} \leq 1 \quad \forall n \quad (3.2)$$

$$\sum_j Lr_{nj} = 0 \quad \forall n \quad (3.3)$$

$$\sum_n Lr_{nm} \leq 1 \quad \forall m \quad (3.4)$$

$$Lr_{ii} = 0 \quad \forall i \quad (3.5)$$

A restrição (3.2) corresponde ao estabelecimento de uma ligação adicional de *backup*, partindo do reservatório para um ponto de demanda, a restrição (3.3) assegura que não haja



fluxo inverso, ou seja, dos pontos de demanda para os reservatórios, uma vez que a notação do subscrito  $(i, j)$  denota a direção do fluxo. A restrição (3.4) corresponde ao estabelecimento de uma ligação adicional, que pode ser redundante (quando já existir um tubo entre o nós, e o modelo adicionar mais um tubo) ou de conectividade (quando não existir ligação entre os nós, e o modelo adicionar um tubo) entre os pontos de demanda. Ambas as restrições (3.2) e (3.4) são limitadas à adição de um tubo para cada par de nós, devido aos altos custos envolvidos com a instalação de linhas redundantes na rede. Na restrição (3.5) é garantido que não exista atribuição de ligações no próprio nó, ou seja, partindo do nó e indo para o mesmo.

Como todo projeto de engenharia, podem haver limitações topológicas, onde se torna inviável instalações de ligações entre os nós. Dessa forma a restrição (3.6) garante essa não-atribuição de ligações, através de arcos pré-definidos com base no julgamento da engenharia.

$$Lr_{ik} = 0 \quad \forall (i, k) \text{ pré-definido} \quad (3.6)$$

Como a restrição (3.4) atribui apenas uma linha redundante entre o arco dos nós, pode ocorrer de se atribuir uma ligação na direção  $(i, j)$  e outra na direção  $(j, i)$ , ultrapassando o limite de uma ligação por arco. Para evitar essa dupla ligação, a restrição (3.7) inviabiliza essa ocorrência.

$$Lr_{ik} + Lr_{ki} \leq 1 \quad \forall k, i \quad (3.7)$$

Com a atribuição de ligações redundantes, essencialmente no caso de tubos duplicados, o modelo pode atribuir ao tubo duplicado, uma direção de fluxo contrária à linha pré-definida da rede. Dessa forma, a restrição (3.8) garante que tubos duplicados tenham a mesma direção de fluxo.

$$L_{ik} + Lr_{ki} \leq 1 \quad \forall k, i \quad (3.8)$$

A restrição (3.9) explicita que a linha de tubulação está ativada, ou seja, funcionando, caso não tenha ocorrido evento disruptivo ou, caso ocorreu, estará desativada até a sua recuperação, por meio da utilização dos recursos de recuperação que começam a serem contabilizados ao final do tempo  $t=1$ .

$$Ol_{kitc} \leq (1 - E_{kic})L_{ki} + \sum_{\tau=1}^{t-1} r_{l_{kitc}} \quad \forall k, i, t, c \quad (3.9)$$

Antes do tempo total do experimento, a linha pré-definida pode estar funcionando ou não, depende da ocorrência ou não do evento disruptivo, e a restrição (3.10) garante isso.

$$Ol_{kitc} \leq L_{ki} \quad \forall k, i, t < T, c \quad (3.10)$$

A restrição (3.11) diz que no tempo total a linha pré-definida tem de estar recuperada e funcionando.

$$Ol_{kitc} = L_{ki} \quad \forall k, i, t = T, c \quad (3.11)$$

As válvulas de tubulações controlam a abertura/fechamento do tubo (JUNG, 2013), então caso a linha esteja desativada devido a algum evento disruptivo, a válvula será fechada e, caso a linha esteja ativada, a válvula será aberta. Sendo assim, a restrição (3.12) assegura que só há continuidade do fluxo de água pela linha pré-definida, caso a mesma esteja ativada, e a restrição (3.13) assegura que as linhas que partem dos reservatórios necessitam também do funcionamento do mesmo para garantir seu fluxo de água por elas.

$$vl_{kitc} \leq Ol_{kitc} \quad \forall k, i, t, c \quad (3.12)$$

$$vl_{jntc} \leq Or_{jntc} \quad \forall j, n, t, c \quad (3.13)$$

Para os tubos adicionais, o mesmo raciocínio das duas restrições anteriores é aplicado, ou seja, a restrição (3.14) garante que a válvula do tubo adicional só pode ser aberta se houver ocorrido a ligação de *backup*, conectividade ou redundância, e a restrição (3.15) assegura que só há fluxo de água por ligação adicional partindo de um reservatório, caso o mesmo esteja funcionando.

$$vr_{kitc} \leq Lr_{ki} \quad \forall k, i, t, c \quad (3.14)$$

$$vr_{jntc} \leq Or_{jntc} \quad \forall j, n, t, c \quad (3.15)$$

Na restrição (3.16) retrata-se que entre os nós  $i$  e  $j$  flui água de apenas uma tubulação, mesmo havendo redundância, ou seja, quando a linha estiver danificada, a válvula do tubo redundante pode ser aberta, e quando a linha estiver recuperada, o tubo redundante pode ser fechado por meio da válvula.

$$vl_{kitc} + vr_{kitc} \leq 1 \quad \forall k, i, t, c \quad (3.16)$$

Na restrição (3.17) é estabelecida a existência ou não, de conexão entre os nós para o fluxo de água, onde existe conexão, caso o reservatório não esteja danificado e a linha original da rede não foi interrompida, ou as ligações adicionais de redundância, *backup* ou conectividade existam.

$$Z_{kitc} \leq vl_{kitc} + vr_{kitc} \quad \forall k, i, t, c \quad (3.17)$$

A restrição (3.18) determina que o fluxo de água na rede para cada período  $t$  é menor ou igual à capacidade do tubo entre os nós e só existe fluxo se houver ligação entre os nós. Essa restrição reflete também a possibilidade de fornecimento de água variável com o tempo, para os clientes. Quando se observa essa restrição que determina o fluxo de água, percebe-se a necessidade da consideração da restrição (3.16) que limita para uma tubulação aberta, pois na falta dessa restrição e na ocorrência de tubulação redundante, pode-se considerar o fluxo de água por duas tubulações com mesmos índices  $i$  e  $k$ , dessa forma na determinação do volume de água pelo fluxo na restrição (3.18) iria considerar apenas o volume vindo de uma tubulação, quando na verdade, poderiam vir de duas.

$$f_{kitc} \leq cap_{ki} \times Z_{kitc} \quad \forall k, i, t, c \quad (3.18)$$

Na restrição (3.19) é determinado o volume fornecido aos nós de demanda para cada período de tempo por meio da equação da conservação de massa, como assegurou Jung (2013), que pode ser escrita usando a continuidade do fluxo nodal, que deve ser satisfeita em cada nó. Sendo assim, o volume é representado pela diferença entre o fluxo de água que entra no nó e o fluxo de água que sai do nó em questão, pois como pontuaram Palleti *et al.* (2018), em sistemas reais de distribuição de água, o padrão de demanda pode mudar ao longo do dia.

$$V_{ntc} = \sum_k f_{kntc} - \sum_i f_{nitc} \quad \forall n, t, c \quad (3.19)$$

A demanda para cada período de tempo é considerada na restrição (3.20), onde a mesma está de acordo com a proporção atendida. E essa demanda atendida é representada pelo volume acumulado através do fluxo de água pelas tubulações, somado à compra de água de outra região e ao envio de água dos reservatórios por meio de transporte alternativo. A demanda de água por consumidor é representada para cada tempo  $t$  devido às oscilações da demanda com o tempo, principalmente para instalações críticas, pois como afirmaram Davis (2014), Hamilton (2009) e Vairavamoorthy *et al.* (2015), outra contribuição do abastecimento de água à resiliência (além do atendimento direto à população) é a água para combate a incêndios, que ocorrem em períodos de tempo isolados, e a demanda variável com o tempo enfatiza essa questão. E a Companhia das Águas também enfatizou que os hidrantes das cidades têm que estar abastecidos.

$$Q_{nt} \times xa_{ntc} = V_{ntc} + AC_{ntc} + \sum_j TA_{jntc} \quad \forall n, t, c \quad (3.20)$$

Diante de eventos disruptivos, Bernardi *et al.* (2014) afirmaram que é de se esperar que os requisitos normais de água do cliente não sejam totalmente satisfeitos. Dessa forma, é necessário identificar um nível mínimo satisfatório de funcionalidade pós-evento (SHARIFI; YAMAGATA, 2016b; VASAN; SIMONOVIC, 2010), e esse nível está retratado nas restrições (3.21) e (3.22), tanto para nós sem prioridade, como para nós prioritários que podem exigir diferentes tempos de funcionamento dos níveis de água dos anteriores, pois alguns nós podem estar intimamente interligados com outros setores críticos de infraestrutura, como energia, transporte e telecomunicações, podendo ocorrer impactos em cascata, que foram relatados por vários autores (CHMIELEWSKI *et al.*, 2016; OUYANG; DUEÑAS-OSORIO, 2011; SIQUEIRA, 2014; SHIN *et al.*, 2018). A Companhia das Águas relatou a necessidade desses pontos críticos enviarem uma demanda diária para a empresa, a fim de ser atendida. Além do mais, Francis e Bekera (2014) ressaltaram a necessidade de um tempo pós-desastre, que é aceitável para ter certeza de que um conjunto inicial de ações foi tomado para estabilizar o sistema. Com isso, as equações (3.21) e (3.22) demonstram essa quantidade de tempo tolerável para cada classe de clientes, pois como afirmaram Shin *et al.* (2018), as falhas nos tubos que fornecem água para os hospitais requerem uma recuperação relativamente mais rápida, comparando-se com os tubos que fornecem água para as áreas residenciais normais. Além do tempo, o nível de serviço também é diferenciado para essas classes, devido às suas necessidades serem maiores e prioritárias, e como visto no subcapítulo 2.3, é necessário o estabelecimento de níveis desejáveis de serviço pós-evento.

$$V_{stc} + AC_{stc} + \sum_j TA_{jstc} \geq NM_s Q_{st} \quad \forall s, t > ts, c \quad (3.21)$$

$$V_{ptc} + AC_{ptc} + \sum_j TA_{jptc} \geq NM_p Q_{pt} \quad \forall s, t > tp, c \quad (3.22)$$

Ao final do tempo considerado para o experimento, o volume fornecido ao nó tem que ser igual à demanda do mesmo para o período de tempo considerado, representado na restrição (3.23).

$$\sum_{\tau=1}^T \left[ V_{n\tau c} + AC_{n\tau c} + \sum_j TA_{jn\tau c} \right] = \sum_{t=1}^T Q_{nt} \quad \forall n, c \quad (3.23)$$

A água comprada pelo sistema de água é limitada por sua disponibilidade por período de tempo, vista na restrição (3.24).

$$\sum_n AC_{ntc} \leq dis_t \quad \forall t, c \quad (3.24)$$

Assim como a restrição (3.24) anterior, a restrição (3.25) limita a quantidade de água por meio de transporte alternativo. O transporte alternativo é importante, pois McDaniels *et al.* (2008) relataram que o terremoto de Northridge em 1994, em Los Angeles, afetou o planejamento e gerenciamento de hospitais, onde o Centro Médico do Hospital Northridge (NHMC) ficou sem água imediatamente após o terremoto, tornando o funcionamento normal do hospital impossível e a instalação passou a depender de caminhões-pipa para transportar a água.

$$\sum_j \sum_n TA_{jntc} \leq lim_t \quad \forall t, c \quad (3.25)$$

Na restrição (3.26), a proporção da demanda não atendida e atendida somam 1.

$$xn_{ntc} + xa_{ntc} = 1 \quad \forall n, t, c \quad (3.26)$$

Se o reservatório estiver funcionando, então sua capacidade tem que ser maior ou igual a sua capacidade inicial, sendo isto assegurado na restrição (3.27).

$$Cd_{jtc} - Ci_{jt}Or_{jntc} \geq 0 \quad \forall n, j, t, c \quad (3.27)$$

A água fornecida pelo reservatório através do transporte alternativo, somado ao fluxo de água do reservatório pelas tubulações, não deve exceder a capacidade disponível do reservatório, condição essa, representada na restrição (3.28).

$$\sum_n (TA_{jntc} + f_{jntc}) \leq Cd_{jtc} \quad \forall j, t, c \quad (3.28)$$

A restrição (3.29) representa a capacidade do reservatório recuperada, por meio da utilização de recursos de recuperação, e acumulada a cada período de tempo.

$$Cd_{jtc} = (1 - Pr_{jc})(Ci_j + Ca_j) + \sum_{\tau=1}^{t-1} rr_{j\tau c} \quad \forall j, t, c \quad (3.29)$$

A capacidade do reservatório ao longo do tempo pode ser menor ou igual à capacidade inicial somada à capacidade adicional, e ao final do tempo, tem que ser igual, representadas pelas restrições (3.30) e (3.31), respectivamente.

$$Cd_{jtc} \leq Ci_{jt} + Ca_j \quad \forall j, t, c \quad (3.30)$$

$$Cd_{jTc} = Ci_{jT} + Ca_j \quad \forall j, c \quad (3.31)$$

Dada a ocorrência de um evento disruptivo  $g$ , o sistema de água possui uma taxa máxima para recuperação, tanto para linhas, como para reservatórios. Consistindo o sistema de água dos recursos de recuperação disponíveis, caracterizados por  $tx_{l_g}$  e  $tx_{r_g}$ , esses recursos podem ser incrementados por investimentos em recursos de recuperação, da forma que não ultrapassem a taxa de recuperação máxima para o sistema, retratados nas restrições (3.32) e (3.33). Vários autores (DAVIDSON et al., 2016; HAMILTON, 2009; JUAN-GARCÍA et al., 2017; SHARIFI; YAMAGATA, 2016a) relataram a importância de que diferentes gravidades do evento no sistema exigem diferentes respostas de resiliência. A Companhia das Águas ressaltou que diferentes tipos de falhas demandam diferentes tempos de conserto e, portanto, diferentes taxas de recuperação.

$$tx_{l_g} + Rl \leq l_g \quad \forall t, c \quad (3.32)$$

$$tx_{r_g} + Rr \leq w_g \quad \forall j, t, c \quad (3.33)$$

Dessa forma, os recursos de recuperação utilizados para as linhas e reservatórios, não podem ultrapassar os recursos disponíveis para cada intervalo de tempo, nas restrições (3.34) e (3.35), respectivamente. E como relatado pela Companhia das Águas, as equipes possuem determinada quantidade de pessoal, e a depender da gravidade, são necessários mais recursos (pessoal e/ou máquinas).

$$\sum_k \sum_i rl_{kitc} \leq tx_{l_g} + Rl \quad \forall t, c \quad (3.34)$$

$$\sum_j rr_{jtc} \leq tx_{r_g} + Rr \quad \forall t, c \quad (3.35)$$

Durante a avaliação da perda econômica atribuível à ruptura, a duração da perda de funcionalidade é tão importante quanto a extensão espacial e sua severidade (LUNA; BALAKRISHNAN; DAGLI, 2011). Angeler e Allen (2016) relataram que o tempo de recuperação é a unidade de medida da resiliência. O tempo de recuperação captura a velocidade com que um sistema se recupera (ASEFA et al., 2014; TRAN et al., 2017). Sendo assim, as restrições (3.36) e (3.37) garantem a captura do tempo de recuperação pela variável  $SR$ , onde caso ocorra alguma interrupção na rede de água (na linha de tubulação ou reservatório), a variável  $SR$  será 1, e 0 caso contrário.

$$SR_{tc} \geq 1 - \left( \frac{\sum_k \sum_i Ol_{kitc}}{\sum_k \sum_i L_{ki}} \right) \quad \forall t, c \quad (3.36)$$

$$SR_{tc} \geq 1 - \left( \frac{\sum_j \sum_n (Or_{jntc} L_{jn})}{\sum_j \sum_n L_{jn}} \right) \quad \forall t, c \quad (3.37)$$

As restrições (3.38) e (3.39) impõem restrições binárias e positivas em todas as variáveis de decisão correspondentes, respectivamente.

$$Lr_{ki}, Ol_{kitc}, Or_{jntc}, Z_{kitc}, SR_{tc}, vl_{kitc}, vr_{jitc} \in \{0,1\} \quad \forall k, i, j, n, t, c \quad (3.38)$$

$$Rl, Rr, rl_{kitc}, rr_{jitc}, xa_{ntc}, xn_{ntc}, f_{kitc}, V_{ntc}, Cd_{jtc}, TA_{jntc}, AC_{ntc}, Ca_j \geq 0 \quad \forall k, i, j, n, t, c \quad (3.39)$$

Diante do exposto acima, o próximo capítulo constou da aplicabilidade do modelo proposto, através de um exemplo numérico da literatura.

