

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Bruna Finatto Canabarro

Minimização de impactos em Sistemas de Abastecimento de Água sob situações emergenciais com o auxílio de modelagem hidráulica: estudo de caso em Itajaí/SC.

Florianópolis

2021

Bruna Finatto Canabarro

Minimização de impactos em Sistemas de Abastecimento de Água sob situações emergenciais com o auxílio de modelagem hidráulica: estudo de caso em Itajaí/SC.

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Bruno Segalla Pizzolatti.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Canabarro, Bruna Finatto

Minimização de impactos em Sistemas de Abastecimento de
Água sob situações emergenciais com o auxílio de modelagem
hidráulica : estudo de caso em Itajaí/SC / Bruna Finatto
Canabarro ; orientador, Bruno Segalla Pizzolatti, 2021.

145 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Sistema de
Abastecimento de Água. 3. Modelagem hidráulica. 4.
Emergência. 5. Vulnerabilidade. I. Pizzolatti, Bruno
Segalla. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

No caso de reprodução do material ou de publicações, a diretoria de saneamento do SEMASA deverá ser informada.

diretoria.saneamento@semasaitajai.com.br

Bruna Finatto Canabarro

Minimização de impactos em Sistemas de Abastecimento de Água sob situações emergenciais com o auxílio de modelagem hidráulica: estudo de caso em Itajaí/SC.

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenharia Sanitarista e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 11 de maio de 2021.

Prof^a. Maria Elisa Magri, Dr^a.
Coordenador do Curso

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Banca Examinadora:

Diretor de Saneamento Victor Valente Silvestre, Me.
Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura – SEMASA

Eng. Felipe Domingues Petermann
PB Consultoria

Este trabalho é dedicado aos meus pais, aos colegas de profissão e à população de Itajaí.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Maria Inês, e ao meu pai, Alcyr, por todo apoio, suporte e incentivo à minha educação. Por acreditarem e me ensinarem que a educação é o que muda as pessoas e o mundo. Por possibilitarem a minha dedicação exclusiva a minha formação. Por me mostrarem que o sucesso também inclui poder aproveitar os pequenos e simples momentos da vida. Obrigada por todo esforço, abdicção, cuidado e amor para que eu pudesse chegar até aqui – e ir ainda mais longe.

Agradeço à minha irmã, Ana Paula, e ao meu irmão, Vitor Iuri, por serem meus primeiros e melhores amigos. Por me entenderem e me darem força. Por estarem sempre disponíveis quando eu precisei, independentemente de onde.

Agradeço aos meus familiares que, de diferentes formas, me incentivaram na minha formação. Agradeço à minha bisavó (*in memorian*), avós, tias, tios e sobrinha pela paciência e compreensão nos momentos em que não pude estar junto a vocês para estudar ou estagiar.

Agradeço ao meu namorado, Matheus, por toda a parceria, compreensão e carinho nos mais diversos momentos que vivenciei ao longo da graduação. Por me apoiar desde a escolha do curso, por me acolher nos dias de realização do vestibular, por toda a paciência quando eu precisava estudar – mesmo depois de ficarmos tanto tempo distantes, e por me acalmar quando eu precisava.

Agradeço aos meus amigos por toda parceria na graduação e na vida. Sou imensamente grata por todas as amizades que a graduação me trouxe. Cada um de vocês, a sua maneira e muitas vezes sem perceber, me ensinou e me fez ser uma pessoa melhor. Agradeço especialmente à Jamily e à Gabriela, por serem pessoas e amigas tão incríveis e se tornarem tão especiais na minha vida. Agradeço, também, à Amanda e à Isadora (e novamente à Jamily e à minha irmã, Ana Paula), por toda a parceria nesses momentos intensos de TCC. Agradeço à Fernanda e à Maria Eduarda, que ainda mantém todo carinho à nossa amizade ao longo de todos esses anos.

Agradeço a todos meus professores ao longo da vida, desde os do ensino fundamental até os da universidade. Todos vocês contribuíram para a minha formação, e os valorizo e os agradeço profundamente. Agradeço especialmente à Herika, que me tornou parte da sua família e me amparou nos mais diversos momentos. Agradeço ao meu orientador, Bruno, por todo apoio e disponibilidade na elaboração deste trabalho.

Agradeço ao SEMASA, especialmente ao Victor, pela disponibilidade e auxílio na elaboração deste trabalho.

Agradeço à empresa onde realizei meu estágio, especialmente ao coordenador da área, por todo o desenvolvimento proporcionado. Também agradeço ao Engº Felipe, por todas as oportunidades e ajudas.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pelo ensino público, gratuito e de qualidade. Por ter sido minha segunda casa ao longo desses anos de graduação e por todas as oportunidades. Agradeço, também, a todos os profissionais dessa instituição que contribuíram de alguma forma para o meu ensino e conforto. À todas as pessoas que tornam a UFSC um lugar tão especial, diverso e importante – e que, por isso, fez a UFSC me ensinar muito mais que engenharia. Ainda, a todos que financiam essa instituição e, por consequência, financiaram a minha graduação.

RESUMO

Sistemas de abastecimento de água estão sujeitos a situações emergenciais que podem afetar negativamente o fornecimento desse bem à população. Assim, esse trabalho teve como objetivo avaliar o impacto em um sistema de abastecimento de água sob situações emergenciais visando a proposição de estratégias para reduzir a sua vulnerabilidade, tendo como estudo de caso o sistema da cidade de Itajaí/SC. O trabalho teve como foco o conjunto de adutoras da macrodistribuição do sistema de abastecimento de água. Os riscos sob os quais cada trecho de adutora se encontra foram caracterizados. Após, as situações emergenciais foram classificadas por prioridade por meio do método multicritério de tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Definidas as condições de contorno, as situações emergenciais com prioridade alta foram simuladas no software *WaterCAD*®. Para minimizar a vulnerabilidade do sistema foram criados diferentes cenários com a proposição de alterações no sistema de abastecimento de água de Itajaí/SC. As estratégias utilizadas para a minimização dos impactos foram: ajuste nos controles operacionais de reservatórios e estações de recalque; realização de manobras operacionais entre setores e adutoras; antecipação da implantação de trechos de adutoras projetadas para etapas posteriores do projeto de adequação do sistema; e implantação de novos pequenos trechos de adutoras. Os cenários foram simulados sob as mesmas situações emergenciais, porém com diferentes estratégias de intervenção aplicadas, de maneira a quantificar e comparar os resultados com e sem alternativas emergenciais. A intervenção emergencial foi considerada eficaz quando garantiu, em pressão adequada, o acesso intermediário à água para a população afetada, igual a 50 L/hab./dia (OMS, 2017). Os resultados mostraram que o rompimento dos trechos das adutoras causou interrupção total do abastecimento dos setores a jusante em cinco dos 09 trechos rompidos. Foram analisadas 20 alternativas emergenciais para o rompimento desses 09 trechos, sendo 17 consideradas eficazes. Em apenas 01 trecho não foi identificada alternativa eficaz para minimizar os impactos causados à nível aceitável. Assim, de maneira geral, as estratégias emergenciais propostas foram eficazes para minimizar a vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água de Itajaí.

Palavras-chave: Sistema de abastecimento de água. Modelagem hidráulica. Vulnerabilidade. Emergência.

ABSTRACT

Water supply systems are subject to emergency situations that can negatively affect the provision of this resource to the population. Thus, the purpose of this work was to evaluate the impact of emergency situations on a water supply system. The study aimed to propose strategies to reduce the water supply system's vulnerability, and used as case study the Itajaí's water supply system, in Brazil. This work focused on the group of main pipelines of the system's macrodistribution. Initially, the risks associated with each section of pipeline were characterized. Later, emergency situations were classified by priority using the Analytic Hierarchy Process, a multicriteria decision-making method. Once the model inputs were defined, the emergency situations with high priority were simulated in the WaterCAD® software. In order to minimize the system's vulnerability, different scenarios were created with the proposal of changes in the Itajaí's water supply system. The strategies used to minimize the impacts were: adjustment in the operational controls of tanks and pump stations; operational maneuvers execution between zones and pipelines; anticipation of the pipelines sections implementation that were designed for later stages in the system adequacy project; and implementation of new small sections of pipelines. The scenarios were simulated under the same emergency conditions, but with different intervention strategies applied, in order to quantify and compare the results with and without the emergency strategies. The emergency strategy was considered effective when it guaranteed, with adequate pressure, intermediate access to water to the affected population, equal to 50 L/person/day. The results showed that the disruption of the pipeline sections caused total interruption of water supply to the downstream zones in five out of nine broken sections. Twenty emergency alternatives were analyzed as a way to minimize the impacts of the nine broken sections. Out of them, 17 alternatives were considered effective. In just one section it was not identified an effective alternative able to minimize the impacts caused in an acceptable level. Thus, in general, the emergency strategies considered were effective in minimizing the vulnerability of the Itajaí's water supply system.

Keywords: Water supply system. Hydraulic modeling. Emergency. Vulnerability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cálculo dos somatórios dos pesos da avaliação.....	34
Figura 2 – Matriz de comparação par a par normalizada.....	35
Figura 3 – Cálculo do autovalor.....	35
Figura 4 – Representação do princípio de conservação de energia.....	36
Figura 5 - Fluxograma metodológico.....	38
Figura 6 – Esquema geral da enumeração das adutoras.....	40
Figura 7 – Variação dos reservatórios sem emergência – destaque às 47 horas.....	47
Figura 8 – Variação dos reservatórios sem emergência – destaque às 56 horas.....	48
Figura 9 – Seção da adutora em FoFo DN 300 e em FoFo DN 250, respectivamente.	50
Figura 10 – Variação de consumo horário.....	51
Figura 11 - Variação da pressão na entrada de um setor – exemplo hipotético.....	55
Figura 12 - Mapa dos setores de abastecimento.....	59
Figura 13 - Mapa de localização das unidades.....	60
Figura 14 – Mapa das adutoras por prioridade de análise.....	68
Figura 15 - Simulações realizadas elencadas.....	73
Figura 16 – Mapa da situação emergencial na A3-T3.....	81
Figura 17 – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T3.....	83
Figura 18 – Mapa das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T2 e proposição das estratégias 03 e 07 para minimização dos impactos.....	85
Figura 19 – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T2.....	86
Figura 20 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 07 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T2.....	88
Figura 21 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 03 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T2.....	90
Figura 22 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 08 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T2.....	92
Figura 23 – Mapa da situação emergencial na A3-T4 e proposição de estratégia para minimização dos impactos.....	94

Figura 24 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 09 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T4 – sem ajustes de controle.....	96
Figura 25 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 09 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T4 – com ajustes de controle.	97
Figura 26 – Mapa das situações emergenciais 1, 2 e 3 na A6-T1 e proposição das estratégias E10, E11 e E12 para minimização dos impactos.....	99
Figura 27 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 12 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 03 na A6-T1.....	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos realizados sobre vulnerabilidade em Sistemas de Abastecimento de Água.....	29
Quadro 2 – Níveis de acesso e quantidade de água coletada.	30
Quadro 3 - ETAs, reservatórios e setores de abastecimento	57
Quadro 4 – Resumo dos resultados das simulações visando a redução da vulnerabilidade.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala numérica para aplicação do método AHP	34
Tabela 2 – Classificação da exposição.	41
Tabela 3 – Classificação da vulnerabilidade.	42
Tabela 4 – Classificação da região afetada	43
Tabela 5 – Valoração das classificações	43
Tabela 6 – Matriz de comparação dos critérios.....	44
Tabela 7 – Hierarquização dos critérios.....	44
Tabela 8 – Classificação das prioridades	44
Tabela 9 – População, demanda e pressão mínima dos setores considerando acesso intermediário.....	63
Tabela 10 – Caracterização dos setores de abastecimento	64
Tabela 11 – Matriz de prioridade	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A Adutora

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGESPISA Águas e Esgotos do Piauí

AHP *Analytic Hierarchy Process*

ARESC Agência de Regulação de Serviços Públicos de Santa Catarina

AWWA *American Water Works Association*

B Brava

BR Barra do Rio

Ca Cabeçadas

CN Cidade Nova

Co Cordeiros

DESO Companhia de Saneamento de Sergipe

EN Espinheiros Norte

ERAT Estação de Recalque de Água Tratada

ES Espinheiros Sul

ETA Estação de Tratamento de Água

F Fazenda

FoFo Ferro Fundido

hab. Habitante

I Itaipava

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

km quilômetro

L Litros

m metros

M Murta

MassDEP *Massachusetts Department of Environmental Protection*

mca metros de coluna d'água

MIN Ministério da Integração Nacional

NBR Norma Brasileira

OMS Organização Mundial da Saúde

PAE Plano de Ação Emergencial

PAHO *Pan American Health Organization*

PI Piauí

PMSB Plano Municipal de Saneamento Básico

PR Paraná

PVC Policloreto de Vinila

PVC DEFoFo Policloreto de Vinila com Diâmetro Externo equivalente a Ferro Fundido

QGIS Quantum GIS

R Reservatório

s segundo

SAA Sistema de Abastecimento de Água

SANEPAR Companhia de Saneamento do Paraná

SC Santa Catarina

SDC Secretaria de Defesa Civil

SE Sergipe

SEMASA Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura

SJo São João

SJu São Judas

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SVL São Vicente Leste

SVO São Vicente Oeste

T Trecho

Tra Travessia

TRex *Terrain Extractor*

UPA Unidade de Pronto Atendimento

VRP Válvula Redutora de Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

® Marca registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVOS	23
1.1.1	Objetivo Geral.....	23
1.1.2	Objetivos Específicos	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	VULNERABILIDADE EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA..	24
2.2	ASPECTOS LEGAIS EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS	26
2.3	EXPERIÊNCIAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA SOB EMERGÊNCIA	28
2.4	SETORIZAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE ITAJAÍ 32	
2.5	MÉTODO MULTICRITÉRIO DE TOMADA DE DECISÃO.....	33
2.6	SIMULAÇÃO HIDRÁULICA COM O SOFTWARE WATERCAD®	35
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM ESTUDO 38	
3.2	IDENTIFICAÇÃO DAS FRAGILIDADES DA MACRODISTRIBUIÇÃO.....	39
3.3	SIMULAÇÃO EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS	45
3.3.1	Controles de operação	51
3.4	PROPOSIÇÃO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1	O SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE ITAJAÍ	57
4.2	FRAGILIDADES DA MACRODISTRIBUIÇÃO.....	64
4.3	IMPACTOS NO SISTEMA EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS	71
5	CONCLUSÃO.....	103
6	RECOMENDAÇÕES.....	105

REFERÊNCIAS.....	106
APÊNDICE A – Mapa da adutora 1.....	111
APÊNDICE B – Mapa da adutora 2.....	112
APÊNDICE C – Mapa da adutora 3.....	113
APÊNDICE D – Mapa da adutora 4.....	114
APÊNDICE E – Mapa da adutora 5.....	115
APÊNDICE F – Mapa da adutora 6.....	116
APÊNDICE G – Mapa da adutora 7.....	117
APÊNDICE H – Mapa da adutora 8.....	118
APÊNDICE I – Mapa da adutora 9.....	119
APÊNDICE J – Mapa das situações emergenciais 01 e 02 na A2-T1 e proposição das estratégias 01 e 02 para minimização dos impactos.....	120
APÊNDICE K – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E1 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A2-T1	121
APÊNDICE L – Resultados da simulação onde foram propostas estratégias E1 e E2 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A2-T1.....	122
APÊNDICE M – Mapa da situação emergencial na A2-T2 e proposição das estratégias 03 e 04 para minimização dos impactos.....	123
APÊNDICE N – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T2.....	124
APÊNDICE O – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E3 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T2	125
APÊNDICE P – Resultados da simulação onde foram propostas estratégias E3 e E4 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T2.....	126
APÊNDICE Q – Mapa da situação emergencial na A2-T3 e proposição de estratégias 03 e 04 para minimização dos impactos.....	127

APÊNDICE R – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T3	128
APÊNDICE S – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E3 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T3	129
APÊNDICE T – Resultados da simulação onde foram propostas estratégias E3 e E4 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T3	130
APÊNDICE U – Mapa das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T1 e proposição de estratégias 05 e 06 para minimização dos impactos.....	131
APÊNDICE V – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E5 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T1	132
APÊNDICE W – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E6 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T1	133
APÊNDICE X – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E6 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A3-T1	134
APÊNDICE Y – Mapa das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T2 e proposição das estratégias 03 e 07 para minimização dos impactos (Figura 18)	135
APÊNDICE Z – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T2 (Figura 19)	136
APÊNDICE AA – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E7 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A3-T2.....	137
APÊNDICE BB – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E3 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A3-T2.....	138

APÊNDICE CC – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E8 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A3-T2.....	139
APÊNDICE DD – Mapa da situação emergencial na A3-T7 e proposição de estratégia 04 para minimização dos impactos.....	140
APÊNDICE EE – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E4 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T7 – sem ajustes de controle	141
APÊNDICE FF – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E4 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T7 – com ajustes de controle.....	142
APÊNDICE GG – Mapa das situações emergenciais 1, 2 e 3 na A6-T1 e proposição das estratégias 10, 11 e 12 para minimização dos impactos (Figura 26).....	143
APÊNDICE HH – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E10 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 1 na A6-T1.....	144
APÊNDICE II – Resultados da simulação onde foram propostas estratégias E10 e E11 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 2 na A6-T1.....	145

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento de água por sistema de abastecimento de água (SAA) em quantidade e qualidade adequadas é uma das principais necessidades da população, devido a sua importância à saúde e às diversas atividades humanas (TSUTIYA, 2014). A operação de sistemas de abastecimento consiste em um conjunto de ações com o objetivo de garantir o funcionamento e a eficiência de todas as unidades componentes do sistema, de modo que todos os pontos de consumo sejam plenamente abastecidos (MENESES, 2011).