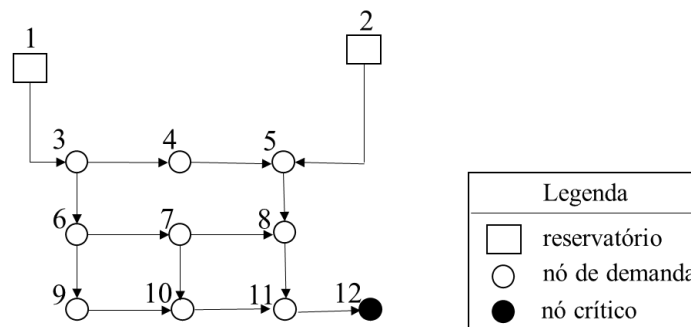
## 4 APLICABILIDADE DO MODELO

Neste capítulo foi abordada a aplicabilidade do modelo proposto, que consistiu da explanação do exemplo numérico, a modelagem dos cenários disruptivos e os dados utilizados.

### 4.1 Exemplo numérico

Neste subcapítulo foi delineado o exemplo numérico e para isso utilizou-se um exemplo da literatura. Este exemplo foi encontrado no *site* do Centre for Water Systems (2018) da University of Exeter, que abriga uma série de problemas de referência usados na literatura de otimização e modelagem de águas urbanas, incluindo exemplos das redes de distribuição de água usadas por vários pesquisadores em seus estudos. Para este estudo o exemplo utilizado foi a rede de água *Gessler 1985*, representada na Figura 4.

Figura 4 - Rede de água Gessler 1985



Fonte: Adaptado do Centre for Water Systems (2018)

A rede Gessler 1985 é constituída por 12 nós, sendo 2 nós de fornecimento (reservatórios) e 10 nós de demanda (consumidores), desses últimos, 1 nó é considerado crítico para este estudo, ou seja, este nó necessita de atendimento prioritário, caracterizando uma instalação industrial. A próxima fase foi definir os cenários aplicados no experimento numérico, que foi abordada no tópico a seguir.

#### 4.1.1 Modelagem dos cenários

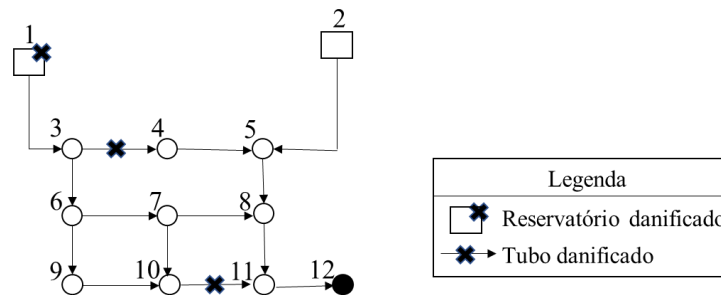
No tópico 2.2.3 foram delimitados os tipos de eventos mais citados na literatura, que culminam na interrupção dos sistemas de distribuição de água. Para a Companhia das Águas, o evento aleatório e atos humanos podem ocorrer, já o evento de desastre natural não foi evidenciado na empresa, porém é considerado neste estudo, devido à sua possibilidade de ocorrência em diversos países. Desse modo, utilizou-se cada tipo de evento citado como um



possível cenário para a interrupção da rede de água e um quarto cenário foi incluído representando a possibilidade de não interrupção.

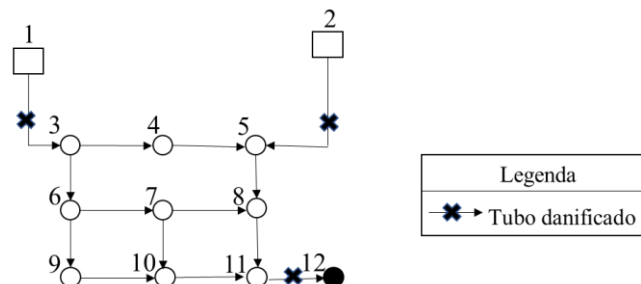
Como as redes de água de referência geralmente concentram-se em modelagens hidráulicas/técnicas do sistema, seus dados, por conseguinte, referem-se a estas questões. Então, para a rede Gessler 1985 não foram encontrados dados sobre falhas de tubulações e/ou curvas de fragilidades dos tubos para uma modelagem dos cenários de eventos aleatório e de desastre natural, respectivamente, como explicada no subcapítulo 2.2.3. Com isto, para o evento aleatório representado pelo cenário 1 foram escolhidos aleatoriamente 1 reservatório e 2 ligações para serem interrompidos, visualizados na Figura 5. Foram escolhidas apenas 2 ligações devido à baixa probabilidade associada às falhas simultâneas de tubulações.

Figura 5 - Evento aleatório (cenário 1)



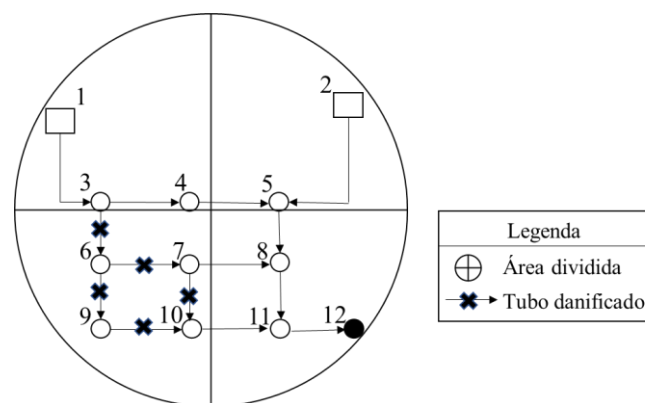
Para o cenário 2, representado pelo evento de ato intencional, como descrito no subcapítulo 2.2.3, os nós com mais ligações ou cenário de pior caso são geralmente escolhidos para serem interrompidos. Desta forma, as ligações mais essenciais da rede são as que partem dos reservatórios e a que fornece água para a instalação crítica, sendo estas consideradas para interrupção nesse cenário. Não foi escolhido reservatório para interrupção, pois considerou-se que existe proteção das instalações fornecedoras de água, uma vez que se situam em locais fechados para a população. A Figura 6 demonstra esse cenário aqui delimitado.

Figura 6 - Evento ato intencional (cenário 2)



No cenário 3, de ocorrência de desastre natural, como terremotos, considerou-se que em geral, acometem em maior intensidade uma dada área da região. Então, através de uma circunferência circunscrita, a rede em estudo foi dividida em 4 partes, como visto na Figura 7. Devido à parte Sul-Oeste da circunferência constar de mais tubulações inteiras afetadas, e ainda não terem sido representados um maior conjunto de tubos danificados nos cenários anteriores, esta dissertação selecionou essa parte da região para ser danificada, como forma de aumentar a diferenciação de cenários para a análise e, demonstrar assim, uma maior aplicabilidade para o modelo proposto.

Figura 7 - Evento desastre natural (cenário 3)



O quarto cenário, como citado anteriormente, representou a possibilidade de não interrupção da rede de água. A delimitação dos componentes afetados para cada cenário é vista também no Quadro 4, onde os reservatórios são representados por *R* seguido do número do nó correspondente, e as tubulações são representadas por *T* seguidas dos nós na quais estão conectadas.

Quadro 4 - Descrição dos cenários

	Tipo de evento	Componentes afetados
<b>Cenário 1</b>	Aleatório	R1, T3-4, T10-11
<b>Cenário 2</b>	Ato intencional	T1-3, T2-5, T11-12
<b>Cenário 3</b>	Desastre natural	T3-6, T6-7, T6-9, T7-10, T9-10
<b>Cenário 4</b>	Nenhum	-

Fonte: Esta pesquisa (2018)

Com os cenários discriminados é preciso determinar as suas probabilidades associadas. Para isto, este estudo considerou para fins ilustrativos que a probabilidade de ocorrência de um evento por desastre natural é o menos provável, sendo o evento de ato intencional duas vezes mais provável que este e o evento aleatório três vezes mais provável que aquele. A não ocorrência de evento disruptivo possui determinada probabilidade, que somada com a dos

demais cenários resultam em 1. Dessa forma, essas relações numéricas são melhor visualizadas na segunda coluna da Tabela 1.

*Tabela 1 - Probabilidades das simulações*

	<b>Probabilidade</b>	<b>Experimento 1</b>	<b>Experimento 2</b>	<b>Experimento 3</b>	<b>Experimento 4</b>
<b>Cenário 1</b>	3x	0,05	0,2	0,3	0,45
<b>Cenário 2</b>	2x	0,0333	0,1333	0,2	0,3
<b>Cenário 3</b>	x	0,0167	0,0667	0,1	0,15
<b>Cenário 4</b>	y	0,9	0,6	0,4	0,1
Somatório	1	1	1	1	1

*Fonte: Esta pesquisa (2018)*

Para determinar as probabilidades dos cenários da Tabela 1 foram estipulados valores para a probabilidade de ocorrência do cenário 4 (nenhum evento disruptivo). De forma a abranger diversas possibilidades para o modelo proposto, foram determinadas quatro probabilidades diferentes para o cenário 4, resultando em quatro experimentos para o modelo proposto. Desse modo, os valores utilizados para o referido cenário constam na quinta linha da Tabela 1. Com os valores das probabilidades para o cenário 4 é possível determinar os valores para os demais cenários, como discriminados por meio das relações numéricas da segunda coluna da Tabela 1. Sendo assim, as probabilidades para cada cenário e em cada experimento encontram-se da terceira à sexta colunas da Tabela 1.

Por fim, esta dissertação reitera que as suposições assumidas para os eventos disruptivos, cenários e probabilidades associadas, foram utilizados como forma demonstrativa desta pesquisa a fim de evidenciar a aplicabilidade do modelo desenvolvido e não possuem nenhuma associação com a realidade da rede Gessler 1985 em estudo, que foi utilizada de forma adaptada para este exemplo numérico. No próximo tópico, foram apresentados os demais dados utilizados neste estudo.

#### 4.1.2 *Dados utilizados*

Os eventos dos cenários ( $E_{kic}$ ) e suas probabilidades associadas ( $p_c$ ) foram determinadas no subcapítulo anterior. As ligações definidas ( $L_{ki}$ ) da rede são visualizadas na Figura 4.1, e através da distância em linha reta entre os nós, o parâmetro de comprimento ( $cl_{ki}$ ) foi obtido dos dados da rede em análise, visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Distância entre os nós (metros)

nós	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	5774	1675	2992	4503	3266	4102	5306	4942	5530	6473	7522
2	5774	0	4989	3505	2246	5861	4664	3809	7046	6087	5459	5266
3	1675	4989	0	1628	3241	1800	2428	3708	3540	3897	4800	5881
4	2992	3505	1628	0	1613	2430	1803	2419	3899	3543	3892	4686
5	4503	2246	3241	1613	0	3710	2419	1803	4802	3892	3543	3830
6	3266	5861	1800	2430	3710	0	1629	3242	1740	2383	3679	5009
7	4102	4664	2428	1803	2419	1629	0	1613	2383	1740	2372	3527
8	5306	3809	3708	2419	1803	3242	1613	0	3679	2372	1740	2268
9	4942	7046	3540	3899	4802	1740	2383	3679	0	1629	3242	4697
10	5530	6087	3897	3543	3892	2383	1740	2372	1629	0	1613	3068
11	6473	5459	4800	3892	3543	3679	2372	1740	3242	1613	0	1455
12	7522	5266	5881	4686	3830	5009	3527	2268	4697	3068	1455	0

Fonte: Esta pesquisa (2018)

Os demais dados foram estimados e/ou obtidos através de uma análise cuidadosa de vários periódicos e relatórios técnicos que tratam do sistema de distribuição de água, como Aljadhari e Abraham (2018), American Lifelines Alliance (2001), American Lifelines Alliance (2005a), American Lifelines Alliance (2005b), Atkinson *et al.* (2014), Chung, Lansey e Bayraksan (2009), Salomons *et al.* (2012), e estão elencados na Tabela 3.

Tabela 3 - Demais parâmetros

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
$ts$	12	horas
$tp$	6	horas
$tr$	3	horas
$dis_t$	350	$m^3$
$lim_t$	350	$m^3$
$\alpha$	28040	\$
$\gamma$	99,7	\$/metros
$\theta$	6810	\$/ $m^3$ /hora
$\rho$	13000	\$/linha/hora
$\omega$	65	\$/ $m^3$
$\varphi$	122	\$/ $m^3$
$\vartheta_p$	244	\$/ $m^3$
$\varepsilon$	10000	\$/hora
$\epsilon$	4050	\$/ $m^3$
$\delta$	81000	\$/ $m^3$
$\mu$	681	\$/ $m^3$ /hora
$\pi$	1300	\$/linha/hora

Fonte: Esta pesquisa (2018)

Na Tabela 3, para os parâmetros de  $lim_t$  e  $dis_t$  de água, foram considerados valores iguais para todos os períodos de tempo considerados no experimento, que são  $T=168$  horas, equivalente a uma semana (7 dias). Para esta dissertação foi assumido no subcapítulo 3.4 que a capacidade dos reservatórios é igual à demanda dos clientes para cada instante de tempo, e como as demandas foram assumidas iguais para este exemplo, logo a capacidade também é,

então a capacidade do reservatório 1 é de  $368\text{m}^3$  e do reservatório 2 de  $345\text{m}^3$  para todos os períodos de tempo considerados.

O nível mínimo de fornecimento de água para os nós foi atribuído como 60% para nós sem prioridade e de 80% para nós críticos, e a demanda de água  $Q_{nt}$  foi adaptada dos dados da rede de água, e foi considerada igual para todos os intervalos de tempo considerados, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Demanda e nível de atendimento

	Nós de demanda									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Q_{nt} (m^3)$	45	45	45	68	68	68	45	68	80	181
$NM_n (\%)$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8

Fonte: Esta pesquisa (2018)

No caso de interrupção do reservatório, o parâmetro  $Pr_{jc}$  foi determinado como 40% da capacidade afetada do mesmo. Para determinação da capacidade dos tubos adicionais foi considerada a adição de tubos com uma capacidade de fluxo máxima de  $70\text{ m}^3/\text{h}$ .

Para esta pesquisa foram elencados 3 tipos de gravidades de evento disruptivo, logo  $g=3$ , onde a gravidade 1 caracteriza menor impacto do que a 2, e assim sucessivamente. Porém, para testar inicialmente o modelo, foi aplicada a gravidade 1. Para os valores das taxas de recuperação de linhas e reservatórios foram adaptados os dados obtidos do American Lifelines Alliance (2001) e American Lifelines Alliance (2005a) sobre impactos em sistemas de distribuição de água, e os dados utilizados constam na Tabela 5.

Tabela 5 - Taxas de recuperação

Parâmetro	Gravidade do evento			Unidade de medida
	1	2	3	
$tx_{l_g}$	1,029	0,486	0,48	linhas/hora
$tx_{r_g}$	30	20	6	$\text{m}^3/\text{hora}$
$l_g$	1,898	0,926	0,783	linhas/hora
$w_g$	70	50	30	$\text{m}^3/\text{hora}$

Fonte: Esta pesquisa (2018)

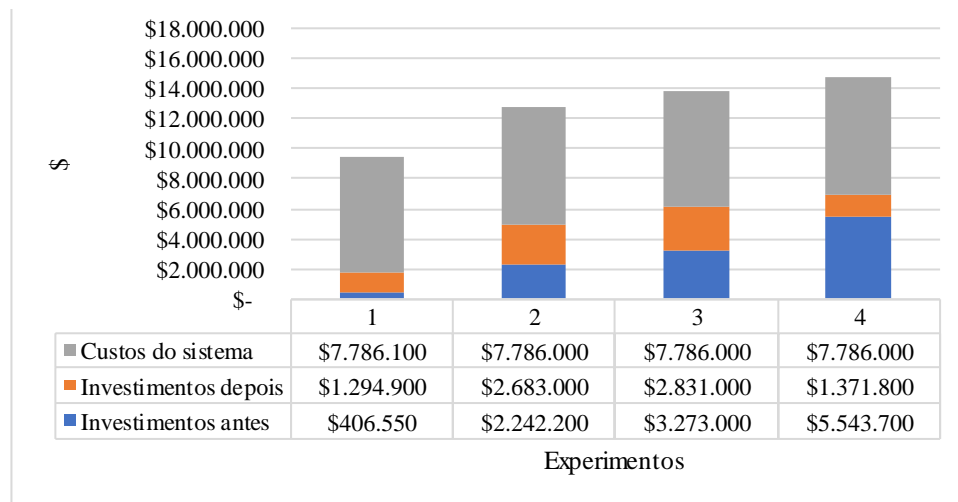
No próximo subcapítulo foi apresentada a resolução do modelo proposto para o exemplo numérico aqui exposto, através do *software* IBM ILOG CPLEX versão acadêmica 12.6.2. A solução do modelo consistiu de 755214 restrições com 637896 variáveis de decisão, sendo 401328 binárias e 236568 positivas. O tempo médio de execução para cada experimento, relativo a todas as gravidades, aumentava à medida que se aumentava a gravidade do evento disruptivo, dessa forma obtiveram-se os tempos médios de execução de 1m32s, 2m46s, 3m10s e 6m2s para os experimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Com isso percebeu-se a dificuldade

quanto a solução a medida em que se aumentava a gravidade do evento e, notou-se o benefício de se obter uma solução exata com a aplicação da programação linear inteira mista ao invés de heurísticas em que, não necessariamente, tem-se uma solução ótima.

## 4.2 Resultados e discussões

Este subcapítulo englobou a apresentação dos resultados obtidos com a aplicação do modelo. Para isto, os quatro experimentos realizados foram aplicados com as probabilidades vistas na Tabela 1 e, com isso, obtem-se na Figura 8, o custo total esperado do sistema para cada experimento executado.

Figura 8 – Custo total esperado do sistema



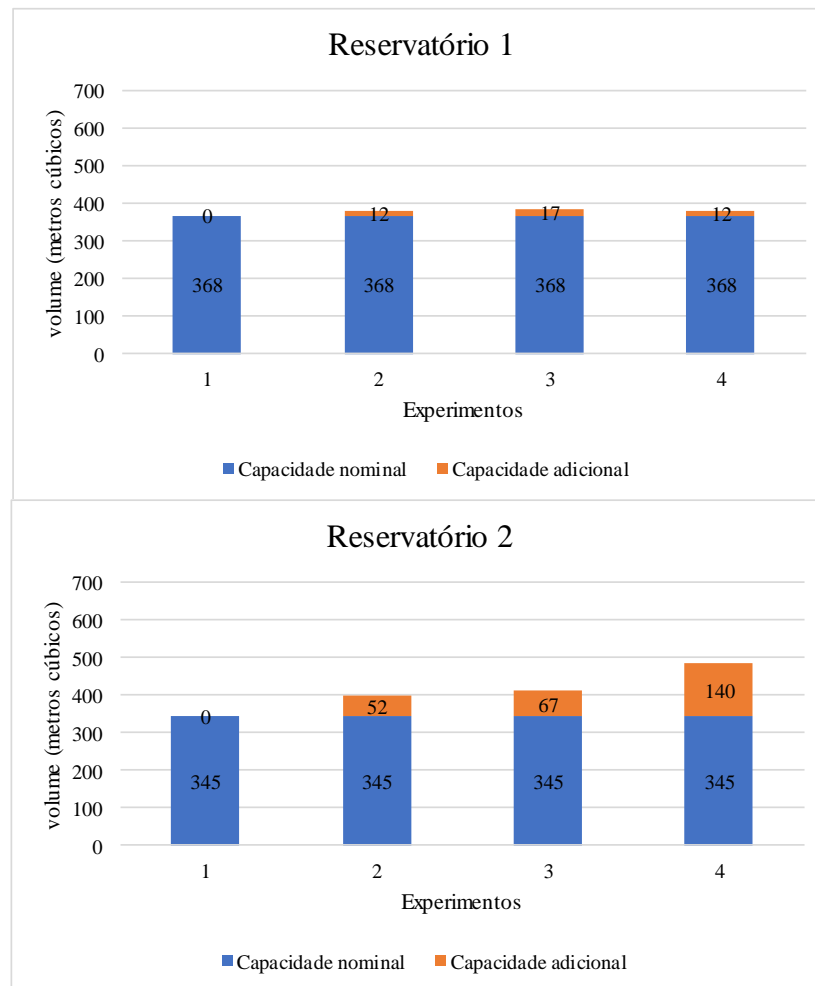
Fonte: Esta pesquisa (2018)

Pela Figura 8, vê-se que à medida que se cresce a probabilidade de interrupção, os investimentos em capacidades resilientes são incrementados, a fim de se diminuir os impactos nos custos do sistema. No experimento 1, os investimentos em resiliência são deixados em maior parte para depois da ocorrência do evento disruptivo (com \$1.294.900,00), isto é justificado pela alta probabilidade de não interrupção (com 90%). À medida que a probabilidade de não interrupção está diminuindo, os investimentos antes da ocorrência do evento disruptivo aumentam, onde no experimento 1 representam \$406.550,00. Quando no experimento 2, a probabilidade de não interrupção diminui para 60%, há um aumento substancial para \$2.242.200,00, e assim ocorre também no experimento 3, quando atinge \$3.273.000,00. E no experimento 4, na qual há uma alta probabilidade de interrupção, representada por 90%, os investimentos antes da ocorrência do evento disruptivo são intensificados, e chegam à \$5.543.700,00. Observa-se outro fator importante neste último experimento, na qual devido aos

altos investimentos antes da ocorrência do evento disruptivo, há uma diminuição significativa para \$1.371.800,00 nos investimentos depois da ocorrência do evento (muito próximo do experimento 1). Isto se corrobora devido aos altos investimentos antes, em capacidades resilientes, como visualizado na Figura 1, no qual esses investimentos diminuem o impacto sistêmico e depois são necessários menos investimentos para a velocidade de recuperação do sistema, como visto no decorrer dos experimentos na Figura 4.5, no qual os investimentos antes da ocorrência do evento estão crescendo e, em consequência, os investimentos depois do evento estão diminuindo. E a Figura 2 também reafirma isto, ao demonstrar através das capacidades resilientes, a possível mudança na curva de resiliência do sistema devido as diferentes capacidades. O aumento no investimento em capacidade de absorção (através de capacidade para reservatórios e tubulações adicionais) realizado antes, diminui o impacto sistêmico e depois são necessários menos investimentos em capacidade de adaptação e recuperação do sistema. Além do mais, à medida que a probabilidade de interrupção aumenta, os custos totais esperados também crescem, a fim de se diminuir o impacto sistêmico e se ter menos danos ao sistema, atendendo às necessidades da demanda.

Na Figura 9 está representado o uso da capacidade de absorção, através do aumento de capacidade adicional para os reservatórios. A partir dos dois gráficos, observa-se que no experimento 1, não há aumento de capacidade adicional devido à baixa probabilidade associada, enquanto isso nos demais experimentos ocorre aumento da capacidade adicional. Porém, há um aumento substancial para o reservatório 2. Onde isso pode ser justificado pela maior proximidade deste reservatório com o nó crítico 12, que necessita de abastecimento prioritário e/ou devido ao cenário 3 englobar a interrupção da parte Sul-Oeste da rede, impossibilitando o abastecimento através dessa área. Com isso, percebe-se a ação do modelo em atender às necessidades de interrupção da rede e de prioridade, confirmando a importância de uma distinção entre os nós e essa delimitação no modelo de resiliência. E como esperado, no experimento 4, há um maior aumento da capacidade adicional somada para os dois reservatórios, devido à alta probabilidade de interrupção e aos altos investimentos antes da ocorrência do evento, como visto na Figura 8.

Figura 9 - Capacidade adicional dos reservatórios

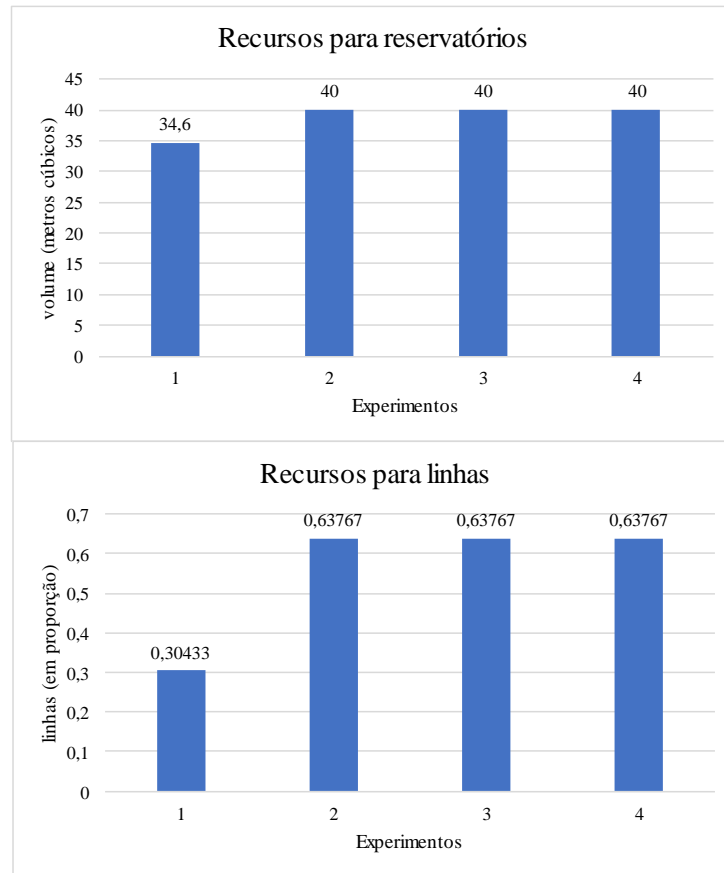


Fonte: Esta pesquisa (2018)

Na Figura 10 estão representados o aumento na capacidade de recuperação, através dos recursos de recuperação, tanto para reservatórios como para linhas de tubulação. Percebe-se que no experimento 1 ocorrem poucos investimentos em ambos os recursos de recuperação. Enquanto isso, nos demais experimentos, esses recursos são incrementados e permanecem constantes nas demais simulações. Isto se justifica pelo investimento variável em outras capacidades de resiliência, como exemplo a capacidade adicional, vista anteriormente. É importante ressaltar que estes investimentos em recursos de recuperação são realizados antes do evento, como forma de aumentar os recursos (humanos, técnicos, equipamentos, etc.) para assim incrementar a taxa de recuperação dos reservatórios e/ou linhas de tubulações. E tais investimentos são necessários para após a ocorrência da interrupção acelerar a sua recuperação para seus níveis nominais ou melhor do que antes.