Entretanto, a rotina operacional dos SAA é complexa devido a diversos fatores, dentre eles: perdas na distribuição, custos com energia elétrica, capacidade de reservação, realização de diversas manobras para serviços de manutenção e tubulações antigas em avançado estágio de deterioração (MENESES, 2011). Segundo Carrijo (2004), a operação dos sistemas de abastecimento de água não pode ser entendida como uma mera sequência de comandos exercidos sobre os equipamentos. A operação deve envolver aspectos de planejamento, controle e supervisão, bem como serviços de infraestrutura de apoio e de atendimento ao usuário.

Devido a sua complexidade, os sistemas de abastecimento de água eventualmente devem operar sob condições não ideais, a exemplo de situações emergenciais como rompimento de adutora, falhas eletromecânicas e falta de energia elétrica. Para Carrijo (2004), um sistema é confiável quando o abastecimento da população ocorre de maneira satisfatória sob as diversas condições operacionais passíveis de ocorrer.

Para enfrentar emergências que podem ocasionar falta d'água, é necessário avaliar as características das infraestruturas existentes na área de estudo e as tecnologias disponíveis que permitam resolver o problema no menor tempo e custo possível. Assim, é importante reduzir a vulnerabilidade das infraestruturas existentes e, ainda, estabelecer alternativas emergenciais para quando o sistema for afetado (NAVARRO-ROA, 2008).

Segundo Righetto (2002), com o objetivo de se obter maiores eficiências dos sistemas de distribuição de água, novas técnicas hidráulicas associadas a algoritmos de otimização estão sendo desenvolvidos no sentido de introduzir conceitos de confiabilidade no estabelecimento de regras operativas desses sistemas. Nesse sentido, modelos de simulação são ferramentas capazes de analisar e prever o comportamento hidráulico de malhas hidráulicas, por meio da criação de diversos cenários. A utilização desses modelos reduz os erros e incertezas, de maneira a evitar e solucionar problemas de operação de sistemas de abastecimento, objetivando a sua melhoria contínua (CALDO, 2015).

Nesse contexto, esse trabalho identificou as principais fragilidades do sistema de abastecimento de água do município de Itajaí/SC, com foco nas adutoras da macrodistribuição, e avaliou os impactos causados no sistema frente determinadas situações emergenciais por meio de modelagem hidráulica. Ainda, foram levantadas possíveis alterações no sistema para minimizar tais impactos. As simulações hidráulicas foram realizadas no software WaterCAD®.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto no sistema de abastecimento de água sob situações emergenciais visando a proposição de estratégias para reduzir a sua vulnerabilidade, tendo como estudo de caso o sistema de abastecimento de água de Itajaí/SC.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Identificar as principais fragilidades do sistema em termos de adutoras da macrodistribuição;
- ii. Avaliar os impactos causados no sistema devido as falhas das adutoras;
- iii. Propor meios para minimizar os impactos decorrentes de situações emergenciais;
- iv. Avaliar as alternativas propostas por meio de simulação hidráulica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VULNERABILIDADE EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Um sistema de abastecimento de água é constituído por unidades operacionais responsáveis por captar, transportar, tratar, reservar e distribuir águas (ABNT, 2017). Os componentes individuais desse sistema, como adutoras, estações de recalque e reservatórios, interagem de maneira a atingir um objetivo em comum (NAVARRO-ROA, 2008). Dessa forma, um sistema de abastecimento é um objeto complexo que pode ser discretizado para análise, ao mesmo tempo em que a forma na qual as partes interagem é que determina a sua funcionalidade (ARACIL apud NAVARRO-ROA, 2008).

Diversas condições internas e externas a um sistema de abastecimento podem afetar uma ou mais partes do mesmo, podendo constituir uma emergência. Para a *American Water Works Association* – AWWA (2001), uma emergência é qualquer evento que pode degradar a qualidade ou a quantidade da água potável disponibilizada aos consumidores. A ARESC (2020) define situações de emergência como eventos não planejados, tais como vandalismos, falhas em equipamentos mecânicos e estiagens. Já o Departamento de Proteção Ambiental de Massachusetts (MassDEP, 2007) pondera que as emergências podem ser eventos naturais ou antropogênicos, os quais danificam ou ameaçam danificar o fornecimento normal de água potável. Os efeitos desses danos podem ser sentidos em parte do sistema ou em sua totalidade e, em alguns casos, necessita de ação imediata para proteger a saúde pública. Ainda, o MassDEP (2007) categoriza as emergências em cinco níveis:

1. Nível I - problemas de rotina: incidentes com menores impactos no sistema de abastecimento, onde no máximo 10% do sistema é afetado e a recuperação do mesmo é possível em no máximo 24 horas. Exemplos: rompimento de rede e problemas mecânicos em elevatórias;
2. Nível II – alertas/emergências menores: incidentes com impactos significantes no sistema de abastecimento, onde no máximo 50% do sistema é afetado e a recuperação do mesmo é possível em no máximo 72 horas. Exemplos: rompimento de adutora, problemas mecânicos de maior porte em elevatórias e falta de produtos químicos;
3. Nível III – emergências maiores: incidentes com impactos significativos no sistema de abastecimento, onde mais de 50% do sistema é afetado e/ou a

- recuperação do mesmo demanda mais de 72 horas. Exemplos: rompimento de adutora principal, falha ou perda da estação de tratamento e atos de vandalismo.
4. Nível IV – desastres naturais: incidentes causados por eventos meteorológicos ou geológicos com impactos significantes no sistema de abastecimento, onde mais de 50% do sistema é afetado e/ou a recuperação do mesmo demanda mais de uma semana. Exemplos: inundações e deslizamentos.
 5. Nível V – desastres nucleares/atos terroristas: incidentes dificilmente controláveis em larga escala ou atos deliberadamente prejudiciais ao sistema de abastecimento. Exemplos: acidentes em plantas nucleares e contaminação proposital do manancial com materiais altamente tóxicos.

Nesse contexto, uma emergência é causada por uma combinação de fatores, os quais constituem um risco ao sistema. Segundo a Política Nacional de Defesa Civil (MIN/SDC, 2000), risco se conceitua na relação entre a probabilidade de concretização de um evento adverso ou incidente, com o grau de vulnerabilidade do sistema receptor aos efeitos gerados. Em termos de sistemas de abastecimento de água, o risco pode ser compreendido como a probabilidade de que o fornecimento de água seja interrompido devido a combinação de três fatores: perigo, exposição e vulnerabilidade de elementos do sistema ou do sistema como um todo (NAVARRO-ROA, 2008).

De acordo com Navarro-Roa (2008), perigo, que também pode ser entendido como ameaça, é o fenômeno que provoca desastres. Esse fenômeno é um agente externo com potencial de produzir instabilidade e afetar o desempenho de uma ou mais partes do sistema. O perigo pode ser de origem natural ou antropogênica. O perigo natural pode ser hidrometeorológico, como tempestades e inundações; biológico, como contaminação no manancial de captação; ou geomorfológico, como movimentação de terra e erosão fluvial. Já como exemplos de perigos antropogênicos cita-se escavação de terrenos e atos de vandalismo.

Já a exposição, ainda segundo Navarro-Roa (2008), está associada a localização dos componentes do sistema em relação a um determinado perigo. Nesse sentido, as características físicas das unidades – desde localização até qualidade construtiva – devem ser consideradas na análise de exposição, bem com as condições ambientais onde os componentes estão instalados.

O terceiro fator que compõe o risco é a vulnerabilidade. Segundo a Política Nacional de Defesa Civil (MIN/SDC, 2000), vulnerabilidade é uma condição intrínseca ao corpo ou sistema receptor do perigo, o qual interage com o evento que gera a emergência e caracteriza os efeitos adversos. Tais efeitos podem ser medidos em termos de intensidade dos danos

prováveis. Aplicado a sistemas de abastecimento de água, vulnerabilidade pode ser definida como a suscetibilidade de perda de um ou mais elementos de um sistema, devido a ocorrência de desastre (OMS/PAHO, 1998). Já Acevedo (2002) associa vulnerabilidade a capacidade relativa dos riscos afetarem o sistema, ou seja, a estabilidade do SAA frente a um determinado risco. Dessa forma, vulnerabilidade está relacionada ao impacto que um possível perigo provoca no funcionamento de parte ou do sistema como um todo. Pode-se afirmar que acerca do conceito existem duas questões: quem é vulnerável e a quê (WISNER, 2001). Para Navarro-Roa (2008), toda ação realizada para minimizar o risco tem como ponto de partida a redução da vulnerabilidade.

De maneira complementar a vulnerabilidade há a confiabilidade (NAVARRO-ROA, 2008), uma vez que esta é a probabilidade de que o fornecimento de água não seja afetado frente a um evento adverso (TUNG et al. apud NAVARRO-ROA, 2008). O desempenho de sistemas de abastecimento de água é comumente avaliado em função da sua confiabilidade (TUNG et al. apud NAVARRO-ROA, 2008).

Conforme Misirdali (2003), a confiabilidade pode ser classificada em mecânica e em hidráulica. A primeira está relacionada a possibilidade de um componente físico falhar, enquanto a segunda em função da variação de pressão e vazão na rede quando um ou mais elementos do sistema falham. De acordo com Navarro-Roa (2008), o índice de confiabilidade pode ser utilizado tanto em condições emergenciais quanto durante a elaboração de projetos, sendo a segunda situação a mais comum.

2.2 ASPECTOS LEGAIS EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS

Em termos de legislação nacional, a Lei nº 11.445/2007 (BRASIL, 2007), que estabelece a Política Nacional de Saneamento Básico, traz a necessidade de se conter nos planos de saneamento básico ações para emergências e contingências. Ainda, incube às entidades reguladoras a edição de normas para as medidas de segurança, de contingência e de emergência a serem implementadas pela prestadora de serviços.

Já nas normas técnicas NBR 12.211/1992 (ABNT, 1992), NBR 12.215-1/2015 (ABNT, 2015), NBR 12.217/1994 (ABNT, 1994) e NBR 12.218/2017 (ABNT, 2017), que normatizam projetos de sistemas de abastecimento de água, não são englobadas situações emergenciais. É recomendada a instalação de equipamentos para serem utilizados em situações emergenciais, como conexão de espera no barrilete para instalação de bomba, citada na NBR 12.214/2020 (ABNT, 2020), registros em posições estratégicas na rede, de maneira a isolar

somente o trecho afetado, e by-pass em equipamentos como válvulas redutoras de pressão – VRPs e boosters. Em relação às ações que devem ser tomadas para minimização de risco dos componentes, nas normas é indicado prever espaços livres entre paredes, pisos e tubulações, de maneira a facilitar acesso, manuseio e manutenção; prover meios para passagem de cabos em tampas de poço de sucção para evitar o esmagamento dos mesmos; e, em elevatórias sujeitas a avarias, devem ser adotadas soluções técnicas compatíveis com o risco (ABNT, 2020). Ainda, em tubulações sujeitas a transientes hidráulicos significativos devem ser avaliadas suas pressões e previstos dispositivos de proteção; devem ser adotadas caixas de proteção para VRPs em áreas com risco de vandalismo (ABNT, 2017); e em tubulações sujeitas a avarias devem ser adotadas soluções técnicas compatíveis com o risco (ABNT, 2015; ABNT, 2017). Apesar de situações emergenciais não serem amplamente englobadas nas normas técnicas mencionadas, o seguimento às mesmas durante o dimensionamento de sistemas de abastecimento pode promover o aumento da confiabilidade.

Em âmbito estadual, a Agência de Regulação de Serviços Públicos de Santa Catarina – ARESC estabelece, na resolução nº 046/2016 (ARESC, 2016), a responsabilidade do prestador de serviços sobre o bom estado de segurança das unidades pertencentes ao sistema de abastecimento de água. Para tanto, devem ser observados fatores que podem ocasionar acidentes que prejudiquem o funcionamento normal do sistema, devendo o prestador estar preparado para solucioná-los. Dessa forma, a resolução exige a elaboração de planos de emergência e contingência para os casos de paralisações do fornecimento de água para a população, com vistas a minimização do problema. Destaca, ainda, que o plano de emergência deve garantir o suprimento aos serviços essenciais quando a paralisação persistir por mais de 18 horas.

De maneira a estabelecer diretrizes para a elaboração e a implementação do plano de contingência e emergências dos serviços de abastecimento de água, a ARESC também possui a resolução nº 156/2020 (ARESC, 2020). Nesta resolução a Agência de Regulação define plano de emergência e contingência como o conjunto de procedimentos adotados pelo prestador de serviços para prevenir e solucionar as emergências, estados de calamidades ou eventos programados. Para tanto, o plano deverá conter a descrição do sistema, a análise dos riscos e vulnerabilidades, a definição das medidas preventivas e mitigadoras e o estabelecimento de diretrizes para medidas de racionamentos e suspensão do abastecimento, dentre outros pontos. Ainda, a resolução define que o plano deve ser elaborado e revisado no mínimo a cada dois anos.

Na esfera municipal, o Plano Municipal de Saneamento Básico de Itajaí/SC – PMSB (HABITARK, 2012) traz, conforme exigido pela Lei nº 11.445/2007 (BRASIL, 2007), as medidas de contingência a serem tomadas frente eventuais ocorrências atípicas no SAA do município. Dentre as medidas elencadas pelo PMSB (HABITARK, 2012) encontra-se a setorização da rede de distribuição para redução de trechos afetados em casos de rompimentos de adutoras e redes de água; a implementação de rodízios de abastecimento; e o controle do volume disponível em reservatórios.

Por fim, cumprindo as legislações existentes, o sistema de abastecimento de água existente de Itajaí conta com um Plano de Ação Emergencial – PAE (ECOLIBRA, 2020). Dentre os objetivos do PAE (ECOLIBRA, 2020) consta o estabelecimento de procedimentos a serem adotados na ocorrência de adversidades e a indicação de ações que visam evitar ocorrências adversas. Por exemplo, no caso da ruptura e vazamentos na rede de distribuição, o PAE (ECOLIBRA, 2020) indica como procedimentos a serem seguidos o acionamento da equipe de campo para realizar o reparo, a divulgação da situação para a população por meio de mídias, o rodízio de distribuição, o acionamento de caminhões pipa para o abastecimento de pontos críticos e/ou a utilização de fontes de água alternativas. Como medida preventiva e/ou de salva guarda, o PAE (ECOLIBRA, 2020) traz a garantia de estoque de materiais e peças mais comumente empregadas, a prontidão da equipe de manutenção, a ampliação da rede telemétrica e a implantação do manual de operação do sistema de telemetria.

Navarro-Roa (2008), ao analisar a política de gestão de risco em sistemas de abastecimento de água no âmbito nacional, considera que há uma fragilidade da mesma. Entretanto, segundo o autor, essa deficiência não é tão evidente na prática devido a capacidade administrativa dos operadores de grandes sistemas de abastecimento. Ainda, devido a importância do recurso, normalmente há uma rápida mobilização de recursos financeiros para solucionar as situações emergenciais. Todavia uma falta de preparo pode significar uma exposição injustificada à condições emergenciais previsíveis, bem como uma aplicação ineficiente de recursos.

2.3 EXPERIÊNCIAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA SOB EMERGÊNCIA

Todo SAA está sob o risco de possíveis ameaças, sejam elas naturais ou antrópicas. A análise do risco dessa infraestrutura é de difícil avaliação, uma vez que varia de acordo com as particularidades de cada sistema – escala, estruturas existentes e configurações (HAIMES et

al., 1998). Por se tratar de um tema intrínseco e inerente a todos os sistemas de abastecimento de água, se encontram diversos estudos avaliando a vulnerabilidade de diversos sistemas em diferentes localidades. Alguns desses estudos são apresentados no Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 – Estudos realizados sobre vulnerabilidade em Sistemas de Abastecimento de Água.