Figura 10 - Recursos de recuperação

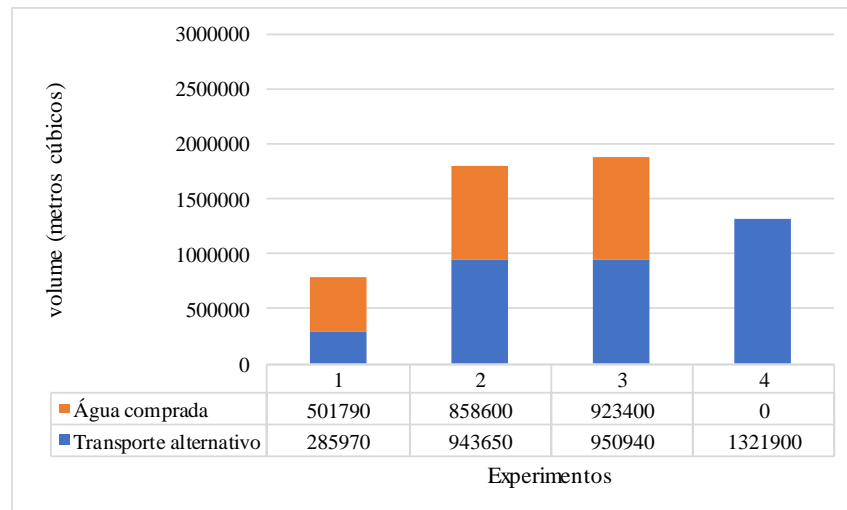


Fonte: Esta pesquisa (2018)

A Figura 11 representa os investimentos depois da ocorrência do evento, através do transporte alternativo de água ou da água comprada. Pela análise da figura, vê-se que nos três primeiros experimentos ocorrem investimentos em água comprada, porém, no último, não ocorre. Isto é refletido na Figura 8, através da diminuição dos investimentos depois da ocorrência do evento, devido ao aumento dos investimentos realizados antes. Entretanto, o transporte alternativo ocorre em todos os experimentos, no primeiro experimento a quantidade de transporte é menor do que a de água comprada, mesmo o transporte sendo mais barato, isto é justificável devido à soma do transporte com o fluxo de água não exceder a capacidade do reservatório e, como o fluxo de água não incorre em custos e neste experimento há uma baixa probabilidade associada de interrupção, então o fluxo de água é maior, não deixando muita capacidade dos reservatórios para o transporte e investindo assim, na compra de água. Nos experimentos seguintes, com exceção do experimento 4, há quase uma equiparação entre a compra de água e o transporte alternativo, devido ao baixo valor associado ao transporte, o mesmo aumenta em escala à medida que se aumenta a probabilidade de interrupção. Esses

recursos depois do evento são importantes para lidar com o impacto sistêmico restante, após a capacidade de absorção atuar. Sendo assim, funcionam como uma segunda forma de proteção do sistema, juntamente com a utilização dos recursos de recuperação vistos anteriormente.

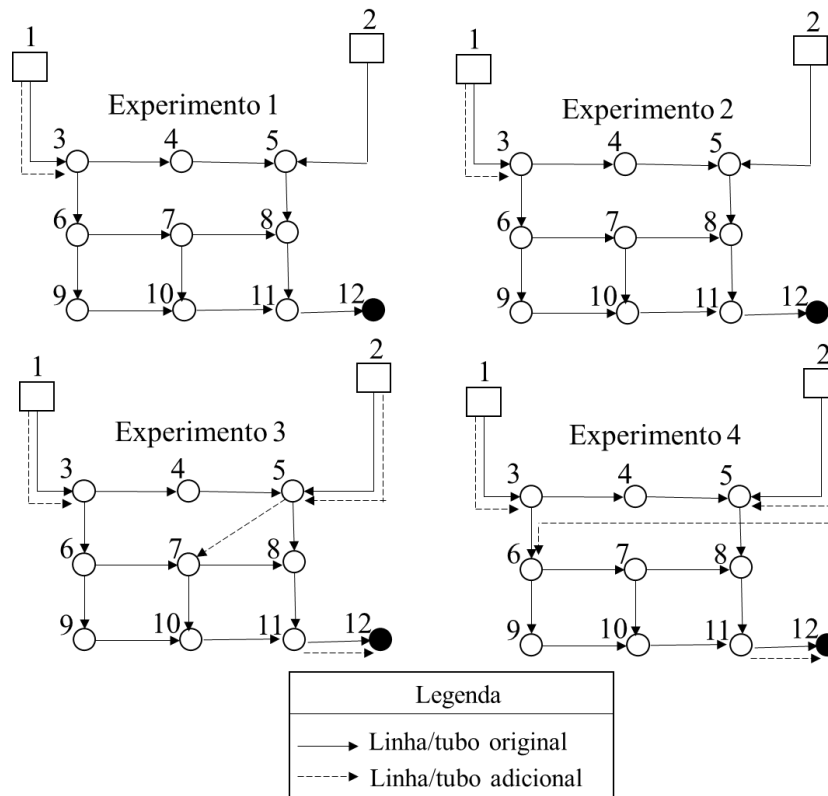
Figura 11 - Recursos depois do evento



Fonte: Esta pesquisa (2018)

Na Figura 12, veem-se as linhas adicionais para cada experimento. Nos experimentos 1 e 2, com baixas probabilidades de interrupção, apenas é adicionada uma linha redundante entre o reservatório 1 e o ponto de demanda 3. Enquanto isso, para os outros dois experimentos são adicionadas quatro linhas, ambas adicionam linha redundante dos reservatórios para seus nós primários de abastecimento (nós 3 e 5), e há linha redundante também do nó 11 para o nó 12, caracterizando exatamente o cenário 2, no qual há o evento de ato humano nas principais linhas do sistema, e como a probabilidade de ocorrência é maior nesses experimentos, logo ocorre o investimento em linhas redundantes. No experimento 3 há ainda uma ligação adicional entre o nó 5 e 7, isso pode ser justificado pelo aumento da probabilidade de interrupção e logo, o cenário 3 impedir o abastecimento do nó 7. Enquanto isso, no experimento 4, há uma ligação de *backup* do reservatório 2 diretamente para o nó 6, por causa do aumento significativo da probabilidade de interrupção e também, devido ao cenário 2 e 3 interromperem o abastecimento do nó 6. Por conseguinte, há uma ligação adicional como forma de suprir essas possíveis interrupções para o nó 6. Como visto na revisão da literatura, as linhas adicionais são importantes na ocorrência do evento disruptivo, uma vez que funcionam como caminho alternativo para continuidade do serviço aos clientes, e essas funcionam tanto como capacidade de absorção como de adaptação.

Figura 12 - Linhas adicionais



Fonte: Esta pesquisa (2018)

Por fim, em relação ao tempo de recuperação, apenas no experimento 1 há uma penalidade esperada de \$166,67 por ultrapassar o tempo estipulado no cenário 3, que se recupera apenas no tempo  $t = 4$ , enquanto nos demais cenários, a recuperação ocorre até o tempo  $t = 3$ . Nos demais experimentos, as recuperações também ocorrem até o tempo  $t = 3$ . Esse tempo é importante, pois sistemas de infraestrutura normalmente trabalham com tempos estipulados para recuperação, e a estimação desse tempo com a ocorrência de agravos financeiros é um fator primordial para os gestores hídricos. Com isso, o próximo tópico elencou questões relacionadas às variações de gravidades dos eventos, que por consequência refletem também nas decisões por parte dos gestores.

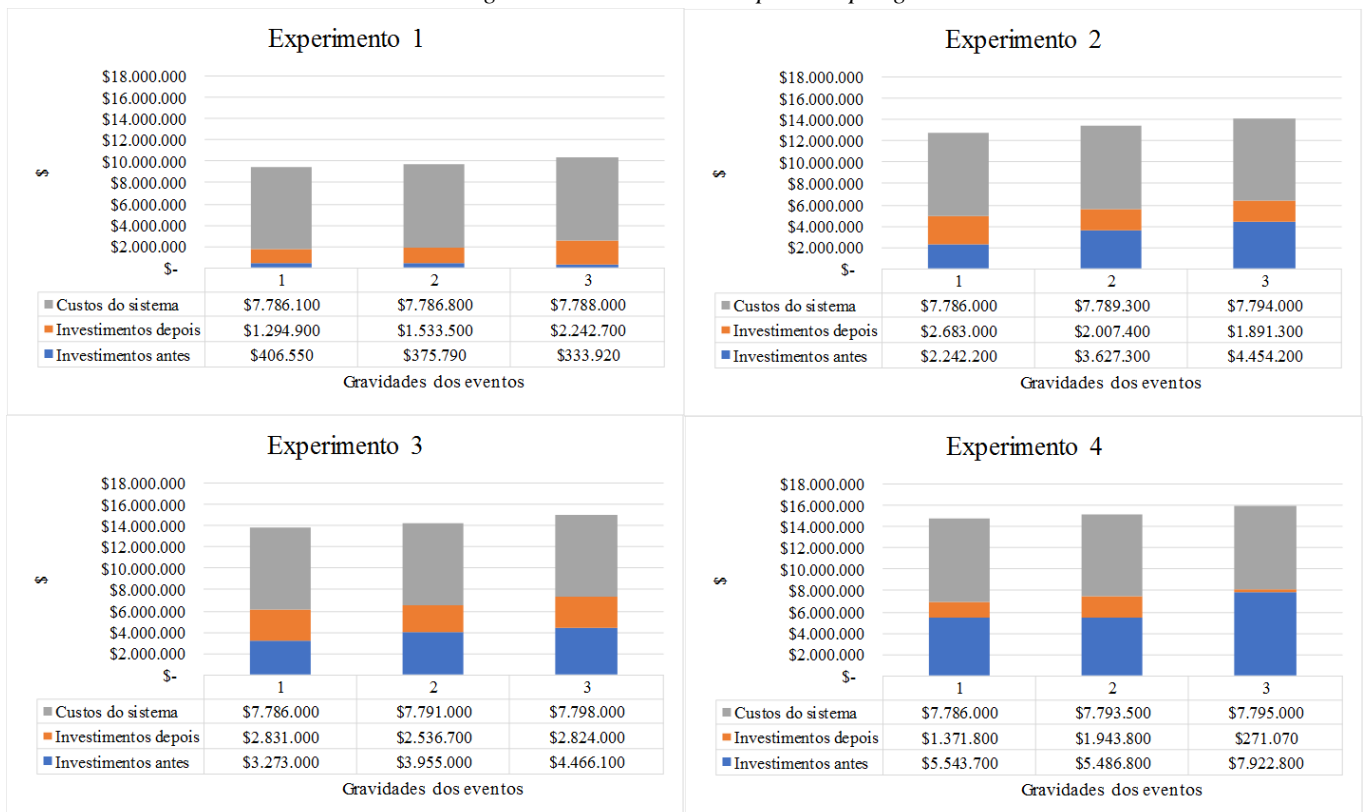
#### 4.2.1 Análise para diferentes gravidades

Como forma de analisar a complexidade das decisões relativas aos investimentos em capacidades resilientes, este tópico englobou a análise dos diferentes experimentos na ocorrência de outras gravidades para eventos disruptivos, além da gravidade 1 analisada

anteriormente. Neste tópico foram comparadas as três gravidades que constam na Tabela 5 com os mesmos dados utilizados para a gravidade 1, que foi devidamente analisada.

A Figura 13 demonstra os custos totais esperados com o sistema devido às diferentes gravidades de eventos disruptivos, na qual a gravidade 3 indica maior impacto do que a 2, e esta, por sua vez, maior impacto do que a 1. Ao se analisar por gravidade do evento, percebe-se como esperado, que na maioria dos experimentos, os custos do sistema crescem ao passar de uma gravidade para a outra, pois necessita-se de mais investimentos para conter as interrupções e os custos do sistema. No experimento 1, devido às baixas probabilidades, para todos os tipos de gravidades, obtêm-se um maior investimento depois da ocorrência do evento ao invés de antes. Nos demais experimentos há um aumento gradativo nos investimentos antes, e por consequência, uma tendência a diminuição dos investimentos depois apesar das oscilações nos valores. No experimento 4, com altas probabilidades associadas, fica nítido o alto investimento antes, a fim de se diminuir o impacto sistêmico através da capacidade de absorção e, posteriormente, utilização dos recursos de recuperação. Percebe-se assim, que não é só importante a estimação das probabilidades de ocorrência do evento, mas a gravidade do evento é essencial. A depender dela, os investimentos podem ser menores ou maiores, implicando consequências no âmbito decisório.

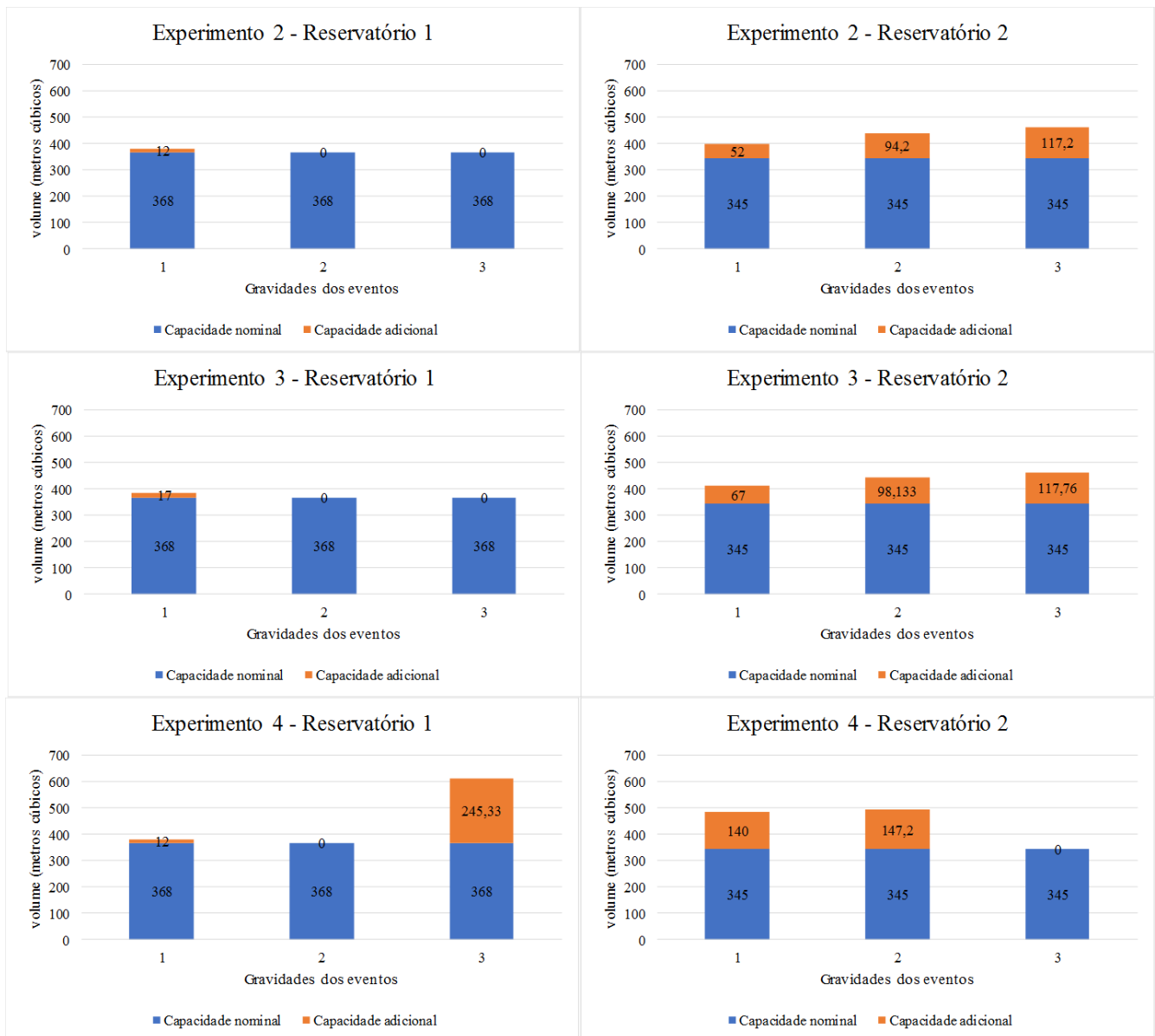
Figura 13 - Custos totais esperados por gravidades



Fonte: Esta pesquisa (2018)

Em relação à capacidade adicional dos reservatórios, para o experimento 1 não há aumento da capacidade para algum reservatório em alguma gravidade, e para os demais experimentos os seus valores adicionados constam na Figura 14. Pelas imagens vê-se que o reservatório 2, no total, é mais acionado para ter aumento de capacidade, mesmo para diferentes tipos de gravidades, isto pode ser justificado devido o reservatório 2 abastecer o nó prioritário que demanda atendimento mais rápido em relação aos demais nós. Porém, ao observar o experimento 4 vê-se que o reservatório 1 possuiu um maior aumento de capacidade adicional comprovado mais adiante, na Figura 20, em que se passou a ter mais tubulações adicionais partindo do reservatório 1 ao invés do 2. Com isso, a Figura 14 é muito interessante e instigante para os gestores, pois no reservatório 1 dos experimentos 2 e 3, ocorrem investimentos em capacidade adicional, e isso com a gravidade do evento no nível 1, logo se espera que com o aumento da gravidade do evento aumente-se também o investimento em capacidade adicional do referido reservatório. Porém, ocorre justamente o contrário, e não se obtém investimento em capacidade adicional para este reservatório. Isso ocorre devido às outras possibilidades de investimentos em capacidades e as análises de diminuição do custo total realizadas pelo modelo. E quando aumenta-se a gravidade do evento, o reservatório 1 é mais adicionado do que o outro, ressaltando-se a necessidade da inclusão e percepção das diferentes gravidades de eventos disruptivos e a sua devida inclusão no modelo resiliente.

Figura 14 - Capacidade adicional por gravidades

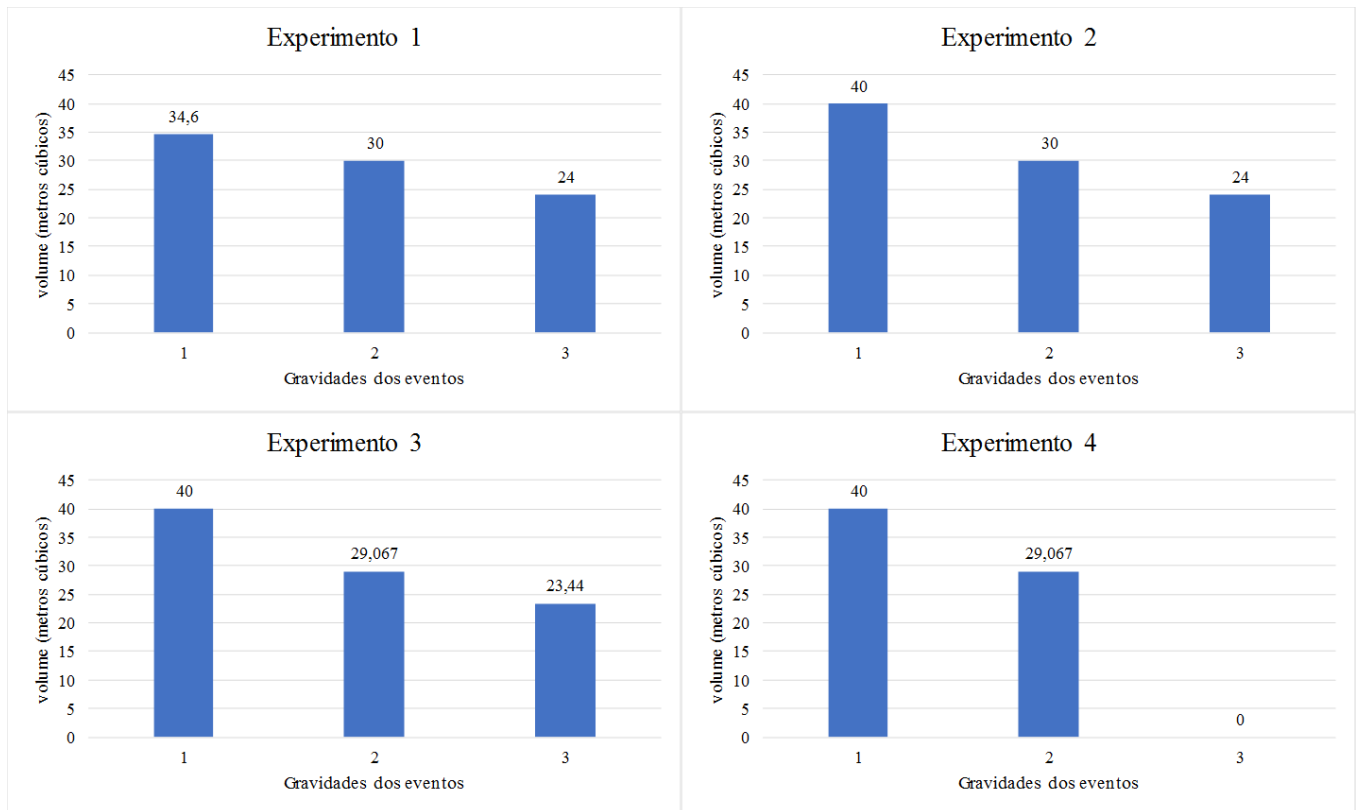


Fonte: Esta pesquisa (2018)

Quanto aos recursos de recuperação para reservatórios e linhas de tubulações, as Figuras 15 e 16 mostram que para a maioria dos experimento (exceção experimento 1 da Figura 16), essa quantidade diminui à medida em que se aumenta a gravidade do evento disruptivo, isto é justificado devido à gravidade do evento ir aumentando e não se compensar em investir em recuperação, mas sim, em outras capacidades resilientes, como a de absorção, através da capacidade adicional, que aumentou para diferentes gravidades dos eventos. Essa noção de diminuição é imprescindível pois representa um fator importante no sistema de distribuição, que são investimentos em recursos que aumentem sua taxa de recuperação. Uma vez que sem

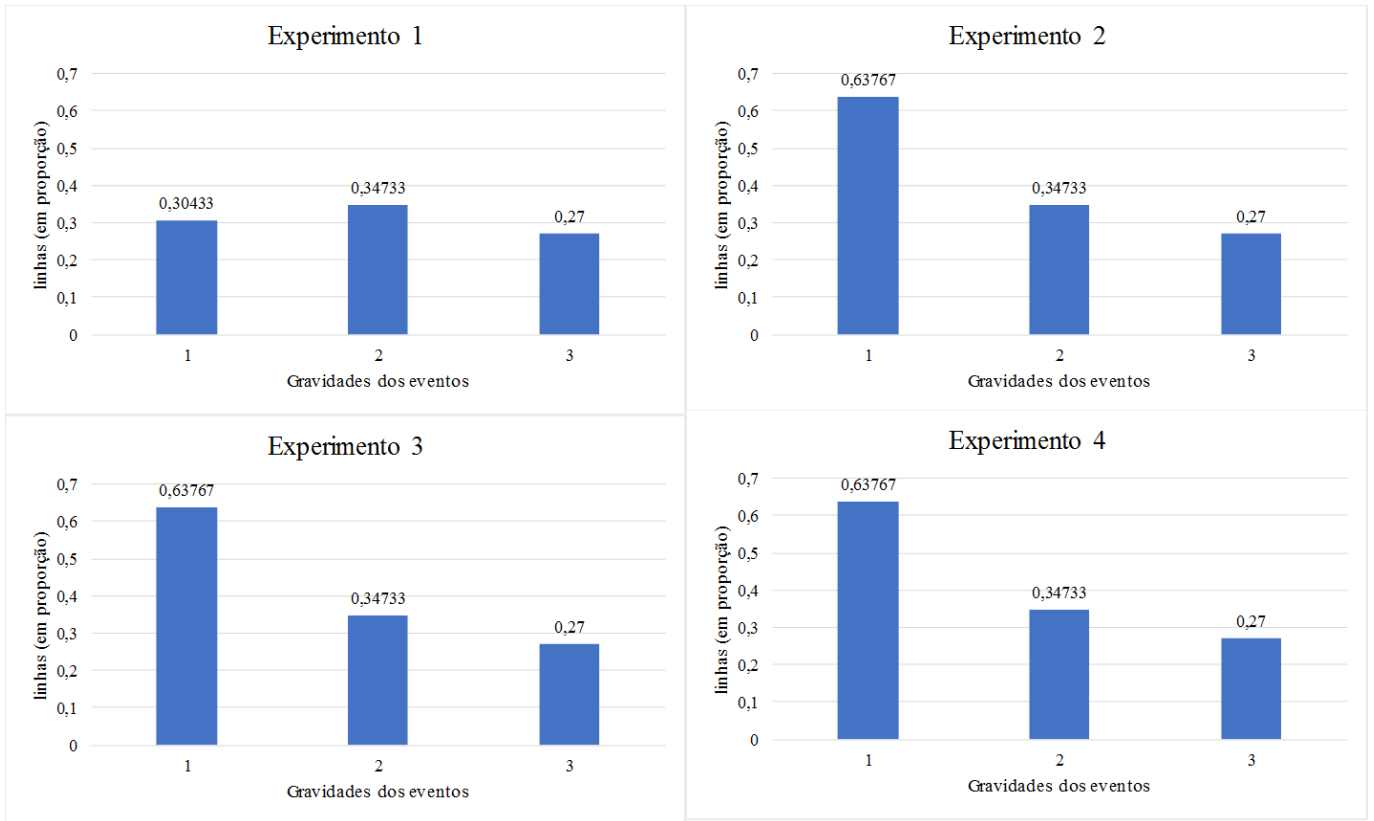
o conhecimento destes resultados pode-se pensar em um crescente investimento em taxas de recuperação do sistema, para na ocorrência do evento se ter uma rápida recuperação do mesmo. Porém, ocorre o contrário, o investimento em capacidade de recuperação não é tão necessário à medida que se cresce a gravidade do evento, devido ao investimento em capacidade de absorção conter grande parte da interrupção.

Figura 15 - Recursos de recuperação para reservatórios



Fonte: Esta pesquisa (2018)

Figura 16 - Recursos de recuperação para linhas

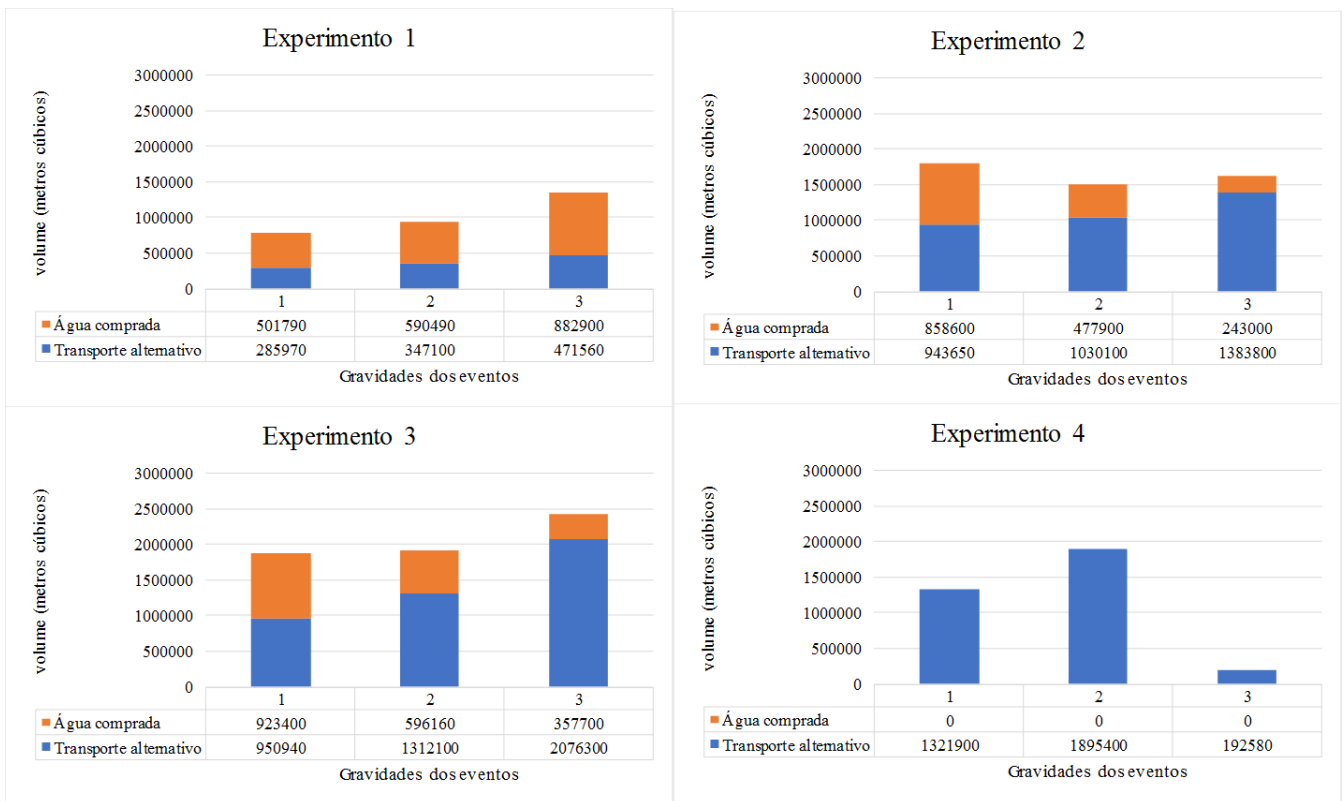


Fonte: Esta pesquisa (2018)

Na Figura 17 tem-se os investimentos com água comprada e transporte alternativo. Devido ao aumento das probabilidades associadas para cada experimento, a quantidade de transporte alternativo cresce, ao contrário da água comprada, isso se deve ao baixo valor daquele quando comparado com este. Na gravidade 3 do experimento 4, há uma diminuição acentuada do transporte alternativo devido aos altos investimentos antes da ocorrência do evento, como forma de contornar o alto impacto atrelado à gravidade do evento disruptivo. Com isso, corrobora-se mais uma vez, que não há investimentos iguais para diferentes gravidades de eventos, cada uma possui um impacto sistêmico diferenciado e necessita de diferentes valores para cada capacidade resiliente, sendo, portanto, necessária essa compreensão por parte dos decisores na hora da alocação dos investimentos.