Título	Local de análise	Autor e ano de publicação
Avaliação da vulnerabilidade hidráulica de um sistema de abastecimento de água: o caso da cidade de Santiago de los Caballeros, República Dominicana	Cidade de Santiago de los Caballeros, República Dominicana	Navarro-Roa (2008)
<i>Risco de cenários de dano vulneráveis de redes de abastecimento de água</i>	Sistemas em geral. Publicação em Portugal	Pinto et al. (2011)
<i>Avaliação do risco da degradação da qualidade da água em sistemas públicos de abastecimento</i>	Sistemas em geral. Publicação em Portugal	Santos et al. (2011)
<i>Aplicação do método bow-tie no controlo do risco em serviços de abastecimento de água</i>	Sistemas em geral. Publicação em Portugal	Santos et al. (2013)
Vulnerabilidade ao desabastecimento em situação de intermitência no abastecimento de água	Campina Grande, Brasil	Diniz (2019)
<i>Gestão de riscos em sistemas de abastecimento de água – uma abordagem</i>	Sistemas em geral. Publicação em Portugal	Pires (2020)

Fonte: Autoria própria (2021).

No relatório do Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, disponibilizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2019), são apresentados dados sobre a qualidade dos serviços ofertados no Brasil. Nesse documento constam diversas informações repassadas pelas prestadoras de serviços para o SNIS, dentre elas a quantidade de interrupções programadas e não programadas (paralisações) realizadas em cada SAA. As interrupções não programadas compiladas no relatório são referentes a todas àquelas ocorridas no ano de 2019 que tiveram duração maior ou igual a 06 horas, e são apresentadas por tipo de prestador de serviço: regional, microrregional e local. Em relação aos prestadores de serviço regionais, o SNIS (2019) avalia que houve inconsistências nas informações fornecidas por alguns dessas prestadoras, como AGESPISA/PI, DESO/SE e SANEPAR/PR. Esses e outros prestadores informaram não ter ocorrido uma única paralisação em seus sistemas de distribuição em todos os seus municípios – fato que o SNIS (2019) julga inconsistente dada a quantidade de sistemas que esses prestadores ministram. Já em relação aos prestadores locais –

categoria onde o SEMASA se encontra –, cerca de 36% relataram não ter ocorrido nenhuma paralisação; 51% relataram ter ocorrido entre 01 e 20 paralisações; e 13% relataram ter ocorrido mais de 20 paralisações. Dentre os prestadores locais que relataram mais de 20 paralisações, 09 destacam-se por indicarem mais de 365 paralisações no ano.

Ainda, em relação ao rompimento de tubulações, muitos sistemas de abastecimento de água, no Brasil e no mundo, possuem infraestruturas antigas. Variação de temperatura, oscilação de pressão, vibração decorrente do tráfego e acidentes resultam frequentemente em rompimento de tubulações (CLARK; DEININGER, 2000). De acordo com Tsutyia (2014), vazamentos nessas tubulações mais antigas devem ser consertados, sendo indicada a sua substituição somente quando as mesmas se encontrarem muito deterioradas ou com sua capacidade de adução inferior a requerida.

Mesmo em sistemas existentes bem consolidados ainda há a possibilidade de se desenvolver melhorias, com vistas a um maior controle do bem ofertado. Nesse panorama de evolução são estudadas as questões relacionadas a garantia do abastecimento público, em termos de resiliência do sistema, visto que os fatores não controláveis que podem afetar o SAA muitas vezes são múltiplos, variados e aleatórios. (PIRES, 2020). Uma das maneiras de se aumentar a resiliência de um SAA é garantir o abastecimento de água da população, mesmo que em nível inferior ao desejado, durante as situações emergenciais.

O volume de água necessário para garantir a saúde de um indivíduo varia amplamente (OMS, 2017). A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2017) considera dois cenários acerca do volume de água mínimo por pessoa: no primeiro se considera apenas consumo direto de água (hidratação) e preparação de alimentos; no segundo soma-se o volume necessário para higiene pessoal e doméstica. No Quadro 2 são apresentados os níveis de acesso à água, a distância e tempo até esse acesso, o volume estimado de água coletada e o risco à saúde pública por má higiene devido ao nível de acesso ao recurso.

Quadro 2 – Níveis de acesso e quantidade de água coletada.

Nível de acesso	Distância e tempo até a fonte de recurso	Volume estimado de água coletada	Risco à saúde pública por má higiene
Sem acesso	Mais de 1 km e/ou mais de 30 minutos de busca	Muito baixo: 5 L/hab./dia	Muito alto: higiene comprometida; consumo básico pode ser comprometido
Acesso básico	Menos de 1 km e/ou menos de 30 minutos de busca	Em média 20 L/hab./dia	Alto: higiene pode ser comprometida; lavagem de roupas pode ocorrer fora do lote

Nível de acesso	Distância e tempo até a fonte de recurso	Volume estimado de água coletada	Risco à saúde pública por má higiene
Acesso intermediário	Água disponibilizada no lote em pelo menos uma torneira da área externa	Em média 50 L/hab./dia	Baixo: higiene não costuma ser comprometida; lavagem de roupas costuma ocorrer no lote
Acesso ótimo	Água disponibilizada no lote em diversas torneiras dentro da residência	Em média 100 a 200 L/hab./dia	Muito baixo: higiene não costuma ser comprometida; lavagem de roupas ocorre no lote

Fonte: Adaptado de Organização Mundial da Saúde (2017).

De acordo com Sphere (2018), em situações emergenciais é importante atentar não somente a quantidade de água fornecida, mas também a sua qualidade. Entretanto, a prioridade nesses momentos é o fornecimento de quantidade mínima adequada, mesmo que em qualidade mediana.

Em relação ao tempo de reestabelecimento do fornecimento de água após sua interrupção, AWWA (2001) apresenta alguns valores orientativos. Enquanto para hospitais o abastecimento não deve ser interrompido, a água disponibilizada para consumo direto (hidratação), higiene pessoal e disposição de esgoto deve ser reestabelecida em até 72 horas. Entretanto, a estimativa do tempo de duração de uma falha ou emergência em sistemas de abastecimento não é facilmente determinável e depende de diversos fatores. Tais fatores são apresentados no Guia para Análise de Vulnerabilidades da Organização Panamericana de Saúde (OMS/PAHO, 1998): tipo e magnitude do dano após análise detalhada do mesmo; as necessidades e disponibilidades de recursos humanos, materiais, financeiros e de transporte para reparo do dano; e o acesso ao local do dano.

Dessa forma, o tempo de reabilitação de uma unidade ou do sistema como um todo depende do que foi danificado. Como exemplo, a Organização Panamericana de Saúde (OMS/PAHO, 1998) apresenta o cálculo a ser realizado para determinar o tempo de reabilitação de uma adutora rompida por deslizamento de terra. Esse período é estimado pelo somatório dos seguintes tempos: de identificação da avaria, de acesso ao local afetado, de reparo, da concretização do reparo, de obtenção dos componentes ou partes dos mesmos (significativo para equipamentos não estocados ou raros), e do início da operação até a estabilização do sistema.

Entretanto, devido à dificuldade em estimar ou determinar alguns dos tempos indicados na situação emergencial, é comum a utilização de estimativas feitas para tempos

normais. Para tanto, deve-se avaliar o histórico de reparações realizadas nos sistemas, a disponibilidade de recursos humanos e materiais, e a estimativa de especialistas e operadores da área de operação e manutenção da prestadora de serviços (NAVARRO-ROA, 2008).

Ainda, de maneira a possibilitar o reabastecimento em tempo menor, porém com quantidade de água limitada, as reparações em emergências podem ser realizadas parcialmente. Assim, o tempo de reabilitação pode ser calculado parcialmente, garantindo recuperação de 50% da capacidade do sistema, por exemplo (NAVARRO-ROA, 2008).

2.4 SETORIZAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE ITAJAÍ

Além do Plano Municipal de Saneamento Básico – PMSB (HABITARK, 2012) e do Plano de Ação Emergencial – PAE (ECOLIBRA, 2020), apresentados no Item 2.2, este trabalho utilizou o projeto de adequação e setorização do SAA de Itajaí elaborado por uma empresa projetista como base para o seu desenvolvimento. Ressalta-se que tais documentos não são sequenciais, ou seja, apesar de tratarem do mesmo assunto, suas elaborações são independentes e não são revisões ou atualizações um dos outros.

O projeto de adequação e setorização do sistema de abastecimento de água de Itajaí sintetiza todo o projeto elaborado pela referida empresa e apresenta a concepção final do projeto. Nesse sentido, segundo a empresa projetista inicialmente foi realizado estudo populacional e de demandas para estimar a população que será abastecida pelo SAA de Itajaí até o ano de 2048. O estudo populacional e de demandas levou em consideração a influência da população flutuante, sendo a estimativa realizada por projeções matemáticas para cada ano ao longo do horizonte de projeto e para cada setor de micromedicação existente.

Após a realização do estudo populacional e de demandas e do diagnóstico do SAA, a empresa projetista realizou a concepção da setorização do sistema. A setorização tem como objetivo a divisão do sistema em áreas menores a diferentes níveis: setores de abastecimento, zonas de pressão, distritos de medição e controle e setores de manobra. Essas delimitações facilitam a gestão e a operação do SAA, ao promover maior controle de pressões, identificar e reduzir perdas, delimitar as áreas de influência das unidades e reduzir as áreas afetadas durante a realização de manobras operacionais, como limpeza e manutenção da rede. Ainda, a setorização pode diminuir a vulnerabilidade do sistema, uma vez que uma falha ou dano em uma unidade de um sistema setorizado irá impactar somente uma região bem delimitada a jusante dessa unidade, e não de maneira difusa o SAA. Segundo a empresa projetista, o sistema

de abastecimento de Itajaí foi subdividido em áreas de influência das ETAs, setores de abastecimento, distritos de medição e controle e setores de manobra.

De acordo com a empresa projetista, o horizonte de projeto foi dividido em 04 etapas: a primeira etapa compreendendo os anos entre 2020 e 2024, a segunda etapa entre 2025 e 2029, a terceira etapa entre 2030 e 2039, e a quarta etapa entre 2040 e 2048. Em todas as etapas o sistema terá 14 setores de abastecimento, sem ajustes da sua delimitação, sendo alguns setores inicialmente abastecidos por uma estação de tratamento de água e posteriormente por outra estação.

Para a setorização e adequação do sistema, a empresa responsável projetou diversas novas unidades lineares e localizadas, como reservatórios, estações de recalque, boosters, válvulas redutoras de pressão, medidores de vazão e pressão, adutoras, rede de distribuição, ventosas, válvulas de descarga e hidrantes. Para tanto, foram elaborados modelos hidráulicos de cada setor separadamente, além de um modelo referente ao sistema de macrodistribuição. O sistema de macrodistribuição é composto por todas as unidades entre as ETAs e as entradas dos setores de abastecimento, ou seja, ETAs, reservatórios, estações de recalque e adutoras.

2.5 MÉTODO MULTICRITÉRIO DE TOMADA DE DECISÃO

Nas últimas décadas houve um aumento no número de informações disponíveis e consideradas em processos decisórios, fato que aumenta a complexidade nas tomadas de decisões. Nesse sentido, houve o surgimento de diversos métodos de apoio a tomada de decisão, como o *Analytic Hierarchy Process – AHP* (BRIOZO; MUNETTI, 2015).

O método AHP foi desenvolvido para modelar problemas cotidianos, uma vez que muitas decisões são tomadas sem haver uma clareza sobre a importância dos parâmetros utilizados para tanto (SAATY apud BRIOZO; MUNETTI, 2015). Dessa forma, esse método é capaz de esclarecer qual é a importância numérica relativa de cada critério considerado, de acordo com o julgamento subjetivo dos avaliadores (VARGAS, 1990; YANG LEE, 1997). Assim, essa técnica tem se demonstrado útil e variada, pois é aplicável a diversas áreas de pesquisa e possibilita uma nova maneira de analisar os problemas (NOGUEIRA, 2002).

A aplicação do método consiste em três etapas principais: decomposição do problema em critérios; análise comparativa paritária entre os critérios por meio de escala numérica, formando uma matriz quadrada; e síntese das prioridades através do cálculo de autovetores

(BRIOZZO; MUSETTI, 2015). A escala numérica com os valores atribuídos para cada critério é apresentada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Escala numérica para aplicação do método AHP

Valoração da importância	Definição
1	Os dois critérios são igualmente importantes
3	O critério a esquerda é ligeiramente mais importante que o critério superior
5	O critério a esquerda é moderadamente mais importante que o critério superior
7	O critério a esquerda é muito mais importante que o critério superior
9	O critério a esquerda é extremamente mais importante ou absolutamente preferível que o critério superior
2, 4, 6, 8	Valores intermediários

Fonte: Adaptado de Pizzolatti (2007).

Com base na escala numérica apresentada, preenche-se a matriz quadrada de critérios e calcula-se os autovetores máximos, através da soma de cada coluna (BRIOZZO; MUSETTI, 2015), conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Cálculo dos somatórios dos pesos da avaliação.

CRITÉRIOS	A	B	C
A	1	9	7
B	1/9	1	3
C	1/7	1/3	1
Σ	1,25	10,33	11,00

Fonte: Adaptado de Briozzo e Musetti (2015).

Após, calcula-se a matriz de comparação paritária normalizada, por meio da divisão de cada elemento da matriz pelo somatório dos pesos da sua coluna correspondente (BRIOZZO; MUSETTI, 2015). Em seguida, os valores normalizados de cada linha são somados, e cada somatório também é somado, resultando na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Matriz de comparação par a par normalizada.

CRITÉRIOS	A	B	C	Σ
A	0,797	0,871	0,636	2,305
B	0,089	0,097	0,273	0,458
C	0,114	0,032	0,091	0,237
			Σ	3,000

Fonte: Adaptado de Briozo e Musetti (2015).

Na sequência deve-se calcular o autovetor máximo, por meio da porcentagem do somatório de cada linha (apresentado na Figura 2) em relação ao somatório total (por exemplo, 2,305/3,000). O autovetor máximo resulta em uma matriz coluna.

Por fim, multiplica-se a matriz original (Figura 1) pelo autovetor máximo (matriz coluna), resultando no autovalor máximo (outra matriz coluna), conforme Briozo e Musetti (2015). O resultado desses cálculos é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Cálculo do autovalor.

$$\begin{bmatrix} 1 & 9 & 7 \\ 1/9 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,768 \\ 0,153 \\ 0,079 \end{bmatrix} = \begin{matrix} 2,70 \\ 0,48 \\ 0,24 \\ \Sigma \\ \mathbf{3,41} \\ \mathbf{\text{autovalor}} \\ \mathbf{\text{máx ou } \lambda_{\text{máx}}} \end{matrix}$$

Fonte: Briozo e Musetti (2015).

O autovalor máximo representa o peso de cada critério considerado, ou seja, no exemplo apresentado por meio das figuras o critério A possui um peso de 2,70, o critério B um peso de 0,48 e o critério C um peso de 0,24. Dessa forma, um critério não é subestimado em relação a outro.

2.6 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA COM O SOFTWARE WATERCAD®

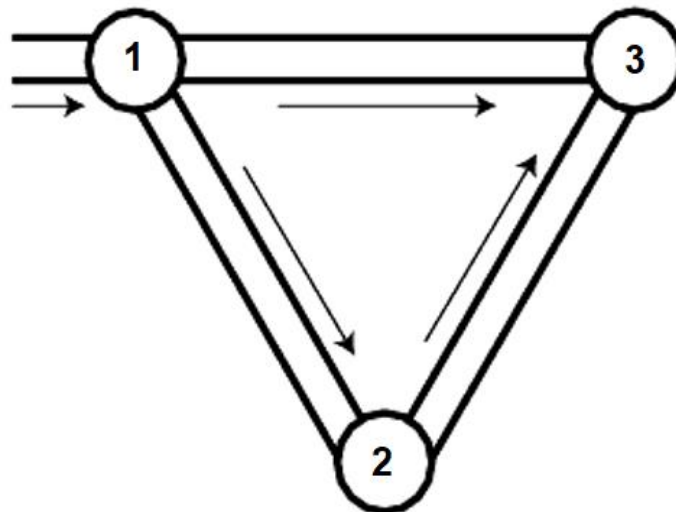
O WaterCAD®, aplicativo da Bentley desenvolvido pela Haestad Methos Inc. na cidade de Watertown, nos Estados Unidos da América, é um aplicativo de modelagem

hidráulica e de qualidade da água. O aplicativo permite a construção de modelos dinâmicos, a modelagem da qualidade da água, a realização de análises multicenários, simulações de descarga e de incêndio, análise de criticidade, modelagem de operações e análises de custos de energia (BENTLEY, 2007).

Para propósitos de modelagem os elementos do sistema são organizados em: tubulações, junções/nós, reservatórios (fonte de água), tanques, bombas e válvulas. Uma vez que um evento ou condição em um ponto do sistema pode afetar todas as outras partes do mesmo, a abordagem que o engenheiro deve tomar para encontrar uma solução é dificultada. Entretanto, dois princípios fundamentais regem o modelo e devem ser considerados durante os estudos: conservação de energia e conservação de massa (BENTLEY, 2005).

O princípio de conservação de energia aplicado a redes de água afirma que a perda de carga total entre quaisquer dois nós do sistema deve ser a mesma, independentemente do caminho a ser percorrido pelo fluido entre os dois pontos. Ou seja, considerando-se três nós interligados, a perda de carga entre os nós 1 e 3 é a mesma entre os nós 1, 2 e 3. A Figura 4 a seguir representa tal princípio.

Figura 4 – Representação do princípio de conservação de energia.



Fonte: Adaptado de Bentley (2005)

Já princípio de conservação de massa aplicado à hidráulica diz que, em qualquer nó do sistema contendo fluido incompressível em dado intervalo de tempo, o volume total nesse nó será igual a todo volume que entra ou chega ao nó, subtraído tudo o que sai do mesmo. Ainda, deve-se considerar a variação de armazenamento, a qual pode ser positiva ou negativa. Esse conceito é apresentado na equação 1 abaixo, considerando a mesma variação de tempo (BENTLEY, 2005).

$$\sum Q_{e(\Delta t)} = \sum Q_{s(\Delta t)} + \Delta V \quad (1)$$

Sendo:

$Q_{e(\Delta t)}$ = vazão total de entrada no nó em dado intervalo de tempo (L/s);

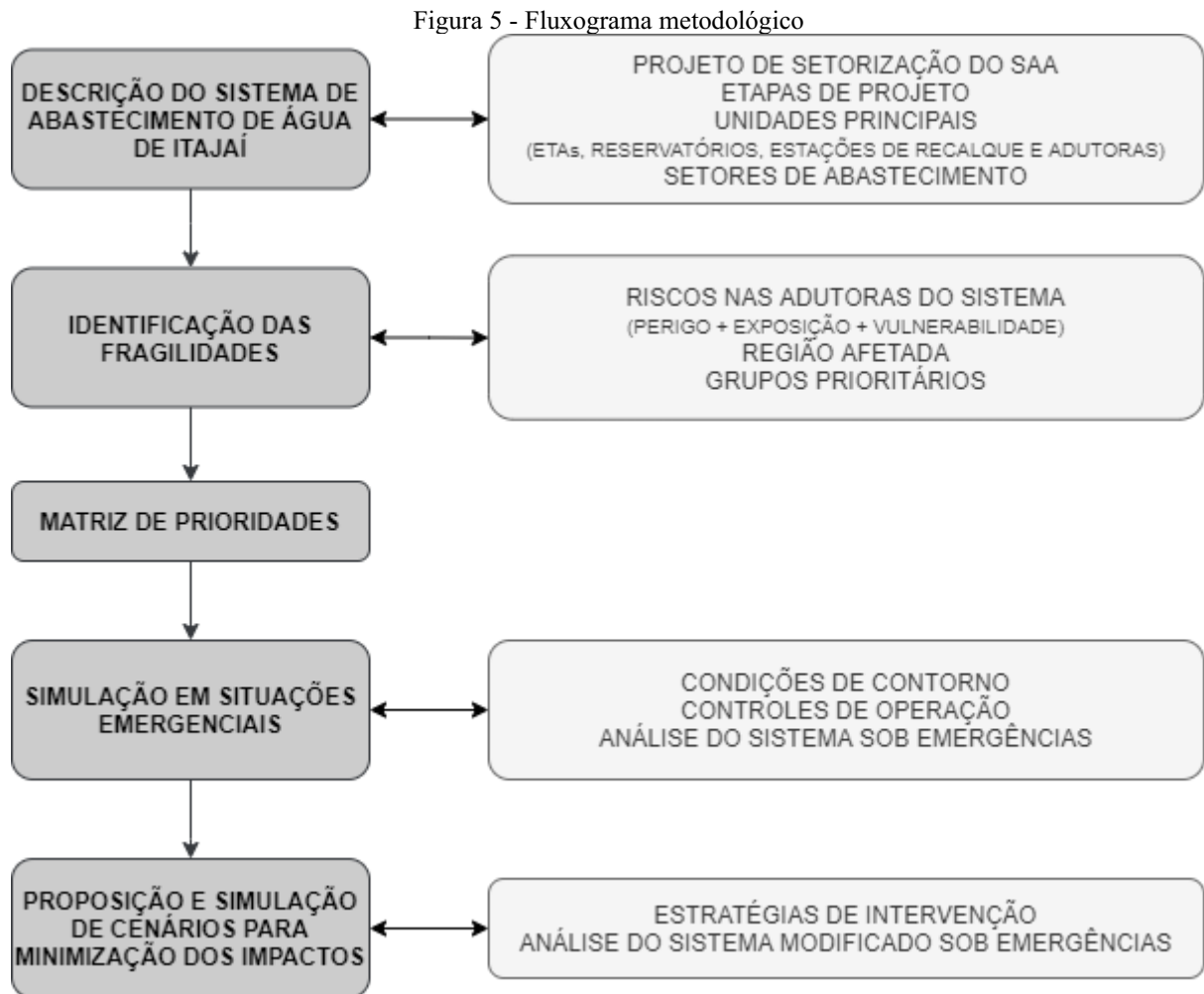
$Q_{s(\Delta t)}$ = vazão total de saída no nó em dado intervalo de tempo (L/s);

ΔV = variação de armazenamento no nó em dado intervalo de tempo (L).

Respeitando os princípios mencionados, no software há duas opções de análise do sistema: em estado estático (sem considerar variação de tempo e, conseqüentemente, variação de vazão e pressão, apresentando uma situação instantânea) ou em período estendido (considerando variação de tempo e, conseqüentemente, variação de vazão e pressão). Em ambos os casos o método computacional utilizado é o do algoritmo gradiente (ou método do gradiente), apresentado por Todini e Pilati (1987). Este método une técnicas de minimização numérica, incorporando vantagens de métodos pré-existent de maneira a reduzir suas limitações, o que o tornou um algoritmo muito eficiente (FORMIGA; CHAUNDHRY, 2008).

3 METODOLOGIA

As etapas da metodologia a ser aplicada nesse trabalho são apresentadas na sequência. A Figura 5 a seguir apresenta o fluxograma metodológico.



Fonte: Autoria própria (2021).

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM ESTUDO

Para a caracterização da área de estudo foram levantados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS sobre o município de Itajaí, como população e índice de abastecimento da população. O último censo realizado na cidade foi no ano de 2010, sendo apresentados dados estimados para o ano de 2020.

Em relação ao sistema de abastecimento de água em si, a caracterização foi realizada, principalmente, com base no relatório do projeto de adequação do sistema de distribuição de água elaborado pela empresa projetista. Uma vez que a autarquia responsável pelo SAA de

Itajaí visa implementar o projeto, esse trabalho foi desenvolvido com base nas adequações indicadas no projeto citado, e não no Sistema de Abastecimento de Água atual do município. Dessa forma, algumas das unidades apresentadas nesse trabalho não são existentes, e sim projetadas.

Atualmente, o sistema de abastecimento de água de Itajaí pode ser subdividido em dois, sistema urbano e sistema rural, sendo nesse estudo considerado somente o sistema urbano. Conforme a empresa projetista, o SAA urbano atual possui duas estações de tratamento de água – ETAs, 09 reservatórios, 04 estações de recalque de água tratada – ERATs e 08 boosters. O sistema de abastecimento de água atual do município de Itajaí não se encontra setorizado, sendo a sua setorização e adequação contempladas no projeto elaborado pela empresa responsável. O projeto possui como ano final do horizonte de projeto o ano de 2048, sendo este dividido em etapas. Nesse trabalho é considerado o sistema apresentado para a primeira etapa de projeto, referente ao período entre os anos de 2020 e 2024. De acordo com a empresa projetista, o dimensionamento do SAA setorizado foi realizado com base na demanda máxima de alta temporada do sistema para o final de cada etapa de projeto (ano 2024 na primeira etapa, por exemplo).

Conforme indicado pela empresa projetista, o SAA de Itajaí possuirá 14 setores de abastecimento, 02 estações de tratamento de água, 07 centros de reservação e 05 estações de recalque de água tratada quando a primeira etapa de projeto for implantada. As adutoras não são denominadas no projeto da empresa responsável, sendo identificadas mais especificamente nesse trabalho.

Para melhor compreensão espacial do sistema de abastecimento estudado, foram elaborados mapas com o auxílio do *software* Quantum GIS – QGIS. Para tanto, os arquivos *shapefiles* utilizados foram disponibilizados pelo SEMASA (2021) e pelo IBGE (2020), e o mapa-base utilizado foi o disponível no próprio QGIS da Google Satellite (2020).

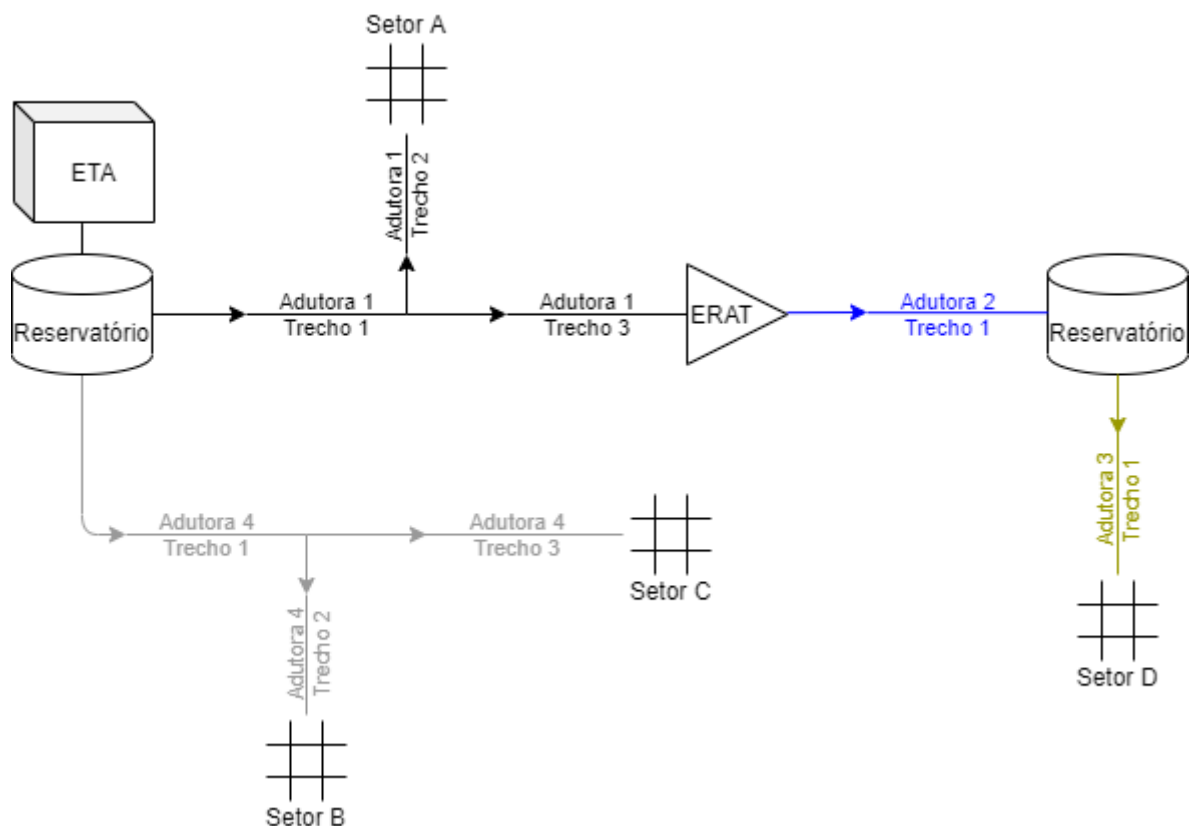
3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS FRAGILIDADES DA MACRODISTRIBUIÇÃO

A macrodistribuição, composta por estações de tratamento de água, reservatórios, estações de recalque de água tratada e adutoras, foi discretizada e analisada em partes para identificar as suas principais fragilidades. Devido ao tamanho e complexidade do sistema de abastecimento de água, nesse estudo foram consideradas apenas as adutoras. A análise das adutoras é estratégica ao analisar o SAA pois, devido a sua função de interligar as unidades

localizadas entre si e com os setores de abastecimento, a falha total em uma unidade localizada inviabiliza a adutora imediatamente a jusante de si – pelo menos em seu trecho inicial. Dessa forma, quando uma adutora imediatamente a jusante de uma unidade localizada falha, os impactos para o sistema são análogos aos impactos que seriam causados pela falha total dessa unidade localizada em questão.

Para melhor compreensão do sistema, as adutoras foram enumeradas entre unidades localizadas (ETAs, reservatórios e ERATs) e subdivididas em trechos. Ou seja, o conjunto de todas tubulações e ramificações entre uma unidade localizada e outra foi chamada de adutora, independente de quantos trechos existem entre essas duas unidades. Os trechos são as subdivisões das adutoras, por exemplo, uma adutora que tem como ponto de partida uma ETA e ponto de chegada um reservatório pode ter, ao longo do seu trajeto, uma ramificação para um setor de abastecimento. Dessa forma, essa adutora tem 03 trechos: trecho 01 entre a ETA e a bifurcação, trecho 02 entre a bifurcação e o setor de abastecimento e trecho 03 entre a bifurcação e o reservatório. Na Figura 6 é apresentado um esquema geral sobre como foram enumeradas as adutoras e seus trechos.

Figura 6 – Esquema geral da enumeração das adutoras



Fonte: Autoria própria (2021)

De maneira a identificar os impactos causados para o SAA por algum dano ou falha em adutoras, foram levantadas as informações acerca dos riscos de tais unidades. Assim, uma vez que risco pode ser compreendido como a associação dos fatores perigo, exposição e vulnerabilidade (NAVARRO-ROA, 2008), esses três parâmetros foram definidos. Dessa forma, foram identificados:

- Os possíveis perigos que podem afetar as unidades do SAA de Itajaí, ou seja, quais os agentes externos que possuem potencial de produzir instabilidade e afetar aquela parte do sistema;
- As circunstâncias de exposição as quais as adutoras se encontram, ou seja, foram levantadas suas características físicas e locais das mesmas;
- Qual a vulnerabilidade associada a cada unidade do sistema, ou seja, qual a capacidade dos perigos afetarem o sistema.

Nesse sentido, os perigos que podem afetar as adutoras são movimentações de terra, escavação nas vias, eventuais obstruções e diferenças de pressão (ECOLIBRA, 2020; NAVARRO-ROA, 2008). O perigo relacionado a obstruções foi desconsiderado nesse trabalho devido à baixa probabilidade de ocorrerem obstruções com dimensões suficientes para interromper o fluxo d'água, visto que adutoras possuem grandes diâmetros e normalmente estão sob alta carga de pressão. Por fim, os perigos movimentações de terra, escavação nas vias e diferenças de pressão foram considerados para todas as adutoras. Cabe ressaltar que os perigos foram elencados e não quantificados.

As circunstâncias de exposição foram limitadas a localização das adutoras, classificadas conforme o tipo de via onde se encontram (via principal ou via secundária), apresentadas na Tabela 2. Esse critério foi utilizado visto que tubulações localizadas em ruas e avenidas movimentadas estão mais sujeitas a choques mecânicos. Tal exposição se deve ao fato de que nessas vias normalmente há a presença de demais infraestruturas subterrâneas, as quais sofrem manutenções e, por consequência, podem afetar adutoras localizadas em proximidade. Conforme a Tabela 2, quanto maior o valor atribuído a exposição da adutora, mais vulnerável ela se encontra.

Tabela 2 – Classificação da exposição.

Localização da adutora	Valoração
Via principal	1,00
Majoritariamente em via principal	0,75
Parte em via principal e parte em via secundária	0,50
Majoritariamente em via secundária	0,25

Localização da adutora	Valoração
Via secundária	0,00

Fonte: Aatoria própria (2021).

Outros critérios que poderiam ser considerados para avaliação da exposição das adutoras é a classe de pressão da adutora, para verificação se a mesma opera dentro da classe para qual foi projetada; e se as tubulações são aparentes ou enterradas. Tais parâmetros não foram considerados por não haver informações suficientes para tanto.