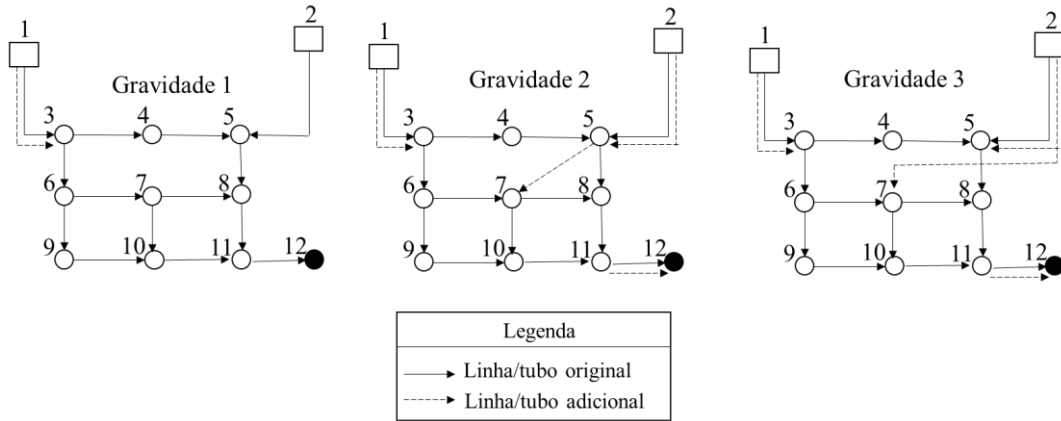
Figura 17 - Recursos depois do evento por gravidades



Fonte: Esta pesquisa (2018)

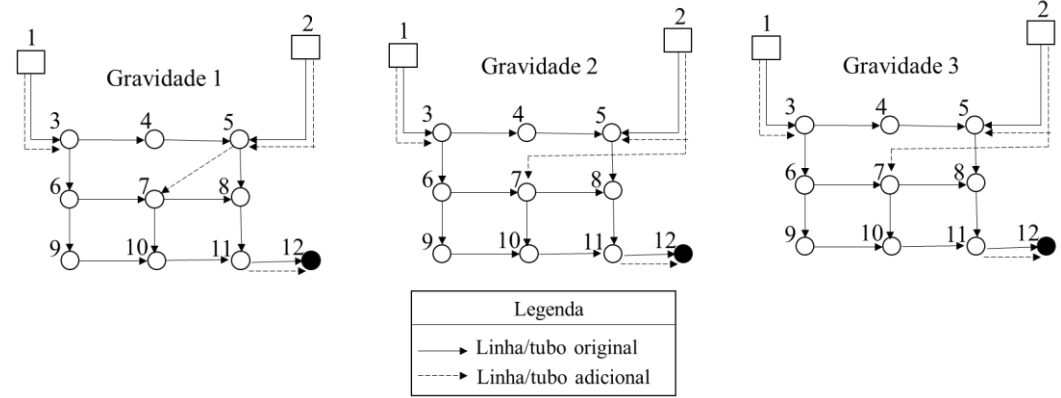
Para as linhas adicionais, no experimento 1, em todas as três gravidades, há a adição da linha redundante entre o reservatório 1 e o nó de demanda 3. Para os demais experimentos, as Figuras 18 – 20 mostram que com o aumento da gravidade dos eventos, há um aumento da quantidade de linhas adicionais, redundantes e/ou de *backup*. Com isso, nota-se um crescente investimento em recursos antes do evento disruptivo como se vêm observando ao longo destes resultados e discussões. A consideração da gravidade do evento é necessária, pois outras linhas adicionais tornam-se imprescindíveis para a continuidade do fluxo de água, e atendimento da demanda dos clientes. Na Figura 18, apesar de a probabilidade de não interrupção ser de 60%, quando se aumenta a gravidade do evento, há um significativo aumento no número das linhas adicionais. E nas Figuras 19 e 20, com o aumento da gravidade há uma mudança na disposição das ligações adicionais, que impacta diretamente no sistema, uma vez que a construção de uma linha adicional é cara e se demanda tempo, necessitando, pois, de um cuidadoso planejamento para ser realizado realmente no local em que se precisa.

Figura 18 - Linhas adicionais do experimento 2



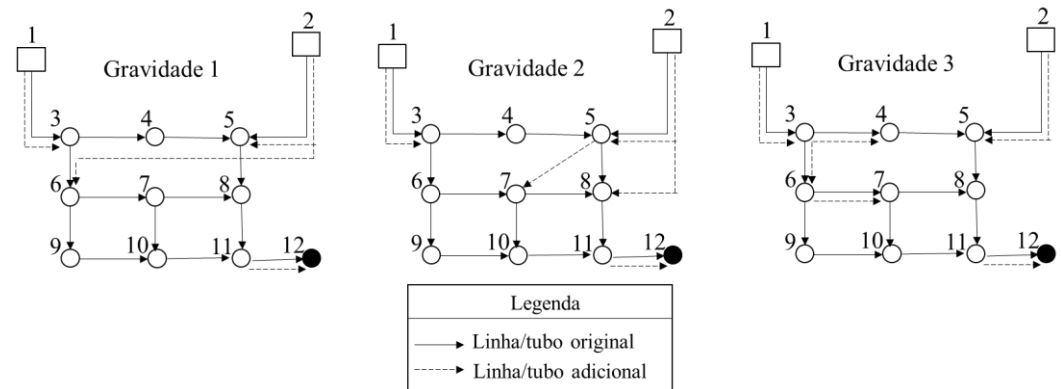
Fonte: Esta pesquisa (2018)

Figura 19 - Linhas adicionais do experimento 3



Fonte: Esta pesquisa (2018)

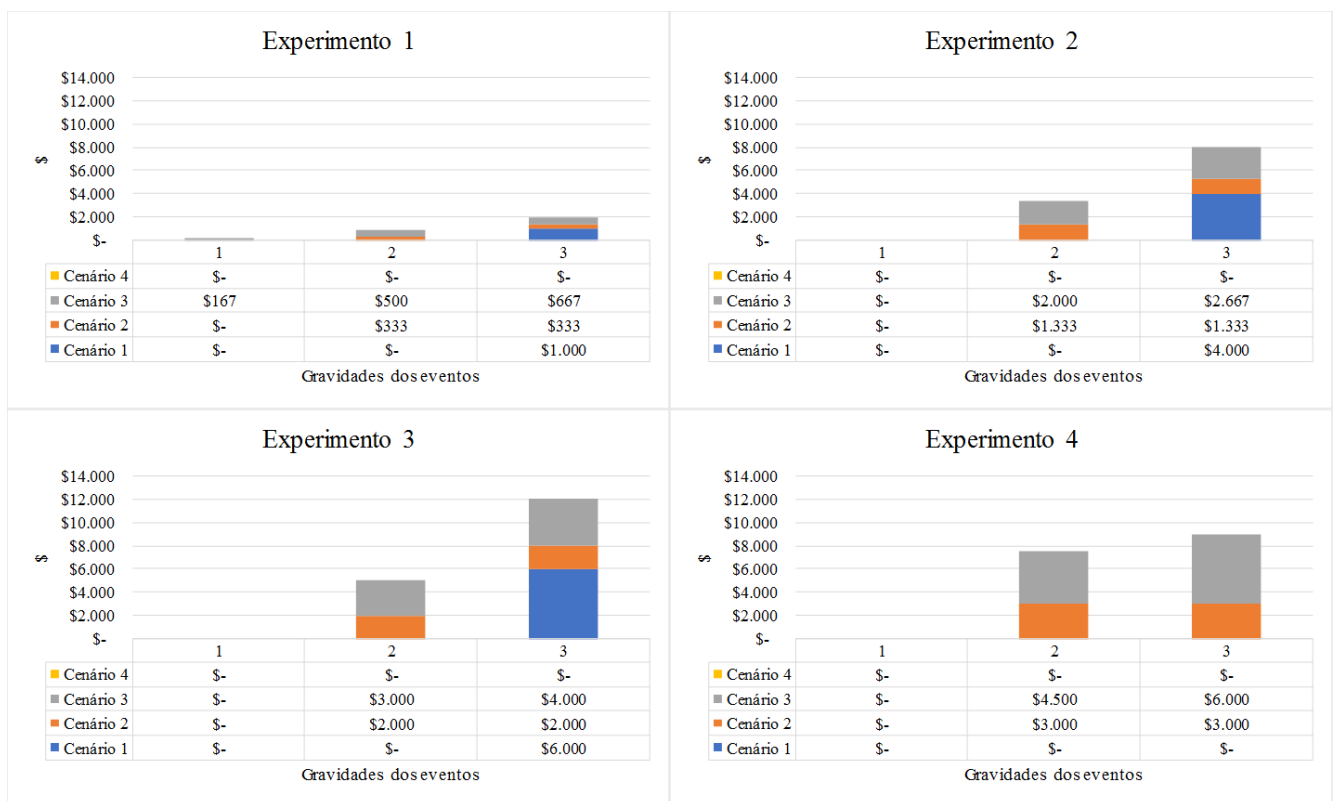
Figura 20 - Linhas adicionais do experimento 4



Fonte: Esta pesquisa (2018)

Quanto ao tempo de recuperação estipulado, na Figura 21, as penalidades aumentam à medida que se cresce a gravidade do evento e, uma vez que o impacto aumenta, torna-se mais difícil para o sistema reestabelecer-se rapidamente aos níveis nominais no tempo estipulado. Na maioria dos eventos, os cenários que ultrapassam o tempo de recuperação são os cenários 2 e 3, com este último ocasionando maiores penalidades para o sistema. Nos cenários em que não ocorrem penalidades, isso indica que o sistema se recupera dentro do tempo estabelecido de  $t = 3$ . Esse tempo de recuperação é muito importante e, por vezes, decisivo, pois gestores de infraestrutura normalmente trabalham com prazos estipulados e necessidade de continuidade do serviço o mais rápido possível e, a depender da gravidade do evento, esse tempo de recuperação pode estar comprometido como visto nestas imagens.

Figura 21 - Tempo de recuperação



Fonte: Esta pesquisa (2018)

Diante da apresentação dos resultados e discussões, o próximo capítulo finalizou com as conclusões obtidas nesta dissertação.

## 5 CONCLUSÕES

Melhorar o nível de resiliência das infraestruturas críticas é vital para garantir a continuidade do serviço à população. Embora a literatura forneça uma variedade de definições sobre o conceito de resiliência, é difícil encontrar um modelo para o projeto resiliente que defina de forma precisa como a resiliência das infraestruturas possa ser aumentada. O modelo de otimização visto na literatura, nas equações (2.1) – (2.13), considerou as capacidades resilientes para o projeto das cadeias de suprimentos, porém não utilizou as noções de tempo de recuperação estipulado, nós críticos e gravidades para eventos disruptivos. Noções estas utilizadas neste trabalho e em um contexto diferenciado, associado a sistemas de distribuição de água. Como visto, na maioria dos trabalhos, seus projetos utilizaram índices para a resiliência e/ou abordam a resiliência de forma hidráulica/técnica, sem uma consideração de investimentos para o setor gerencial, responsável pela tomada de decisão.

Neste estudo foi proposto um modelo de otimização para investimentos em resiliência do projeto das redes de água, de modo que forneceu um procedimento eficaz para a análise dos sistemas de distribuição de água em larga escala, e a função-objetivo proposta refletiu os requisitos das capacidades de resiliência identificadas na literatura. E deve-se sempre lembrar que um modelo é uma simplificação de um sistema real e não o próprio sistema real, portanto, foram assumidas suposições que devem ser seguidas. O método apresentado neste estudo ofereceu um processo estocástico para diversos eventos disruptivos que possam ocorrer nos sistemas de distribuição de água, de forma que se obtenha uma maior análise perante as diferentes probabilidades de ocorrência dos eventos associados. E este trabalho também forneceu uma visão ampla das capacidades resilientes do sistema, na qual essas refletiram as diferentes possibilidades de recursos que aumentem a resiliência hídrica do sistema, de acordo com a sua função de garantir acesso à água para a população. Como enfatizado pela Companhia das Águas, é importante o investimento em ações que garantam o fornecimento de água à população. A metodologia deste estudo permitiu analisar e classificar os diversos cenários, sendo um valioso apoio à decisão para melhorar a preparação das redes de água para interrupções e permitir o planejamento dos recursos e decisões de investimentos para melhorar a resiliência do sistema, de acordo com os cenários aos quais esteja exposto.

Através do modelo proposto, observou-se que as tendências identificadas neste trabalho podem ajudar a projetar sistemas de distribuição de água mais resilientes, por meio de uma combinação de investimentos em capacidades do sistema para fornecer serviços e atender à

demanda da sociedade após um evento de interrupção. Esta pesquisa elencou diversas questões essenciais para a resiliência que foram abordadas de forma conjunta no modelo proposto:

- ✓ Diferenciação entre clientes: críticos (instalações industriais, hospitais, etc.) e não críticos (residências);
- ✓ Nível de serviço e tempo de atendimento para clientes, devido às diferentes necessidades de cada grupo de clientes;
- ✓ A inclusão do nível de serviço englobou a possibilidade de evitar danos em cascata, uma vez que existem instalações que dependem de outras para atendimento de seu serviço, logo estas se classificam como críticas, exigindo maior fornecimento de água, com um menor tempo de início para atendimento após a interrupção;
- ✓ Demanda variável com o tempo, considerando a captura instantânea do sistema sob a condição variante no tempo, no que se relaciona às mudanças de demanda ao longo do tempo, em resposta às necessidades do consumidor e dos pontos críticos, como exemplo, os focos de incêndios;
- ✓ Magnitude do impacto e diferentes respostas do sistema para esse impacto, como diferentes taxas de recuperação, uma vez que diferentes gravidades de eventos, resultam em diferentes impactos no sistema, retratando dessa forma a realidade inerente para esses sistemas;
- ✓ Tempo de recuperação do sistema, caracterizando um ponto importante para se estimar quando o sistema retorna para seus níveis nominais ou aos níveis estabelecidos após a ocorrência da disrupção.

No que tange à capacidade de absorção, refletida pela possibilidade de serviço normal mantido apesar das interrupções, o modelo retratou essa capacidade, uma vez que os reservatórios necessitam de determinada quantidade de água para seu funcionamento, e quando atingido por uma interrupção (vazamento) se tornam inoperantes até a sua recuperação. A capacidade de adaptação no modelo permitiu após a ocorrência do evento, a possibilidade de se ter transporte alternativo de água e/ou a compra de água e também, juntamente com a de absorção, a possibilidade de caminhos alternativos (redundância) na rede de água a serem instalados antes da ocorrência do evento. E a capacidade de recuperação elencou investimentos em aumento da taxa de recuperação do sistema, de acordo com seu limite determinado pela gravidade do evento disruptivo. Reitera-se que, para este estudo, as capacidades de adaptação e recuperação, têm em maior parte, seus investimentos realizados antes da ocorrência do evento

e sua utilização é realizada depois, como forma de aumentar a velocidade de recuperação do sistema. Em contrário, a capacidade de absorção tem seus recursos utilizados antes, como forma de atenuar o impacto sistêmico.

Eventos extremos estão associados a uma probabilidade muito baixa de ocorrência, como rupturas em redes de tubulação de água devido a terremotos, conforme analisado neste estudo. Apesar de sua baixa probabilidade de acontecer, tais eventos devem ter impactos severos, que precisam ser avaliados para apontar a falta de resiliência dos sistemas de distribuição de água. Essa avaliação é importante para os tomadores de decisão pois podem ocorrer efeitos em cascata e com isso devem ser incluídos no planejamento estratégico (de longo prazo) das empresas de serviços de água. O modelo proposto englobou isto e, pode também ser usado por um gestor de recursos hídricos para permitir apontar diversos outros cenários críticos possíveis e probabilidades de ocorrência associadas, bem como diferentes níveis de serviços e tempos de recuperação e atendimento. Caracterizando assim, uma importância significativa para avaliar corretamente as consequências dos trabalhos de reparo após um desastre, permitindo o planejamento de tempo adequado de intervenção, e todas as medidas necessárias para reduzir interrupções aos clientes e o tempo de recuperação às condições normais de funcionamento, aumentando assim, a resiliência da rede e a satisfação da população.

Depois do modelo proposto, um exemplo numérico da literatura foi usado para demonstrar o desempenho do modelo e, com base nos resultados computacionais, as principais conclusões podem ser estabelecidas:

- ✓ A aplicação da resiliência, por meio de suas capacidades resilientes, são fundamentais na presença de interrupções no sistema de distribuição de água, uma vez que atuam diretamente no tempo de recuperação e no impacto no sistema;
- ✓ À medida em que se aumenta a probabilidade de interrupção na rede de água e a gravidade do evento, mais investimentos são necessários, e desses, a maior parte é destinada para ser realizada antes do evento disruptivo, como forma de atenuar o impacto sistêmico e, assim, ter uma maior velocidade de recuperação do sistema;
- ✓ Devido aos investimentos antes do evento, a capacidade adicional, os recursos de recuperação e as linhas adicionais aumentam com o crescimento da probabilidade, porém, em relação ao aumento da gravidade do evento, os recursos de recuperação decrescem, demonstrando assim, uma implicação a ser observada pelos gestores hídricos;

- ✓ Como ilustrado pelos resultados da análise dos eventos disruptivos no sistema de distribuição de água, algumas linhas de tubulações são consideradas mais essenciais ao funcionamento da rede do que outras e, em consequência, exigem redundância apesar das baixas probabilidades associadas à ocorrência do evento disruptivo;
- ✓ Quanto aos investimentos depois do evento, estes decrescem com o aumento da probabilidade e da gravidade do evento, isto se deve ao aumento dos investimentos antes da ocorrência do evento, como forma de conter o impacto sistêmico. Logo, são necessários menos investimentos antes da ocorrência do evento;
- ✓ E conforme se aumenta a gravidade do evento, o tempo estipulado para recuperação do sistema passa a se tornar crítico e mais evidente nos resultados do modelo, o que no âmbito gerencial é necessário um monitoramento desse tempo, pois incorre em custos adicionais ao sistema, tornando-se um agravador na tomada de decisões.

Esta dissertação ilustrou o caso particular dos sistemas de distribuição de água e tais sistemas geralmente não são redundantes devido ao alto custo. Porém, na presença de eventos perturbadores torna-se imprescindível a consideração da redundância e de outros meios para minimização do impacto desses eventos, bem como sua rápida recuperação. Por conseguinte, a importância da análise dessas capacidades de resiliência tem um grande impacto na tomada de decisão dos gestores. E diante das profundas incertezas que os tomadores de decisão enfrentam, é necessária uma nova abordagem de planejamento que resulte em planos que funcionem satisfatoriamente sob uma ampla variedade de futuros e possam ser adaptados ao longo do tempo às condições futuras imprevistas. Dessa forma, esta pesquisa fornece orientações para investimentos em resiliência de projetos de distribuição de água, na forma de aumento de suas capacidades resilientes, ao mesmo tempo em que se consideram a ocorrência de eventos disruptivos no sistema em análise. Pois como relatado pela Companhia das Águas, na Pergunta 17, as prioridades precisam ser estabelecidas, e com isso um adequado modelo que indique em quais ações investir torna-se imprescindível no gerenciamento hídrico para a correta destinação das verbas financeiras. Espera-se que os resultados deste estudo forneçam orientações úteis para ampliar o escopo do estudo sobre a avaliação da resiliência de distribuição de água, e o próximo subcapítulo enfatizou estas questões.

## 5.1 Limitações e pesquisas futuras

Como toda pesquisa, esta possuiu algumas limitações conceituais e analíticas, que sugerem caminhos para pesquisas futuras. Conceituais no que diz respeito a novas abordagens do conceito de resiliência, por seu caráter multidisciplinar que emerge continuamente. Este estudo enfocou as três principais capacidades resilientes encontradas no âmbito da literatura, porém, reconhece-se a possibilidade de inúmeras outras vertentes de capacidades que possam ser utilizadas para trabalhos futuros. Em relação às limitações analíticas, relata-se aqui a percepção da importância do tempo de recuperação nas decisões gerenciais e com isso, sugere-se como expansão futura, uma abordagem multiobjetivo, de forma que o tempo de recuperação caracterize uma segunda função a ser minimizada, permitindo que os tomadores de decisão atribuam valores com base nas curvas de *trade-off* entre os diferentes objetivos. E também a possibilidade da inclusão de uma restrição de limitação orçamentária, como forma de se perceber a variação dos investimentos propostos devido às questões de limites financeiros disponíveis pelo sistema de distribuição de água.

Além do mais, enfatiza-se a importância de que o modelo e seus resultados sejam também testados em relação a novos dados/condições operacionais e diferentes redes do sistema em análise, de forma que se aumente a sua escalabilidade de aplicação. Além disso, espera-se que essas observações sumárias, apresentadas na forma de pesquisas futuras, caracterizem um ponto de partida que estimule mais trabalhos para se entender melhor a ruptura e a resiliência de redes de distribuição de água.



## **REFERÊNCIAS**

AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, v. 100, p. 341–343, 2011.

ALJADHAI, S.; ABRAHAM, D. Quantifying the resilience of water supply infrastructure systems: the role of infrastructure interdependency. *Construction Research Congress*, 2018.

AMARASINGHE, Pradeep et al. Quantitative assessment of resilience of a water supply system under rainfall reduction due to climate change. *Journal of Hydrology*, v. 540, p. 1043–1052, 2016.

AMERICAN LIFELINES ALLIANCE (ALA). *Seismic fragility formulations for water systems: Part 1 Guidelines*. Federal Emergency Management Agency and the American Society of Civil Engineers, 2001.

AMERICAN LIFELINES ALLIANCE (ALA). *Seismic fragility formulations for water systems: Part 2 – Appendices*. Federal Emergency Management Agency and the American Society of Civil Engineers, 2005a.

AMERICAN LIFELINES ALLIANCE (ALA). *Seismic guidelines for water pipelines*. Federal Emergency Management Agency and the National Institute of Building Sciences, 2005b.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). *Infrastructure report card - A comprehensive assessment of America's infrastructure*. S.I., 2017.

ANGELER, D. G.; ALLEN, C. R. Quantifying resilience. *Journal of Applied Ecology*, v. 53, p. 617–624, 2016.

ARAL, M. M.; GUAN, J.; MASLIA, M. L. Optimal design of sensor placement in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 136, p. 5-18, 2010.

ASADZADEH, A.; KÖTTER, T. Towards urban sustainability via disaster resilience assessment: a new approach towards constructing seismic resilience metrics. *WIT Transactions on The Built Environment*, v. 168, p. 963 – 974, 2015.

ASEFA, Tirusew et al. Performance evaluation of a water resources system under varying climatic conditions: Reliability, Resilience, Vulnerability and beyond. *Journal of Hydrology*, v. 508, p. 53–65, 2014.

ATKINSON, Stuart et al. Reliability indicators for water distribution system design: comparison. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, p. 160-168, 2014.

AVEN, T. On some recent definitions and analysis frameworks for risk, vulnerability, and resilience. *Risk Analysis*, v. 31, 2011.

BABAYAN, Artem et al. Least-cost design of water distribution networks under demand uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 131, p. 375-382, 2005.

- BALAEI, Behrooz et al. Developing a framework for measuring water supply resilience. *Natural Hazards Review*, p. 19, 2018.
- BARKER, K.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E.; ROCCO, C. M. Resilience-based network component importance measures. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 117, p. 89–97, 2013.
- BAROUD, H. et al. Importance measures for inland waterway network resilience. *Transportation Research Part E*, v. 62, p. 55–67, 2014.
- BASUPI, I.; KAPELAN, Z. Flexible water distribution system design under future demand uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141, 2015.
- BATCHABANI, E.; FUAMBA, M. Optimal tank design in water distribution networks: review of literature and perspectives. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, p. 136-145, 2014.
- BEAN, D. As premissas e os pressupostos na construção conceitual de modelos. *V Seminário Internacional de Pesquisa em Educação Matemática*. Rio de Janeiro/Brasil, out. 2012.
- BERARDI, L. et al. Assessing mechanical vulnerability in water distribution networks under multiple failures. *Water Resources Research*, v. 50, p. 2586–2599, 2014.
- BHAMRA, R.; DANI, S.; BURNARD, K. Resilience: the concept, a literature review and future directions. *International Journal of Production Research*, v. 49, p. 5375–5393, 2011.
- BI, W.; DANDY, G. C.; MAIER, H. R. Use of domain knowledge to increase the convergence rate of evolutionary algorithms for optimizing the cost and resilience of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, 2016.
- BLACKMORE, J. M.; PLANT, R. A. J. Risk and resilience to enhance sustainability with application to urban water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 134, p. 224-233, 2008.
- BUTLER, David et al. Reliable, resilient and sustainable water management: the Safe & SuRe approach. *Global Challenges*, 2016.
- CARVALHO, Helena et al. Supply chain redesign for resilience using simulation. *Computers & Industrial Engineering*, v. 62, p. 329–341, 2012.
- CENTRE FOR WATER SYSTEMS. *Expansion* - Gessler 1985. Disponível em: <http://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/cws/resources/benchmarks/expansion/gessler.php>. Acesso em outubro de 2018.
- CHISOLM, E. I.; MATTHEWS, J. C. Impact of hurricanes and flooding on buried infrastructure. *Leadership Management in Engineering*, v. 12, p. 151-156, 2012.
- CHMIELEWSKI, H. et al. Response of water systems under extreme events: a comprehensive approach to modeling water system resilience. *World Environmental and Water Resources Congress*, 2016.

- CHOI, Young Hwan et al. Improving the quality of pareto optimal solutions in water distribution network design. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 143, 2017.
- CHUNG, G.; LANSEY, K.; BAYRAKSAN, G. Reliable water supply system design under uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, v. 24, p. 449–462, 2009.
- CIMELLARO, G. P.; REINHORN, A. M.; BRUNEAU, M. Seismic resilience of a health care facility. *Proceedings of the 2005 ANCEER Annual Meeting*, Jeju/Korea, november 10-13, 2005.
- CIMELLARO, G. P.; REINHORN, A. M.; BRUNEAU, M. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, v. 32, p. 3639–3649, 2010.
- CIMELLARO, G. P. et al. New resilience index for urban water distribution networks. *Journal of Structural Engineering*, v. 142, 2016.
- COMBOUL, M; GHANEM, R. Value of information in the design of resilient water distribution sensor networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139, p. 449-455, 2013.
- CUNHA, B. S. et al. Determinação de características de projeto para uma rede logística resiliente considerando o nível de serviço ao cliente. *XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, João Pessoa/PB, outubro, 2016.
- CUNHA, M. C.; SOUSA, J. J. O. Robust design of water distribution networks for a proactive risk management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 136, p. 227-236, 2010.
- CUTTER, S. L. et al. A place-based model for understanding Community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, v. 18, p. 598–606, 2008.
- CUTTER, S. L. The landscape of disaster resilience indicators in the USA. *Nat Hazards*, v. 80, p. 741–758, 2016.
- DAVIDSON, J. L et al. Interrogating resilience: toward a typology to improve its operationalization. *Ecology and Society*, v. 21, 2016.
- DAVIS, C. A. Water system service categories, post-earthquake interaction, and restoration strategies. *Earthquake Spectra*, v. 30, p. 1487–1509, 2014.
- DIAO, K.; ZHOU, Y.; RAUCH, W. Automated creation of district metered area boundaries in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139, p. 184-190, 2013.
- DIAO, Kegong et al. Twin-hierarchy decomposition for optimal design of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, 2016a.
- DIAO, Kegong et al. Global resilience analysis of water distribution systems. *Water Research*, v. 106, p. 383-393, 2016b.
- DIDIER, Max et al. Seismic resilience of water distribution and cellular communication systems after the 2015 Gorkha earthquake. *Journal of Structural Engineering*, v. 144, 2018.

- DINH, L. T. T. et al. Resilience engineering of industrial processes: Principles and contributing factors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 25, p. 233-241, 2012.
- DONGRE, S.; GUPTA, R. Optimal design of water distribution network under hydraulic uncertainties. *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, v. 3, 2017.
- DZIEDZIC, R.; KARNEY, B. W. Performance index for water distribution networks under multiple loading conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, 2016.
- FARAHMANDFAR, Z.; PIRATLA, K. R.; ANDRUS, R. D. Resilience evaluation of water supply networks against seismic hazards. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, v. 8, 2017.
- FENG, X.; SEIDER, W. D. New structure and design methodology for water networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 40, p. 6140-6146, 2001.
- FONSECA, J. J. S. *Metodologia da pesquisa científica*. Fortaleza: Editora UEC, 2002.
- FRANCIS, R.; BEKERA, B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 121, p. 90–103, 2014.
- FU, G.; KAPELAN, Z.; REED, P. Reducing the complexity of multiobjective water distribution system optimization through global sensitivity analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 138, p. 196-207, 2012.
- FU, G. et al. Optimal design of water distribution systems using many-objective visual analytics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139 p. 624-633, 2013.
- GALLOPÍN, G. C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, v. 16, p. 293–303, 2006.
- GANIN, A. A. et al. Operational resilience: concepts, design and analysis. *Scientific Reports*, 2016.
- GAY, L. F.; SINHA, S. K. Novel resilience assessment methodology for water distribution systems. *Proceedings of the Pipelines 2012 Conference*, Florida, ago. 2012.
- GERHARDT, T. E. et al. *Estrutura do projeto de pesquisa*. In: GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D.T (Org.). Métodos de pesquisa. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009.
- GHEISI, A.; NASER, G. Multistate reliability of water-distribution systems: comparison of surrogate measures. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141, 2015.
- GHELICHI, Z.; TAJIK, J.; PISHVAEE, M. S. A novel robust optimization approach for an integrated municipal water distribution system design under uncertainty: A case study of Mashhad. *Computers and Chemical Engineering*, v. 110, p. 13–34, 2018.
- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Ed. Atlas, 2007.