Em relação a vulnerabilidade das adutoras, considera-se que uma tubulação vulnerável está mais sujeita a causar a interrupção do abastecimento de água do que uma tubulação menos vulnerável. Dessa forma, a vulnerabilidade das adutoras foi caracterizada de duas maneiras: a presença ou não de adutora em paralelo a adutora avaliada e a possibilidade de se realizar manobra de registro para minimizar as consequências da falha da adutora avaliada. Ressalta-se que as adutoras são consideradas em paralelo nesse estudo somente quando elas normalmente operam dessa maneira. Ou seja, nos casos em que existem adutoras em paralelo, porém o fluxo entre elas encontra-se interrompido por algum motivo (decorrente de registro fechado, por exemplo), as adutoras não foram consideradas em paralelo, pois é necessária uma manobra operacional para que tais tubulações operem em paralelo. Tal consideração foi realizada devido a operação usual do sistema, onde cada adutora destina água para um local (setor ou unidade localizada) diferente.

Os critérios de classificação e valoração para este estudo em termos de vulnerabilidade são apresentados na Tabela 3 a seguir, sendo que quanto maior o valor atribuído ao critério, mais vulnerável se encontra a adutora.

Tabela 3 – Classificação da vulnerabilidade.

Critério	Classificação	Valoração
Adutora operando em paralelo	Sim	0,00
	Não	1,00
Possibilidade de realização de manobra de registro para abastecer setores a jusante	Sim	0,00
	Não	1,00

Fonte: Aatoria própria (2021).

De maneira complementar a análise realizada para as unidades, foram identificados quais setores são os responsáveis pela maior demanda do SAA, em termos de qual porcentagem de demanda cada setor e os consumidores externos (Navegantes e Balneário Camboriú) representam do total do sistema. Também se levou em consideração a presença de grupos prioritários de abastecimento, sendo estes hospitais, unidades de pronto atendimento – UPAs e

penitenciárias. Creches e escolas não foram consideradas grupos prioritários pois, por existirem muitas distribuídas em todas as regiões do município de Itajaí, esse valor seria atribuído a todos os setores, não causando diferença no cálculo das prioridades. Nesse sentido, foi criada uma classificação de região afetada devido a falha ou dano nas unidades avaliadas, apresentada na Tabela 4, e uma valoração quanto a presença de grupos prioritários no setor, apresentada na Tabela 5

Tabela 4 – Classificação da região afetada

Região afetada	Definição	Valoração
De demanda baixíssima	Região responsável por menos de 10% da demanda total do SAA	0,00
De demanda baixa	Região responsável por 10% ou mais da demanda total do SAA	0,25
De demanda média	Região responsável por 25% ou mais da demanda total do SAA	0,50
De demanda alta	Região responsável por 50% ou mais da demanda total do SAA	0,75
De demanda altíssima	Região responsável por 80% ou mais da demanda total do SAA	1,00

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 5 – Valoração das classificações

Presença de grupo prioritário	Valoração
Não	0,00
Sim	1,00

Fonte: Autoria própria (2021).

Identificados e quantificados os riscos, foram definidas quais adutoras possuem maior risco e impacto associado, de maneira a priorizar as análises, simulações e possíveis intervenções. Para tanto, os critérios localização, existência de adutora que opere em paralelo, possibilidade de manobra em registro, presença de grupo prioritário a jusante da adutora em questão e região afetada por dano ou falha na adutora em questão, elencados na Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, foram hierarquizados pelo método multicritério de tomada de decisão AHP. Conforme mencionado no Item 2.5, essa técnica tem como objetivo elucidar a importância de cada critério para a tomada de decisão, por meio de valoração dos critérios através da atribuição de peso a cada um. Assim, a matriz de critérios construída por meio do método AHP resultou na Tabela 6, onde é possível observar as importâncias relativas dos critérios aos pares. Já na Tabela 7 é possível observar a hierarquização dos critérios.

Tabela 6 – Matriz de comparação dos critérios.

Critérios	Localização da adutora	Presença de adutora em paralelo	Possibilidade de realização de manobra em registro	Presença de grupo prioritário	Região afetada
Localização da adutora	1	1/5	1/3	1/7	1/9
Presença de adutora em paralelo	5	1	3	1/4	1/5
Possibilidade de realização de manobra em registro	3	1/3	1	1/5	1/6
Presença de grupo prioritário	7	4	5	1	1/4
Região afetada	9	5	6	4	1

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 7 – Hierarquização dos critérios.

Índice (i)	Critério (c)	Peso (p)
1	Localização da adutora	0,18
2	Presença de adutora em paralelo	0,68
3	Possibilidade de realização de manobra em registro	0,35
4	Presença de grupo prioritário	1,50
5	Região afetada	2,93

Fonte: Autoria própria (2021).

Com os critérios hierarquizados e com os riscos valorados, é possível determinar a prioridade das análises, por trecho de adutora. Para tanto, foi utilizada a seguinte equação:

$$P = \sum_{i=1}^5 (c_i * p_i) \quad (2)$$

Sendo:

P = prioridade da simulação emergencial de cada trecho das adutoras (adimensional);

c = valoração do critério (adimensional);

p = peso do critério (adimensional).

Dessa forma, a prioridade pode variar de 0,00 a 5,63 e são encontradas cinco faixas de prioridade, apresentadas na Tabela 8. Nesse trabalho serão consideradas as prioridades consideradas altas e altíssimas.

Tabela 8 – Classificação das prioridades

Classe	Prioridade calculada
Baixíssima	$0,00 \leq P < 1,13$
Baixa	$1,13 \leq P < 2,25$
Média	$2,25 \leq P < 3,38$
Alta	$3,38 \leq P < 4,50$
Altíssima	$4,50 \leq P \leq 5,63$

Fonte: Autoria própria (2021).

3.3 SIMULAÇÃO EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS

O modelo de simulação hidráulica utilizado para este trabalho pertence ao projeto de setorização do sistema realizado pela empresa projetista. As simulações do modelo hidráulico foram realizadas, inicialmente, considerando duas situações: a primeira em condições normais e a segunda em situações emergenciais. Para tanto, foram definidas as seguintes condições de contorno do sistema, a serem detalhadas na sequência: tipo de simulação (estática ou em período estendido), passo de tempo hidráulico, precisão dos cálculos, método de fricção, coeficientes de rugosidade considerados, determinação das elevações, produção das ETAs, nível inicial dos reservatórios, demandas utilizadas, alocação das demandas e padrão de consumo aplicado.

As simulações foram realizadas em período estendido de 72 horas, de maneira a avaliar a variação de pressão e vazão nos nós, bem como o comportamento dos reservatórios. A produção das estações de tratamento de água – ETAs foi considerada constante, igual a demanda máxima diária da sua área de influência.

Para definir o volume inicial dos reservatórios (dado de entrada para as simulações emergenciais), foi realizada uma pré-simulação considerando o sistema em condições normais (sem emergências) ao longo de uma semana (168 horas). O objetivo dessa pré-simulação foi verificar se há alguma estabilidade do sistema, no sentido se há algum padrão de variação do nível dos reservatórios. Havendo um possível padrão de variação do nível dos reservatórios é possível identificar qual o momento mais crítico do dia para que haja uma ruptura de adutora (reservatórios com nível mais baixo). Dessa forma, os níveis dos reservatórios nesse momento crítico do dia serão utilizados como dado de entrada para as simulações em situações emergenciais. Por esse motivo os resultados dessa pré-simulação são apresentados na metodologia desse trabalho, e não no tópico referente aos resultados.

Nessa pré-simulação foram observados dois momentos bastante distintos em termos de variação dos reservatórios, os quais se repetem de maneira aproximada nos demais dias. Esse padrão de variação é apresentado na Figura 7 e na Figura 8, onde observa-se comportamento distinto do padrão no sexto e sétimo dia. Esses dois últimos dias apresentam resultados fora do padrão esperado devido ao enchimento total do reservatório Arapongas que, por meio de controle operacional a ser explicado no Item 3.3.1, tem seu registro de entrada fechado até que o mesmo chegue a 30%, onde volta a ser aberto.

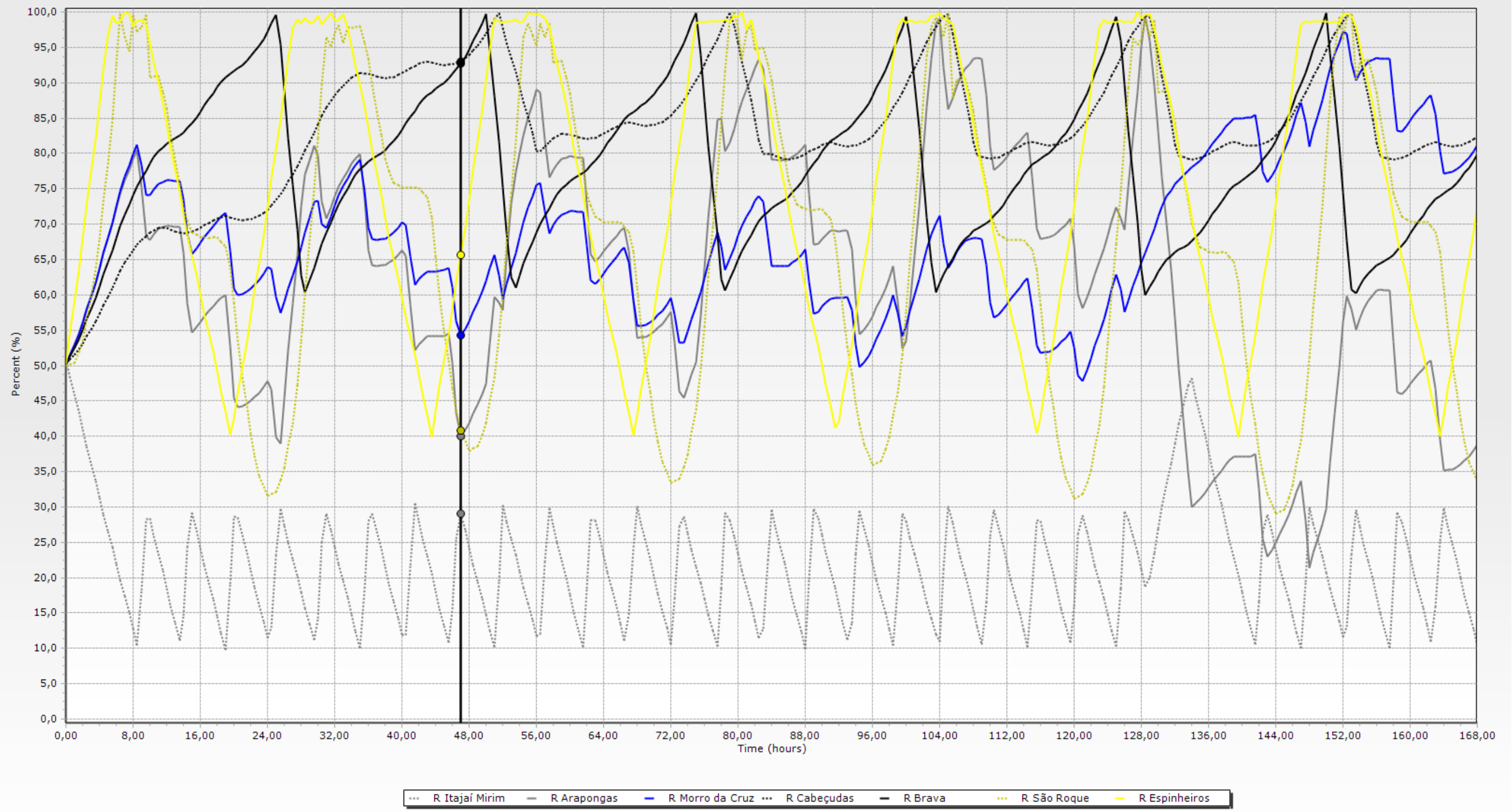
Assim, entre o segundo e o quinto dia observa-se que os reservatórios Brava, Cabeçadas e Itajaí Mirim estão próximos do seu nível máximo observado para esse período (em demanda máxima diária, sem ocorrência de emergência), ao mesmo tempo em que os reservatórios Morro da Cruz, Arapongas e São Roque estão próximos do seu nível mínimo observado para esse período e o reservatório Espinheiros está próximo de 65% da sua capacidade. Essa situação ocorre às 47 horas (Figura 7), por exemplo, e representa uma das piores situações para ocorrer uma emergência que afete os reservatórios Morro da Cruz, Arapongas e São Roque.

Ainda, entre o segundo e o quinto dia observa-se que os reservatórios Espinheiros, São Roque, Arapongas e Morro da Cruz estão próximos do seu nível máximo observado para esse período (em demanda máxima diária, sem ocorrência de emergência), ao mesmo tempo em que os reservatórios Brava, Cabeçadas e Itajaí Mirim estão próximos do seu nível mínimo observado para esse período. Essa situação ocorre às 56 horas (Figura 8), por exemplo, e representa uma das piores situações para ocorrer uma emergência que afete os reservatórios Brava, Cabeçadas e Itajaí Mirim.

Dessa forma, observado um padrão de variação dos reservatórios em situação normal de operação (sem emergências), onde são encontrados dois momentos críticos distintos que se repetem (Figura 7 e Figura 8), foram definidos os volumes iniciais dos reservatórios a serem inseridos como dado de entrada nas simulações em situação emergencial do sistema. Esses volumes (indicados em porcentagem do volume total do reservatório) são os apresentados na Figura 7, no tempo equivalente a 47 horas de simulação. Os volumes iniciais (porcentagens) encontrados as 56 horas (Figura 8) não foram utilizados como condição de contorno, visto que as simulações seriam realizadas em duplicata alterando-se apenas esses parâmetros.

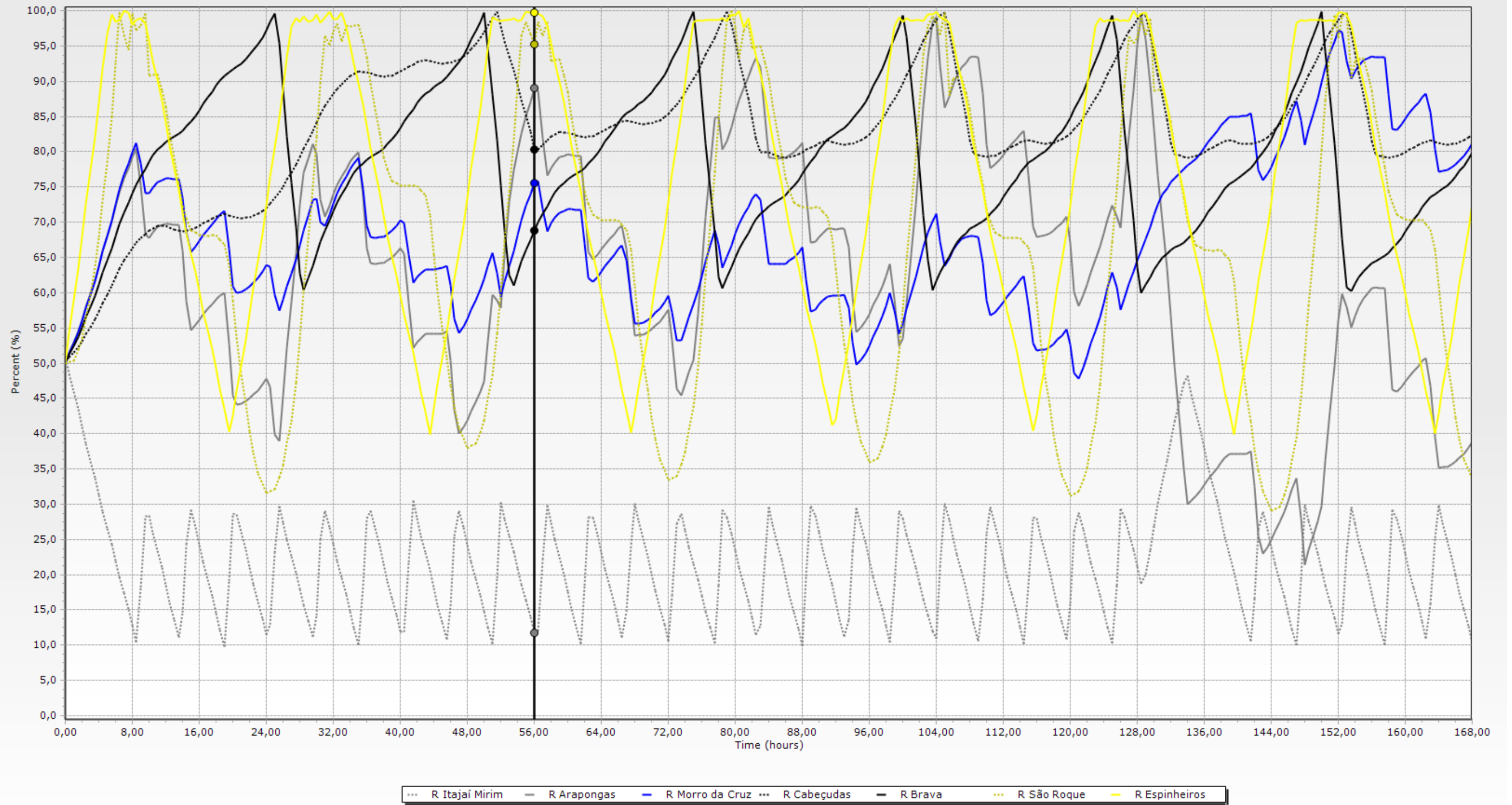
Segundo a empresa projetista, o passo de tempo hidráulico considerado foi de 1 hora. Durante as simulações, o *software* realiza diversas iterações por intervalo de tempo, até que a diferença no balanço de massa seja menor que a precisão determinada pelo usuário. Nesse sentido, a precisão utilizada para as simulações foi igual a 0,001.