- GIUSTOLISI, O.; LAUCELLI, D.; COLOMBO, A. Deterministic versus stochastic design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 135, p. 117-127, 2009.
- GIUSTOLISI, O. et al. Operational and tactical management of water and energy resources in pressurized systems: Competition at WDSA 2014. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, 2016.
- GOVINDAN, K.; FATTAHI, M.; KEYVANSHOKOOH, E. Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, v. 263, p. 108–141, 2017.
- HAASNOOT, Marjolijn et al. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, v. 23, p. 485–498, 2013.
- HAMILTON, W. A. H. Resilience and the city: the water sector. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 162, p. 109-121, 2009.
- HENRY, D.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 99, p. 114–122, 2012.
- HERNANDEZ, E.; ORMSBEE, L. Segment based reliability assessment for water distribution systems under multiple failure states. *World Environmental and Water Resources Congress*, 2017.
- HERSTEIN, L. M.; FILION, Y. R.; HALL, K. R. Evaluating environmental impact in water distribution system design. *Journal Infrastructure Systems*, v. 15, p. 241-250, 2009.
- HILLIER, Frederick S. *Introdução à pesquisa operacional*. Tradução de Ariovaldo Griesi. 8. ed. São Paulo: Ed. McGraw-Hill, 2006.
- HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v. 4, p. 1-23, 1973.
- 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.
- JACKSON, S.; FERRIS, T. L. J. Resilience principles for engineered systems. *Systems Engineering*, v. 16, 2, p. 152-164, 2013.
- JEONG, G.; WICAKSONO, A.; KANG, D. Revisiting the resilience index for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143, 2017.
- JUAN-GARCÍA, P. et al. Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management: State of the art. *Water Research*, v. 115, p. 149-161, 2017.
- JUN et al. Valve distribution and impact analysis in water distribution systems. *Journal Environmental Engineering*, v. 133, p. 790-799, 2007.

- JUNG, D. *Robust and resilient water distribution systems*. Arizona, 2013. These (Doctor of Philosophy) - The University of Arizona, Arizona, 2013.
- JUNG, D.; KIM, J. H. Water distribution system design to minimize costs and maximize topological and hydraulic reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 144, 2018.
- JUNG, Donghwi et al. Robustness-based design of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, 2014.
- KADU, M. S.; GUPTA, R.; BHAVE, P. R. Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 134, p. 147-160, 2008.
- KANG, D.; LANSEY, K. Revisiting optimal water-distribution system design: issues and a heuristic hierarchical approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 138, p. 208-217, 2012.
- KANTA, L; BRUMBELOW, K. Vulnerability, risk, and mitigation assessment of water distribution systems for insufficient fire flows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139, p. 593-603, 2013.
- KIM, Y.; CHEN, Y.; LINDERMAN, K. Supply network disruption and resilience: a network structural perspective. *Journal of Operations Management*, v. 33-34, p. 43-59, 2015.
- LABAKA, L.; HERNANTES, J.; SARRIEGI, J. M. Resilience framework for critical infrastructures: Na empirical study in a nuclear plant. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 141, p. 92-105, 2015.
- LABAKA, L.; HERNANTES, J.; SARRIEGI, J. M. A holistic framework for building critical infrastructure resilience. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 103, p. 21-33, 2016.
- LAUCELLI, D.; GIUSTOLISI, O. Vulnerability assessment of water distribution networks under seismic actions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141, 2015.
- LEVALLE, R. R.; NOF, S. Y. Resilience in supply networks: definition, dimensions, and levels. *Annual Reviews in Control*, v. 43, p. 224-236, 2017.
- LI, Y.; LENCE, B. J. Estimating resilience for water resources systems. *Water Resources Research*, v. 43, 2007.
- LINKOV, Igor et al. Changing the resilience paradigm. *Nature Climate Change*, v. 4, 2014.
- LIU, Haixing et al. Reliability surrogate measures for water distribution system design: comparative analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 143, 2017.
- LUNA, P. E. R.; BALAKRISHNAN, N.; DAGLI, C. H. Post-earthquake recovery of a water distribution system: discrete event simulation using colored petri nets. *Journal Infrastructure Systems*, v. 17, p. 25-34, 2011.

- MALA-JETMAROVA, H.; SULTANOVA, N.; SAVIC, D. Lost in optimization of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental Modelling & Software*, v. 93, p. 209-254, 2017.
- MATTHEWS, J. C. Disaster resilience of critical water infrastructure systems. *Journal Structure Engineering*, v. 142, 2016.
- McDANIELS, Timothy et al. Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. *Global Environmental Change*, v. 18, p. 310–318, 2008.
- MENSAH, P.; MERKURYEV, Y. Developing a resilient supply chain. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 110, p. 309 – 319, 2014.
- MILLER, Fiona et al. Resilience and vulnerability: complementary or conflicting concepts? *Ecology and Society*, v. 15, 2010.
- MOURA, Márcio das Chagas et al. Embedding resilience in the design of the electricity supply for industrial clients. *PLoS ONE*, v. 12, 2017.
- NAN, C.; SANSAVINI, G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 157, p. 35–53, 2017.
- OSTFELD, Avi et al. The battle of the water sensor networks (BWSN): a design challenge for engineers and algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 134, p. 556-568, 2008.
- OUYANG, M.; DUEÑAS-OSORIO, L. Efficient approach to compute generalized interdependent effects between infrastructure systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 25, p. 394-406, 2011.
- PALLETI, V. R. et al. Actuator network design to mitigate contamination effects in water distribution networks. *Computers and Chemical Engineering*, v. 108, p. 194–205, 2018.
- PARK, J. et al. Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems. *Risk Analysis*, v. 33, 2013.
- PONOMAROV, S. Y.; HOLCOMB, M. C. Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, v. 20, p. 124-143, 2009.
- PRASAD, T. D.; PARK, N. Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 130, p. 73-82, 2004.
- PREIS, A.; OSTFELD, A. Multiobjective contaminant sensor network design for water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 134, p. 366-377, 2008.
- PRICE, E.; OSTFELD, A. Iterative linearization scheme for convex nonlinear equations: application to optimal operation of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139, p. 299-312, 2013.

- PRICE, E.; OSTFELD, A. Successive linear programming approach applied to BBLAWN. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, 2016.
- RAAD, D.; SINSKE, A.; VUUREN, J. V. Multiobjective optimization for water distribution system design using a hyperheuristic. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 136, p. 592-596, 2010.
- RECA, J. et al. Optimal design of gravity-fed looped water distribution networks considering the resilience index. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 134, p. 234-238, 2008.
- RIGHETTO, A. M. Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. In: Seminário de planejamento, projeto e operação de redes de abastecimento de água. *O Estado da Arte e Questões Avançadas*, João Pessoa, Brasil, 2002.
- ROACH, T.; KAPELAN, Z.; LEDBETTER, R. Resilience-based performance metrics for water resources management under uncertainty. *Advances in Water Resources*, v. 116, p. 18–28, 2018.
- SALOMONS, E. et al. The Battle of the Water Networks II. *Water Distribution Systems Analysis Conference*, Australia, 2012.
- SAMANI, H. M. V.; ZANGANEH, A. Optimization of water networks using linear programming. *Water Management*, v. 163, p. 475–485, 2010.
- SCHULTZ, M. T.; SMITH, E. R. Assessing the resilience of coastal systems: a probabilistic approach. *Journal of Coastal Research*, 2016.
- SHARIFI, A.; YAMAGATA, Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 1654–1677, 2016a.
- SHARIFI, A.; YAMAGATA, Y. On the suitability of assessment tools for guiding communities towards disaster resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 18, p. 115–124, 2016b.
- SIQUEIRA, I. P. *Redes de infraestrutura críticas: análise de desempenho e riscos dos setores de energia, petróleo, gás, água, finanças, logística e comunicações*. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2014.
- SHIN, Sangmin et al. A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems. *Water*, v. 10, 2018.
- SONI, U.; JAIN, V. Minimizing the vulnerabilities of supply chain: a new framework for enhancing the resilience. *Proceeding of the 2011 International Conference on Industrial Engineering*, p. 933–939, 2011.
- SURIBABU, C. R. Resilience-based optimal design of water distribution network. *Applied Water Science*, v. 7, p. 4055–4066, 2017.
- SWEETAPPLE, C.; FU, G.; BUTLER, D. Reliable, robust, and resilient system design framework with application to wastewater-treatment plant control. *Journal Environment Engineering*, v. 143, 2017.



- TAHA, Hamdy A. *Pesquisa operacional: uma visão geral*. Tradução de Arlete Simille Marques. 8. ed. São Paulo: Ed. Pearson Prentice Hall, 2008.
- TRAN, Huy et al. A framework for the quantitative assessment of performance-based system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 158, p. 73–84, 2017.
- TODINI, E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, v. 2, p. 115-122, 2000.
- TORII, A. J.; LOPEZ, R. H. Reliability analysis of water distribution networks using the adaptive response surface approach. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 138, p. 227-236, 2012.
- TURNQUIST, M.; VUGRIN, E. Design for resilience in infrastructure distribution networks. *Environment Systems Decisions*, v. 33, p. 104-120, 2013.
- VAIRAVAMOORTHY, K. et al. Design of water distribution systems. In: *Water Distribution Systems*. Capítulo 7. ICE Publishing, 2015.
- VASAN, A.; SIMONOVIC, S. P. Optimization of water distribution network design using differential evolution. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 136, p. 279-287, 2010.
- VUGRIN, E. D.; WARREN, D. E.; EHLEN, M. A. A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane. *Process Safety Progress*, v. 30, p. 280-290, 2011.
- WANG, C.; BLACKMORE, J. M. Resilience concepts for water resource systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 135, p. 528-536, 2009.
- WANG, Chi-Hsiang et al. Overview of resilience concepts, with application to water resource systems. *eWater Cooperative Research Centre Technical Report*, Canberra, 2009.
- WOODS, D. D. Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 141, p. 5–9, 2015.
- YAZDANI, A.; JEFFREY, P. Complex network analysis of water distribution systems. *Chaos*, v. 21, 2011.
- 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, p. 153-161, 2012a.
- YAZDANI, A.; JEFFREY, P. Water distribution system vulnerability analysis using weighted and directed network models. *Water Resources Research*, v. 48, 2012b.
- YAZDANI, A.; OTOO, R. A.; JEFFREY, P. Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: a network theory approach. *Environmental Modelling & Software*, v. 26, p. 1574-1582, 2011.
- YOO, Do Guen et al. Seismic reliability-based multiobjective design of water distribution system: sensitivity analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 143, 2017.

ZHANG, Chi et al. Exploring the relationships among reliability, resilience, and vulnerability of water supply using many-objective analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 143, 2017.

ZHANG, Xiaoge et al. Resilience-based network design under uncertainty. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 169, p. 364–379, 2018.

ZHANG, Z.; FENG, X.; QIAN, F. Studies on resilience of water networks. *Chemical Engineering Journal*, v. 147, p. 117–121, 2009.

ZHUANG, B.; LANSEY, K.; KANG, D. Resilience/availability analysis of municipal water distribution system incorporating adaptive pump operation. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 139, p. 527-537, 2013.

ZIMMERMAN, J. B.; MIHELICIC, J. R.; SMITH, J. Global stressors on water quality. *Environmental Science & Technology*, 2008.

## ***APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO***

### *1. Interrupção do fluxo de água*

**Pergunta 1** Quais problemas que possam surgir nos tubos de distribuição de água que interrompam o fluxo de água?

**Pergunta 2** Ocorrem falhas? Que tipos?

**Pergunta 3** Já ocorreu algum atentado humano nos tubos de distribuição (Exemplo: algum cidadão quebrou o tubo intencionalmente)?

**Pergunta 4** Já ocorreu algum desastre natural que interrompesse o fluxo de água?

**Pergunta 5** Quais problemas que possam surgir nos reservatórios que interrompam o fluxo de água?

### *2. Falhas em tubos e reservatórios*

**Pergunta 6** Já ocorreram de falharem mais de um tubo simultaneamente? Quantos?

**Pergunta 7** Qual o procedimento quando ocorre a falha do tubo (Exemplo: isola o tubo, fecha a válvula de fornecimento, etc)?

**Pergunta 8** Diferentes falhas nos tubos têm diferentes tempos de conserto?

**Pergunta 9** Como funcionam as equipes de conserto de tubulações? E de reservatórios?

### *3. Ações para evitar interrupção do fluxo de água*

**Pergunta 10** No sistema de distribuição tem tubos duplicados (para caso um tubo falhe, tem outro instalado no mesmo caminho para a continuidade do fluxo de água)?

**Pergunta 11** Já ocorreu de aumentar a capacidade dos reservatórios (volume) para ter maior armazenamento de água? É muito caro aumentar a capacidade dos reservatórios?

**Pergunta 12** Já precisaram comprar água de outra região para abastecer a população? Caso tenha ocorrido, qual o limite de compra de água?

**Pergunta 13** Já utilizaram caminhões-pipa para abastecer a população? Por que ocorreu essa utilização?

**Pergunta 14** Além dessas ações citadas anteriormente (duplicação de tubos, aumento dos reservatórios, compra de água e transporte por caminhões-pipa), tem outras ações que possam ser realizadas para evitar a interrupção do fluxo de água para a população?

**Pergunta 15** Vocês consideram importante o investimento em ações desse tipo, que possam evitar a interrupção do fluxo de água para a população? Por quê?

**Pergunta 16** São realizados investimentos em algumas dessas ações citadas anteriormente? E em outras ações, tem investimentos? Quais seriam essas ações?

**Pergunta 17** De onde provêm os recursos (dinheiro) para se investir no sistema de distribuição de água? Tem prioridade de investimento em alguma parte do sistema de distribuição de água?

#### 4. *Instalações essenciais*

**Pergunta 18** Tem prioridade o abastecimento de indústrias, hospitais...? Como é feito esse abastecimento? É diferenciado da rede de distribuição da população?

**Pergunta 19** O abastecimento para bombeiros é diferenciado? Como é feito?

**Pergunta 20** Essas instalações (indústrias, hospitais, bombeiros...), tem um nível mínimo de água para fornecimento diário? Tem duração de tempo na qual é necessário estar fornecendo água para essas instalações?

**Pergunta 21** Essas instalações essenciais têm contrato de fornecimento de água (Exemplo: indústrias)? Como é esse contrato? Caso não forneça a água estipulada no contrato, tem multa?