Figura 7 – Variação dos reservatórios sem emergência – destaque às 47 horas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 8 – Variação dos reservatórios sem emergência – destaque às 56 horas.



Fonte: Autoria própria (2021).

O método de fricção utilizado foi o método de Hazen Willians, o qual calcula o gradiente de perda de carga (m/km) em cada tubulação com base na vazão, no diâmetro e no coeficiente de rugosidade. O coeficiente de rugosidade é um valor adimensional, que depende da natureza e estado da parede interna ao tubo (PORTO, 2006): quanto mais rugoso for o interior da tubulação, menor o coeficiente de rugosidade e maior será o gradiente de perda de carga associado. Conforme apresentado no projeto da empresa responsável, os coeficientes de rugosidade considerados para as tubulações com revestimento interno de PVC, como PVC e PVC DEFoFo foi igual a 140, enquanto o coeficiente de rugosidade para tubulações com revestimento interno em FoFo foi igual a 130. Conforme a empresa projetista, em alguns locais do SAA foi realizado ensaio de incrustação, onde foram retiradas seções das tubulações e avaliado o seu estado interno. Após, foram estimados coeficientes de rugosidade específicos para os trechos onde tais tubulações foram retiradas. Das seções retiradas, 02 pertencem a adutoras das macrodistribuição que serão mantidas pelo menos em parte do horizonte de projeto:

1. Adutora em FoFo DN 300, localizada na avenida Adolfo Konder, esquina com a rua Agílio Cunha;
2. Adutora em FoFo DN 250, localizada na rua Brusque.

Conforme apresentado na Figura 9 a seguir e descrito pela empresa projetista, a adutora em FoFo DN 300 na avenida Adolfo Konder apresenta espessura da parede preservada, com acúmulo considerável de sedimentos em seu interior. Dessa forma, o coeficiente de rugosidade adotado para essa adutora foi de 110, o que, segundo Azevedo Netto (1998) corresponde a uma tubulação desse material e diâmetro com 10 anos de uso. Já a adutora em FoFo DN 250 na rua Brusque apresenta variação da espessura da parede, devido ao acúmulo de incrustação que afeta de maneira significativa a capacidade hidráulica da tubulação. Nesse sentido, o coeficiente de Hazen Willians adotado foi de 96, o que, segundo Azevedo Netto (1998) corresponde a uma tubulação desse material e diâmetro com 20 anos de uso.

De acordo com a empresa projetista, as elevações dos nós foi determinada por meio de curva de nível com valores a cada 1 metro, disponibilizada pelo SEMASA e inserida no modelo pela ferramenta TRex. Essa ferramenta constrói o modelo digital do terreno com base na curva inserida para determinar as elevações.

Figura 9 – Seção da adutora em FoFo DN 300 e em FoFo DN 250, respectivamente.



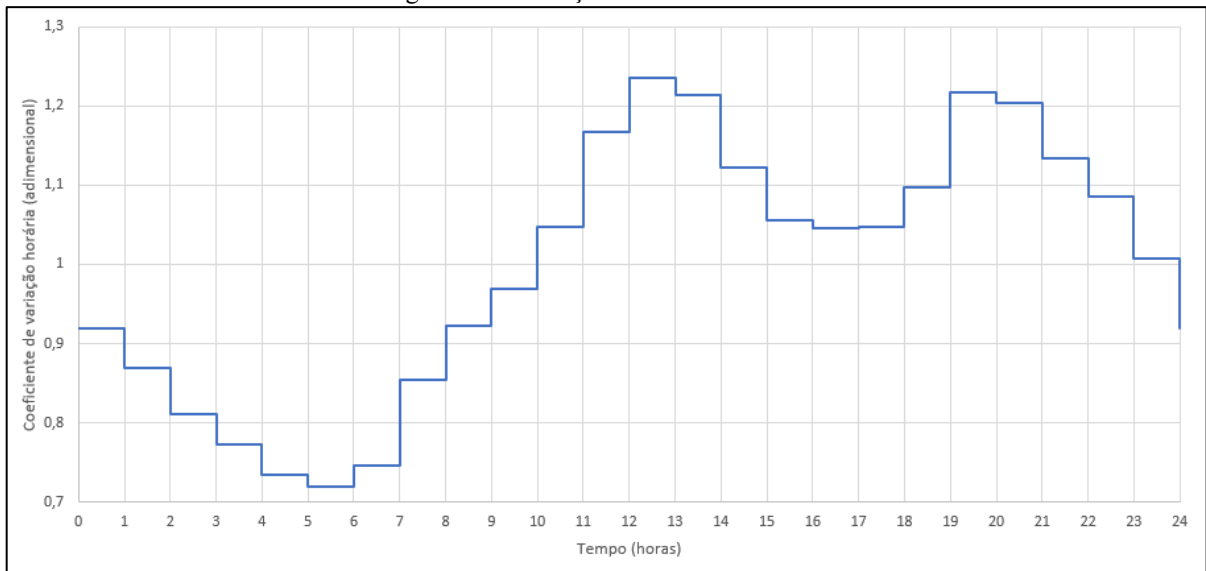
Fonte: Empresa projetista (2019).

Em relação as demandas, foram utilizadas as estimadas para o ano 2024 pelo projeto da empresa responsável. De acordo com a mesma, uma vez que o SAA de Itajaí não conta com sistema georreferenciado de micromedição e sim com dados compilados por setor de micromedição, o estudo populacional e de demandas realizado pela empresa foi feito com base nesses setores. O método utilizado para a estimativa foi de projeções matemáticas para cada ano ao longo do horizonte de projeto. A demanda estimada por setor de micromedição foi ajustada, após a setorização, para cada distrito de medição e controle. Unidos os distritos de medição e controle para formar um setor de abastecimento, foram definidas as demandas por setor para cada etapa de projeto. A demanda utilizada na simulação foi a demanda máxima diária de alta temporada referente ao final da primeira etapa de projeto, sob curva de consumo horário. A curva de variação de consumo horário foi estimada com base em registros telemétricos de macromedidor instalado em travessia que abastece o município de Navegantes, visto que não há macromedidores capazes de estimar o padrão de consumo no município de Itajaí.

Os pontos de demanda foram alocados manualmente nas junções a jusante dos reservatórios. Nos setores de abastecimento onde o reservatório está localizado distante da entrada do setor, as demandas foram alocadas em junções na entrada dos mesmos. Também foram inseridas as demandas pontuais para os municípios de Navegantes, nas travessias que

conduzem água até o município. Segundo a empresa projetista, a demanda do município de Balneário Camboriú foi considerada dentro do setor de abastecimento Brava.

Figura 10 – Variação de consumo horário



Fonte: Adaptado da empresa projetista (2021).

Dessa forma, definidas as condições de contorno, foram simulados os cenários sob situação emergencial para análise dos resultados em termos de pressão e vazão nos pontos de consumo e variação do nível dos reservatórios.

Ressalta-se que, por não haver informações suficientes, não foi realizada a calibração do modelo hidráulico.

3.3.1 Controles de operação

Conforme a empresa projetista, para garantir o abastecimento de todos os setores de abastecimento, alguns controles de operação são necessários. Os controles no WaterCAD® são criados a partir da união de condições e ações, e podem ser categorizados por ordem de prioridade. Dessa forma, se observado um comportamento específico no sistema (condição), deve ser realizada uma operação (ação) de maneira a garantir o fornecimento para o SAA. Caso haja uma condição mais crítica ocorrendo simultaneamente, esse controle (condição + ação) pode não ser utilizado em detrimento de um outro controle (prioridade de operação do sistema). Dessa forma, o projeto elaborado pela empresa responsável conta com diversos controles de operação para garantir o abastecimento de todos os setores de abastecimento. Ressalta-se que

essa prioridade de operação apresentada no Item 3.3.1 não está relacionada a prioridade de análise das simulações, apresentada no Item 3.2, onde são identificadas as principais fragilidades do sistema de macrodistribuição em termos de adutoras.

Para a região abastecida pela ETA São Roque, o projeto da empresa responsável apresenta os seguintes controles, os quais serão utilizados nas simulações desse trabalho:

1. Entre 01h00min e 09h00min, período de menor consumo no sistema, a válvula de entrada do reservatório Espinheiros deverá estar aberta. Esse controle de operação é de prioridade 5 (máxima) e permite o enchimento desse reservatório durante o período de menor consumo.
2. Se o reservatório Espinheiros chegar ao seu percentual total igual a 100%, a válvula de entrada do mesmo deverá ser fechada. Essa válvula deverá ser aberta somente quando o percentual total desse mesmo reservatório for igual ou menor que 40%. Esse controle é de prioridade 4.

Já para a região abastecida pela ETA Itajaí Mirim, o projeto da empresa responsável apresenta os seguintes controles, os quais também serão utilizados nas simulações desse trabalho:

1. Se o reservatório Itajaí Mirim chegar ao seu percentual total igual ou menor que 10%, as bombas da ERAT Centro deverão ser desligadas e a válvula de entrada do reservatório Arapongas deverá ser fechada. Essas bombas poderão ser ligadas e a válvula aberta quando o percentual total desse mesmo reservatório for igual ou maior que 30%. Ambos os controles de operação são de prioridade 5 (máxima), e garantem o não esvaziamento do reservatório Itajaí Mirim, a continuidade do abastecimento do setor de abastecimento Cidade Nova e evitam muitas variações, em um curto intervalo de tempo, no ponto de operação das bombas da ERAT Itajaí Mirim.
2. Se o reservatório Arapongas chegar ao seu percentual total igual a 100%, a válvula de entrada do mesmo deverá ser fechada. Essa válvula deverá ser aberta somente quando o percentual total desse mesmo reservatório for igual ou menor que 30%. Ambos os controles de operação são de prioridade 4.
3. Se o reservatório Brava chegar ao seu percentual total igual a 100%, a válvula de entrada do mesmo deverá ser fechada. Essa válvula deverá ser aberta somente quando o percentual total desse mesmo reservatório for igual ou menor que 60%. Ambos os controles de operação são de prioridade 4.

4. Se o reservatório Cabeçudas chegar ao seu percentual total igual a 100%, a válvula de entrada do mesmo deverá ser fechada. Essa válvula deverá ser aberta somente quando o percentual total desse mesmo reservatório for igual ou menor que 80%. Ambos os controles de operação são de prioridade 4.
5. Se o reservatório Morro da Cruz chegar ao seu percentual total igual a 100%, a válvula de entrada do mesmo deverá ser fechada. Essa válvula deverá ser aberta somente quando o percentual total desse mesmo reservatório for igual ou menor que 80%. Ambos os controles de operação são de prioridade 4.

3.4 PROPOSIÇÃO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS

Com base nos resultados das simulações sob situação emergencial, foram analisados meios de minimizar os impactos no SAA de Itajaí. Para tanto, foi estudada a localização espacial das unidades lineares e localizadas do sistema de macrodistribuição, de maneira identificar quais alterações no sistema poderiam ser benéficas para o mesmo sob emergências.

Nesse sentido foram propostas e analisadas quatro estratégias de intervenção no SAA, nessa ordem de prioridade:

1. O ajuste nos controles operacionais apresentados;
2. A realização de manobras operacionais, como fechamento e abertura de registros para redirecionar o fluxo de água;
3. A antecipação da implantação de trechos de adutoras projetadas pela empresa responsável para etapas posteriores do projeto;
4. A implantação de novos pequenos trechos de adutoras, para interligação entre setores e/ou regiões vulneráveis.

Não foi considerada a implantação de novos longos trechos de adutoras, visto que projeções desse tipo exigem montantes maiores de investimento, devendo ser analisadas e comparadas diferentes soluções (como abastecimento temporário por caminhão-pipa) em termos de custo-benefício. A quarta alternativa foi preferida em relação a terceira alternativa nos casos em que a antecipação da implantação de trechos de adutoras projetadas para etapas posteriores do projeto resultasse na mudança das áreas de influência das ETAs, influenciando na produção de água de cada estação. Tal preferência ocorreu visto que essa operação é mais

complexa, por envolver processos de captação, bombeamento e tratamento da água bruta – apesar de ser considerado aumento da produção de água dentro da capacidade das ETAs.

Cada estratégia considerada foi analisada para cada cenário emergencial estudado, sendo então realizadas simulações para verificar se houve minimização do impacto. Tal avaliação ocorreu da mesma maneira que nas simulações anteriores, em termos de pressão e vazão nos pontos de consumo e variação do nível dos reservatórios.

Para avaliar a eficácia da estratégia aplicada na redução dos impactos a jusante do trecho rompido, foi utilizado o conceito de acesso intermediário definido pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2017). A OMS (2017) considera que a população possui acesso intermediário à água quando recebe 50 L/hab./dia, conforme apresentado no Quadro 2. Dessa forma, quando a estratégia aplicada foi capaz de garantir o acesso intermediário à água para a população a jusante do trecho rompido, a estratégia foi considerada eficaz e o impacto foi considerado minimizado a níveis aceitáveis.

O volume mínimo a ser fornecido para cada setor de abastecimento considerando o acesso intermediário foi calculado com base na projeção populacional realizada pela empresa projetista, por meio da equação abaixo. O índice de perdas adotado foi o apresentado pela empresa responsável, igual a 20%, e o valor de vazão média considerando acesso intermediário o definido pela OMS (2017) como 50 L/hab./dia.

$$D_{AI} = \frac{Q_{méd} * (1+p) * Pop}{1000} \quad (3)$$

Sendo:

D_{AI} = demanda do setor considerando acesso intermediário (m³/d);

$Q_{méd}$ = vazão média considerando acesso intermediário (L/hab./dia);

p = índice de perdas (fração centesimal);

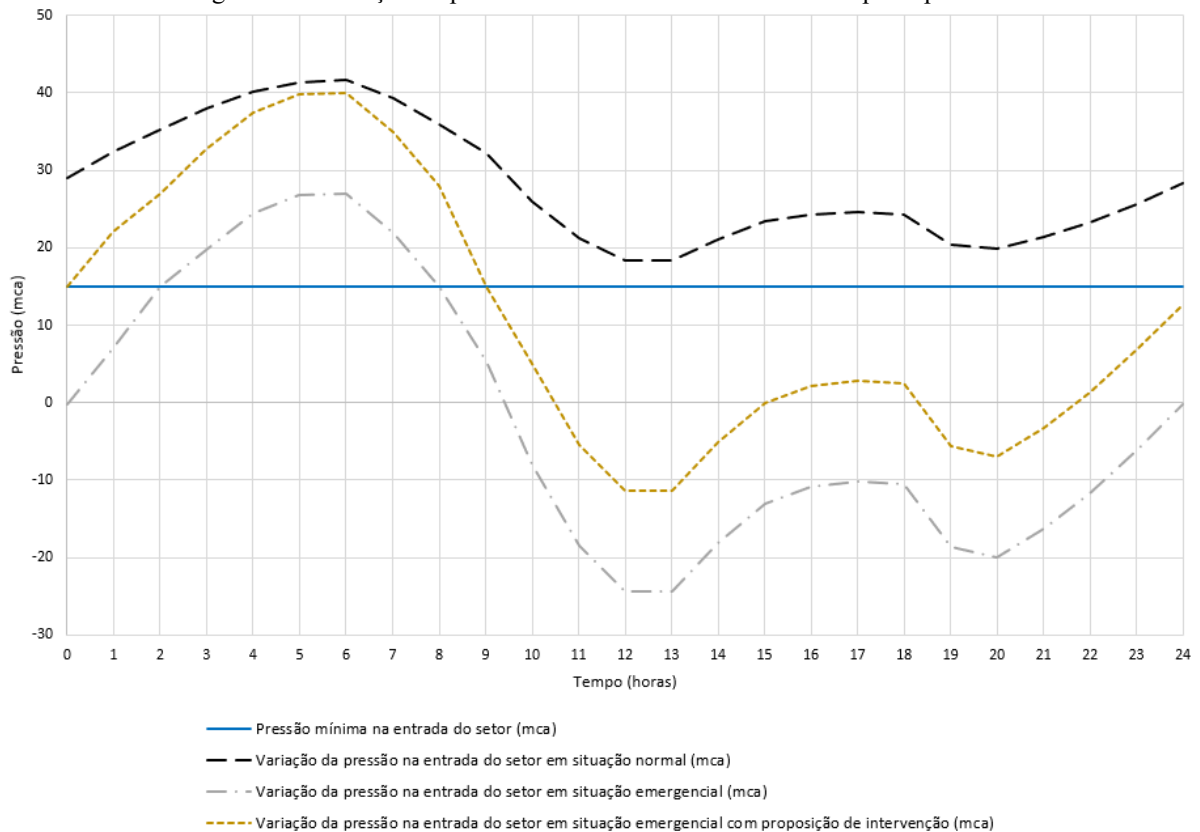
Pop = população do setor de abastecimento (hab.).

Ainda, com base nos modelos de simulação hidráulica de cada setor do projeto da empresa responsável, foram identificadas as pressões mínimas a serem garantidas na entrada de cada setor para que seja possível abastecer, em média, todos os pontos de consumo (habitantes) na vazão de 50 L/hab./dia (acesso intermediário). Cabe ressaltar que, considerando a porcentagem de perdas igual a 20%, o consumo igual a 50 L/hab./dia resulta em uma demanda igual a 60 L/hab./dia.

Ressalta-se que, em alguns casos, é possível que haja o abastecimento intermitente do setor a jusante de um trecho rompido, mesmo após a aplicação de estratégias de intervenção. Ou seja, a pressão na entrada de um setor impactado pelo rompimento de adutora pode variar

entre valores negativos e positivos mesmo considerando a aplicação de uma estratégia de intervenção. Para melhor compreensão é apresentado um exemplo hipotético na Figura 11 a seguir.

Figura 11 - Variação da pressão na entrada de um setor – exemplo hipotético



Fonte: Autoria própria (2021)

Nesse exemplo hipotético considera-se a pressão mínima na entrada do setor igual a 15 mca. Em situação normal (sem emergência), a variação da pressão na entrada do setor apresenta sempre valores acima de 15 mca, conforme esperado. Em situação emergencial (sem a aplicação de estratégias de intervenção) observa-se que a pressão varia entre -25 mca e +27 mca, aproximadamente. Já com a aplicação de estratégias de intervenção, a pressão varia entre -11 mca e + 40 mca, aproximadamente. Em ambos os casos de situação emergencial (sem e com intervenção no sistema) observa-se risco de contaminação da água decorrente da pressão negativa nas adutoras. Dessa forma, independentemente se o acesso intermediário foi suprido ou não nos momentos em que a pressão na entrada do setor foi maior que 15 mca, novas alternativas de intervenção devem ser analisadas. Ou seja, deve-se garantir o acesso intermediário à água para a população, sob pressão adequada, bem como garantir pressão superior a zero em todos os momentos ao longo do dia.

Ressalta-se que não foi avaliado e considerado o tempo de reabilitação do sistema a partir do momento em que ocorre o dano ou falha, o qual depende da estimativa dos diversos tempos que compõe esse período para cada situação, apresentados no Item 2.3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 O SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE ITAJAÍ

O sistema de abastecimento de água em estudo pertence ao município de Itajaí, localizado na porção centro-norte do litoral catarinense. No último censo realizado em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2011), Itajaí possuía a sétima maior população do estado de Santa Catarina, a maioria residente em zona urbana. Para o ano de 2020 o IBGE estimou uma população de 223.112 habitantes. Ao longo dos seus 289 km² de área, Itajaí é composta majoritariamente por planícies, principalmente na sua zona urbana.

Em relação ao sistema de abastecimento de água em si, o mesmo é operado desde 2003 pelo Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura – SEMASA (SEMASA, 2021). Segundo indicador AG001 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, 217.340 habitantes de Itajaí eram atendidos por abastecimento de água no ano de 2019 (SNIS, 2019), o que equivalia, no ano indicado, 99% da população. Além da população itajaiense, segundo a empresa projetista o SAA atualmente também abastece o município vizinho Navegantes.

Conforme apresentado anteriormente, atualmente o sistema de abastecimento de água de Itajaí não é setorizado, tendo sido realizado projeto para a setorização e adequação do mesmo por uma empresa projetista recentemente, com auxílio de modelagem hidráulica. Nesse projeto, de acordo com a empresa responsável, o SAA de Itajaí possuirá 14 setores de abastecimento, 02 estações de tratamento de água, 07 centros de reservação e 05 estações de recalque de água tratada quando a primeira etapa de projeto for implantada. No Quadro 3 são apresentados os setores de abastecimento com a respectiva ETA responsável por tratar a água que será disponibilizada para os mesmos, bem como o reservatório responsável por garantir o seu fornecimento. Já a espacialização dos setores é apresentada na Figura 12 a seguir, enquanto a localização das unidades lineares e localizadas (bem como as entradas dos setores) apresentada na Figura 13. Ressalta-se que esse trabalho foi realizado com base nas alterações indicadas no projeto da empresa responsável, e não no SAA atual.

Quadro 3 - ETAs, reservatórios e setores de abastecimento

ETA	Reservatório	Setor de abastecimento
São Roque	Espinheiros	Espinheiros Norte (EM)
	São Roque	Espinheiros Sul (ES)

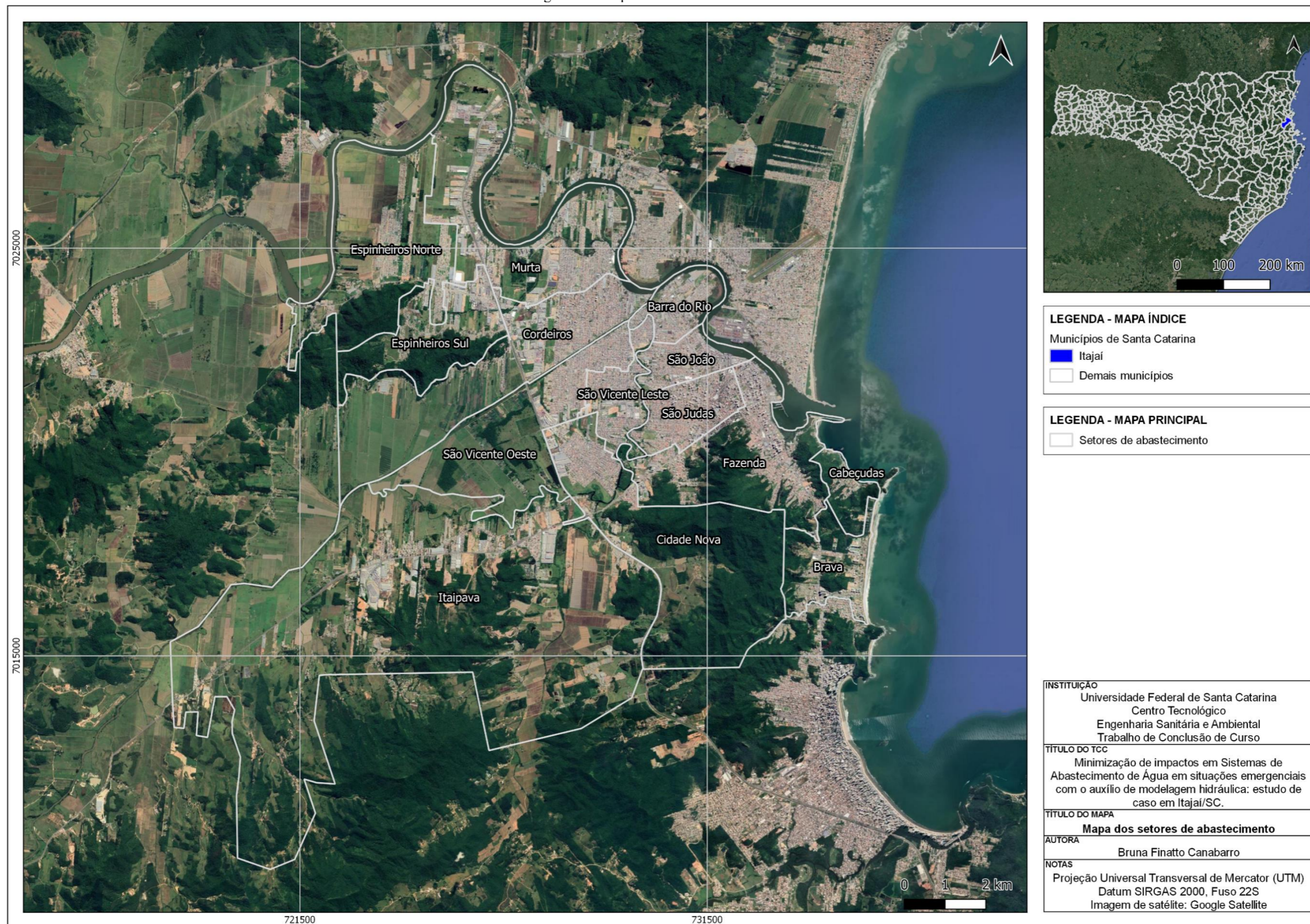
ETA	Reservatório	Setor de abastecimento
		Murta (M)
		Cordeiros (Co)
		São Vicente Leste (SVL)
		São Vicente Oeste (SVO)
		São João (SJo)
		São Judas (SJu)
		Barra do Rio (BR)
		Travessia 1 (Tra1)
		Travessia 2 (Tra2)
Itajaí Mirim	Morro da Cruz	Fazenda (F)
	Brava	Brava (B)
	Itajaí Mirim	Cidade Nova (CN)
	Araongas	Itaipava (I)
	Cabeçudas	Cabeçudas (Ca)

Fonte: Adaptado da empresa projetista (2021).

Com o auxílio dos mapas apresentados o SAA de Itajaí será descrito a seguir, conforme projeto da empresa responsável. De maneira complementar, os Apêndices de A a I apresentam cada adutora separadamente, subdivididas por trechos. Ressalta-se que as adutoras foram enumeradas entre unidades localizadas, conforme explicado no Item 3.2. Por exemplo, a adutora 1 compreende todos os trechos de tubulações e suas ramificações entre os reservatórios São Roque e o reservatório Espinheiros, inclusas as ramificações que abastecem os setores Espinheiros Sul, Cordeiros e Murta, até efetivamente chegar ao reservatório Espinheiros.

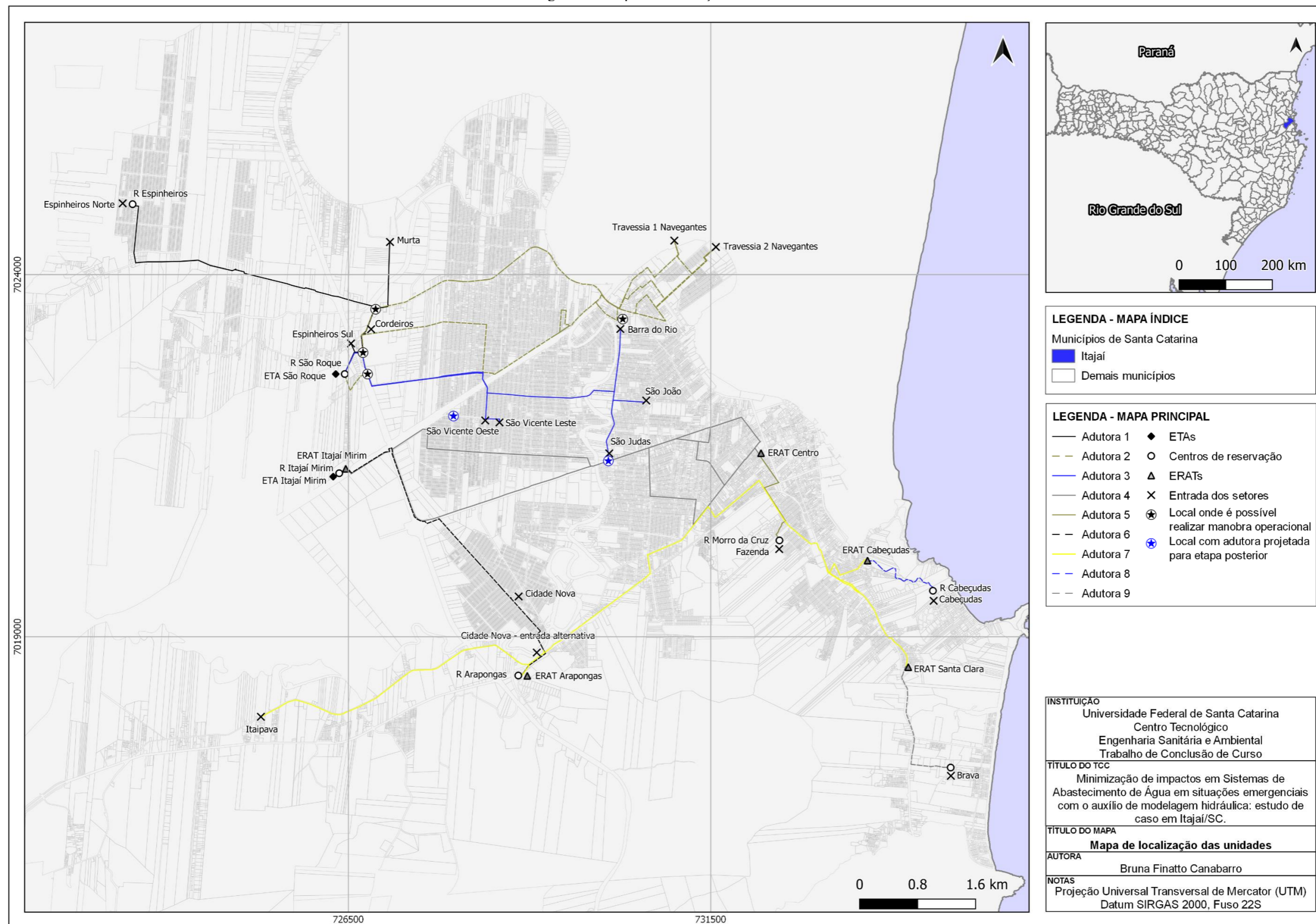
Inicialmente ressalta-se que cada ETA terá sua área de influência bem delimitada, não havendo um mesmo setor ou unidade que seja abastecido por mais de uma ETA. Ainda, devido a setorização, cada setor é abastecido por um trajeto bem delimitado.

Figura 12 - Mapa dos setores de abastecimento



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 13 - Mapa de localização das unidades



Fonte: Autoria própria (2021)

Conforme a empresa projetista, a ETA São Roque está localizada em cota igual a 51 metros, aproximadamente, e possui três reservatórios anexos a sua estrutura. Devido a sua cota elevada, toda a área de influência sob essa ETA é abastecida por gravidade. Dos reservatórios São Roque partem três adutoras (adutora 1, 2 e 3), as quais abastecem a porção centro-norte do município, bem como o município de Navegantes.

A adutora 1 é responsável por transportar água do complexo São Roque até o reservatório Espinheiros, abastecendo nesse trajeto os setores Espinheiros Sul, Cordeiros e Murta. Esses três setores estão localizados em cota média igual a 4,78 metros. Já o reservatório Espinheiros é um reservatório do tipo elevado, com cota mínima e máxima de operação iguais a 24 e 30 metros, respectivamente. Desse reservatório a água segue para o setor Espinheiros Norte, por gravidade. Essa região abastecida pela adutora 1 é a porção noroeste do município.

A adutora 2, que também parte da ETA e reservatórios São Roque, é responsável por abastecer unicamente o município de Navegantes. O abastecimento desse município ocorre por meio de duas tubulações em travessias (travessia 1 e travessia 2), ambas abastecidas pela adutora 2. Os pontos considerados estão localizados em cota média igual a 1,40 metros, próximo ao rio Itajaí Açu.

A última adutora que parte da ETA e reservatórios São Roque é a adutora 3. Essa adutora é responsável por abastecer diretamente cinco setores: São Vicente Oeste, São Vicente Leste, Barra do Rio, São João e São Judas. A cota na entrada desses setores varia entre 3,00 e 4,00 metros. Esses setores compreendem a região centro-norte do município de Itajaí.

Já a região abastecida pela ETA Itajaí Mirim possui mais unidades localizadas instaladas. A ETA Itajaí Mirim ainda não foi implantada, porém é estimada que seja instalada em cota aproximadamente igual a 5,00 metros. Anexa a ETA serão instalados um reservatório e uma ERAT, responsáveis por armazenar e recalcar a água para parte da cidade. Da ERAT partem duas adutoras: adutora 4 e adutora 6.

A adutora 4 é responsável por transportar a água até a ERAT Centro, localizada na região centro-leste do município, em cota igual a 4,00 aproximadamente. Da ERAT Centro a água é recalçada para os reservatórios Morro da Cruz, por meio da adutora 5. Os reservatórios Morro da Cruz estão localizados em cota elevada, e operam com nível mínimo e máximo iguais a 49,52 metros e 54,26 metros, respectivamente. Dos reservatórios Morro da Cruz a água segue para abastecer o setor Fazenda.

Já a adutora 6 transporta a água recalçada pela ERAT Itajaí Mirim até o reservatório Arapongas, que opera com níveis mínimo e máximo iguais a 5,20 e 10,05 metros,

respectivamente. Nesse trajeto a adutora 6 bifurca para abastecer o setor Cidade Nova, o qual possui cota na entrada do setor igual a 4,00 metros.

Do reservatório Arapongas a água é recalçada pela ERAT Arapongas, anexa ao reservatório, para diversos lugares por meio da adutora 7. A adutora 7 se bifurca ainda próximo à ERAT Arapongas: o primeiro trecho encaminha água diretamente para o setor Itaipava (cota na entrada aproximadamente igual a 4,50 metros), enquanto o segundo trecho encaminha água para a ERAT Cabeçadas e para a ERAT Santa Clara.

A ERAT Cabeçadas está localizada em cota aproximada de 6,00 metros, e é responsável por recalcar a água até os reservatórios Cabeçadas por meio da adutora 8. Essa adutora atravessa um morro, com cota máxima igual a 95,95 metros de altura, e chega nos reservatórios Cabeçadas, que possuem níveis mínimo e máximo de operação iguais a 89,05 e 92,80 metros. Dos reservatórios Cabeçadas a água segue para abastecer o setor Cabeçadas.

Já a ERAT Santa Clara está localizada em cota aproximada de 26,50 metros, e recalca água para o reservatório Brava por meio da adutora 9. Da mesma maneira que a adutora 8, a adutora 9 atravessa um morro, com cota máxima igual a 56,50 metros aproximadamente, até chegar no reservatório Brava. O reservatório Brava foi projetado por uma empresa projetista, sendo propostos níveis mínimo e máximo de operação iguais a 38,00 e 42,00 metros. O reservatório Brava abastece tanto o setor Brava, quanto o ponto de venda de água para o município de Balneário Camboriú. Esse ponto de venda está localizado internamente ao setor Brava.

Assim, observa-se que a maior parte dos setores são abastecidos pela ETA São Roque, a qual inclusive produz e destina água para o município de Navegantes. Ainda, ressalta-se que os reservatórios São Roque são responsáveis por armazenar a água distribuída para 08 dos 14 setores de abastecimento, além da demanda exportada para Navegantes. Toda a região abastecida por essa ETA opera por gravidade, não sendo observado nenhuma estação de recalque nessa região.

Já a área de influência da ETA Itajaí Mirim se apresenta mais complexa, pois é onde se localizam as cinco estações de recalque do SAA e cinco dos sete centros de reservação do SAA. Nessa área de influência está presente o ponto de venda de água para o município de Balneário Camboriú.

Em relação aos pontos de demanda exportada, cabe ressaltar que o município de Navegantes recebe sua água em dois pontos de consumo próximos, denominados de travessia 1 e travessia 2. O consumo de Navegantes ocorre de acordo com a demanda do município, ou seja, não é um valor fixo exportado e varia conforme a necessidade do mesmo. Já o município

de Balneário Camboriú ainda não compra a água produzida por Itajaí, porém é prevista essa venda e, portanto, considerada no projeto da empresa responsável. Esse ponto de venda para Balneário Camboriú está previsto em um único ponto do SAA, localizado em tubulação interna ao setor Brava. Essa comercialização irá ocorrer em um valor fixo de 60 L/s.

Sobre as demandas dos setores, conforme apresentado no Item 3.4 foi estimada a demanda de cada setor considerando o acesso intermediário igual a 50 L/hab./dia. Para tanto, foi considerada a população estimada para o ano de 2024 por uma empresa projetista, sendo 2024 o último ano da primeira etapa do projeto realizado pela referida empresa. Essas estimativas são apresentadas na Tabela 9 a seguir, bem como a pressão mínima a ser garantida na entrada de cada setor para que seja possível abastecer, em média, todos os pontos de consumo.

Tabela 9 – População, demanda e pressão mínima dos setores considerando acesso intermediário

Setor	População estimada para 2024 (hab.)	Demanda considerando acesso intermediário – D_{AI} (m³/dia)	Pressão mínima (mca)
Espinheiros Norte	16.460	988	Ver nota ⁽²⁾
Espinheiros Sul	5.621	337	32
Murta	32.789	1.967	30
Cordeiros	31.654	1.899	33
São Vicente Leste	30.320	1.819	16
São Vicente Oeste	28.996	1.740	17
São João	16.741	1.004	13
São Judas	43.056	2.583	17
Navegantes (travessias 1 e 2)	156.409	9.385	5 ⁽³⁾
Barra do Rio	12.178	731	15
Fazenda	38.393	2.304	Ver nota ⁽²⁾
Brava	13.551 ⁽¹⁾	813	Ver nota ⁽²⁾
Cidade Nova	27.464	1.648	20
Itaipava	7.140	428	35
Cabeçudas	3.539	212	Ver nota ⁽²⁾
Total	464.311	27.859	-

(1) População somente do setor Brava, sem considerar a população de Balneário Camboriú abastecida pela vazão exportada de 60 L/s, de acordo com a empresa projetista.

(2) Setor imediatamente a jusante de reservatório, onde toda água que sai do mesmo sai com pressão mínima suficiente para abastecer, em média, todas economias do setor.

(3) Pressão mínima considerada suficiente no ponto de exportação de água para o município de Navegantes, de acordo com a empresa projetista.

Fonte: Adaptado da empresa projetista (2021)

4.2 FRAGILIDADES DA MACRODISTRIBUIÇÃO

Os riscos sob os quais as adutoras do sistema de abastecimento de água de Itajaí operam foram definidos em termos de perigo, exposição e vulnerabilidade, conforme metodologia apresentada.

Em relação a definição dos setores prioritários em termos de demanda, a Tabela 10 apresenta a caracterização dos mesmos. Observa-se que o município de Navegantes é responsável por 28,48% da demanda do SAA, enquanto os setores Murta, Fazenda e São Judas são os que mais demandam água internamente.

Tabela 10 – Caracterização dos setores de abastecimento

Setor de abastecimento	Demanda máxima diária	
	(L/s)	%
Murta	135,82	9,69%
Fazenda	133,13	9,50%
São Judas	118,28	8,44%
Brava + Balneário Camboriú	36,55 + 60	2,61% + 4,28% = 6,89%
Cordeiros	87,5	6,24%
São Vicente Leste	82,27	5,87%
São Vicente Oeste	80,54	5,75%
Cidade Nova	73,52	5,25%
São João	46,77	3,34%
Espinheiros Norte	43,26	3,09%
Barra do Rio	40,69	2,90%
Itaipava	33,1	2,36%
Espinheiros Sul	21,39	1,53%
Cabeçudas	9,48	0,68%
Travessia 1 para Navegantes	279,42	19,94%
Travessia 2 para Navegantes	119,75	8,54%
Total	1.401,47	100%

Fonte: Adaptado da empresa projetista (2021).

Já sobre a presença de grupos prioritários, nos setores Cordeiros e São Vicente Leste foi identificada a presença de uma Unidade de Pronto Atendimento em cada. Já no setor Fazenda há a presença do Hospital e Maternidade Marieta Konder Bornhausen, e no setor São Judas o Hospital Infantil Pequeno Anjo. Essas quatro unidades apresentadas integram o sistema de urgência e emergência da cidade de Itajaí (ITAJAÍ, 2021). Ainda, no setor Brava está localizada o Hospital e Maternidade Santa Luíza, enquanto no município de Navegantes há a presença do Hospital Municipal Nossa Senhora dos Navegantes. Em relação a unidades do

sistema penitenciário, no setor Itaipava está localizado o Complexo Penitenciário do Vale do Itajaí.

As informações levantadas e definidas em termos de risco (ou seja, exposição e vulnerabilidade, sendo vulnerabilidade caracterizada pela existência de adutora em paralelo e a possibilidade de se realizar manobra com outro setor/adutora), região afetada e presença de grupos prioritários são apresentadas na matriz de prioridades da Tabela 11. Após, é apresentado um mapa na Figura 14 onde são apresentados os trechos de adutoras classificados por prioridade.

Cabe ressaltar que a caracterização em termos de perigo não é apresentada na Tabela 11 a seguir, uma vez que o perigo é o mesmo para todas as adutoras, conforme apresentado no Item 3.2. As adutoras foram identificadas pelo prefixo “A” seguida de sua numeração, enquanto os trechos das adutoras foram identificados pelo prefixo “T” seguido de sua numeração. Por exemplo, o trecho 1 da adutora 2 é apresentado por “A2-T1”. No total foram analisados 35 trechos de adutoras.

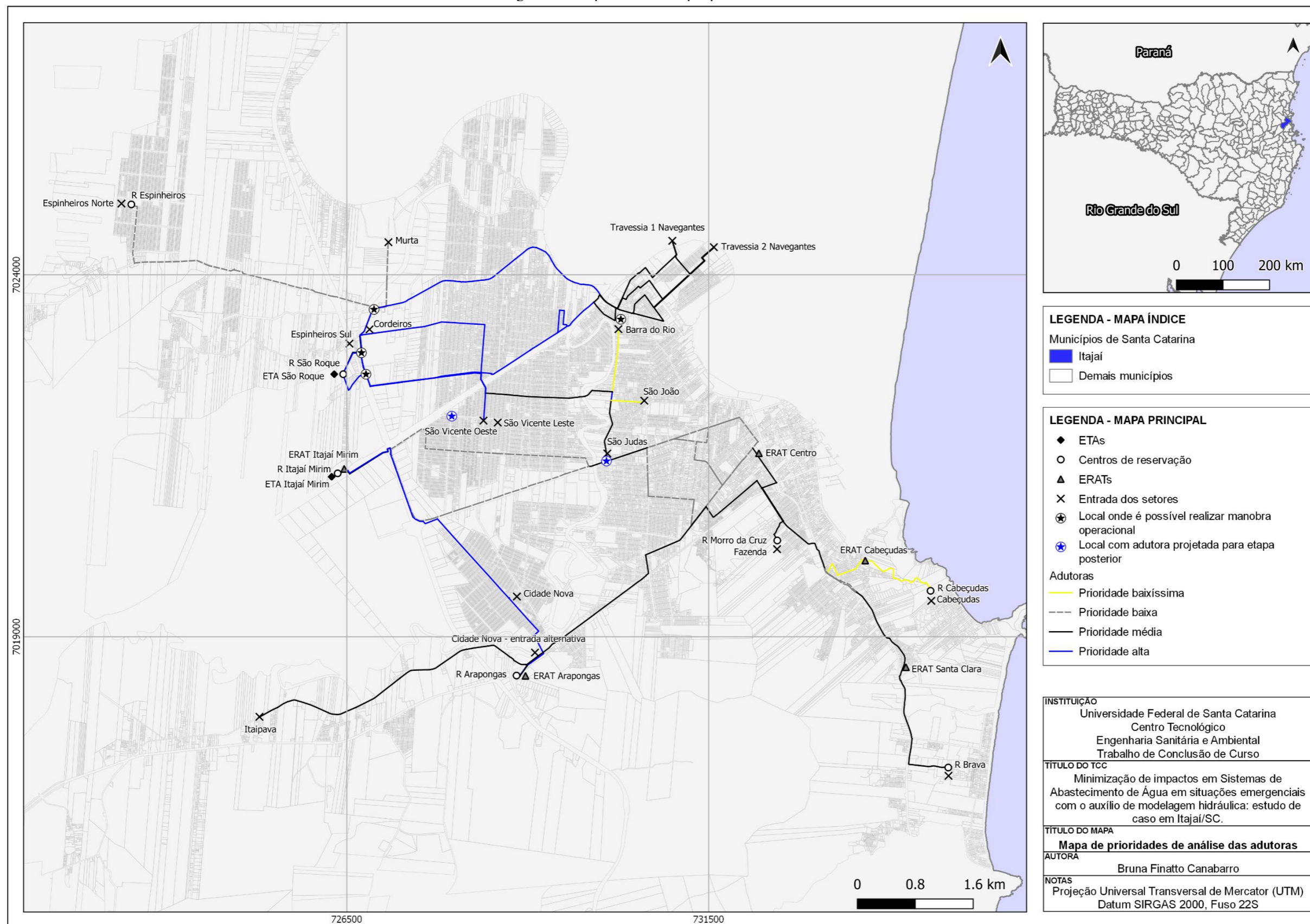
Tabela 11 – Matriz de prioridade

Unidade	Risco			Região afetada em termos de demanda (altíssima = 1,00; alta = 0,75; média = 0,50; baixa = 0,25; baixíssima = 0,00)	Presença de grupo prioritário (sim = 1,00; não = 0,00)	Prioridade	
	Exposição	Vulnerabilidade				Cálculo	Classificação
	Localização (via principal = 1,00; majoritariamente em via principal = 0,75; via principal e secundária = 0,50; majoritariamente em via secundária = 0,25; via secundária = 0,00)	Adutora operando em paralelo (não = 1,00; sim = 0,00)	Possibilidade de manobra com outro setor/adutora (não = 1,00; sim = 0,00)				
A1-T1	0,00	1,00	0,00	0,25	1,00	2,91	Média
A1-T2	0,00	1,00	0,00	0,25	1,00	2,91	Média
A1-T3	0,00	1,00	0,00	0,25	0,00	1,41	Baixa
A1-T4	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,21	Baixa
A1-T5	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,21	Baixa
A2-T1	0,00	1,00	0,00	0,50	1,00	3,64	Alta
A2-T2	1,00	0,00	1,00	0,50	1,00	3,49	Alta
A2-T3	0,50	0,00	1,00	0,50	1,00	3,40	Alta
A2-T4	0,25	0,00	1,00	0,50	1,00	3,36	Média
A3-T1	0,25	1,00	0,00	0,50	1,00	3,68	Alta
A3-T2	1,00	0,00	1,00	0,50	1,00	3,49	Alta
A3-T3	1,00	0,00	1,00	0,50	1,00	3,49	Alta
A3-T4	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00	3,43	Alta
A3-T5	0,00	1,00	0,00	0,25	1,00	2,91	Média
A3-T6	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,85	Baixíssima
A3-T7	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00	3,43	Alta
A3-T8	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,03	Baixíssima
A3-T9	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	2,70	Média
A4-T1	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	2,53	Média
A4-T2	0,75	0,00	1,00	0,00	1,00	1,98	Baixa

Unidade	Risco			Região afetada em termos de demanda (altíssima = 1,00; alta = 0,75; média = 0,50; baixa = 0,25; baixíssima = 0,00)	Presença de grupo prioritário (sim = 1,00; não = 0,00)	Prioridade	
	Exposição	Vulnerabilidade				Cálculo	Classificação
	Localização (via principal = 1,00; majoritariamente em via principal = 0,75; via principal e secundária = 0,50; majoritariamente em via secundária = 0,25; via secundária = 0,00)	Adutora operando em paralelo (não = 1,00; sim = 0,00)	Possibilidade de manobra com outro setor/adutora (não = 1,00; sim = 0,00)				
A4-T3	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	2,03	Baixa
A4-T4	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	2,70	Média
A4-T5	0,50	0,00	1,00	0,00	1,00	1,94	Baixa
A4-T6	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	2,53	Média
A5-T1	0,25	1,00	1,00	0,00	1,00	2,57	Média
A6-T1	0,75	1,00	1,00	0,25	1,00	3,39	Alta
A7-T1	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	2,53	Média
A7-T2	0,75	1,00	1,00	0,00	1,00	2,66	Média
A7-T3	0,50	1,00	1,00	0,00	1,00	2,61	Média
A7-T4	0,25	1,00	1,00	0,00	0,00	1,07	Baixíssima
A7-T5	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	2,03	Baixa
A7-T6	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	2,03	Baixa
A7-T7	0,50	1,00	1,00	0,00	1,00	2,61	Média
A8-T1	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,03	Baixíssima
A9-T1	0,75	1,00	1,00	0,00	1,00	2,66	Média

Fonte: Aatoria própria (2021).

Figura 14 – Mapa das adutoras por prioridade de análise.



Fonte: Autoria própria (2021)

Devido à setorização e aos três pontos de exportação de água (dois para Navegantes e um para Balneário Camboriú) não foram observados trechos com região a jusante que demandem mais que 50% da demanda total do SAA (classificadas como região de demanda alta e altíssima). A influência da setorização nesse resultado deriva do fato de os setores possuírem apenas demandas inferiores a 10% da demanda total do SAA (baixíssimas); da existência de duas ETAs, pois se houvesse apenas uma única ETA os trechos mais a montante dessa única ETA encaminhariam água para regiões maiores e com mais demanda; da existência de múltiplos trechos na saída de cada ETA (da ETA São Roque partem três adutoras, enquanto que da ETA Itajaí Mirim partem duas adutoras); e de as adutoras também terem suas regiões de influência bem delimitadas. Já a exportação de água influencia na classificação da demanda uma vez que, por representarem cerca de 28,48% da demanda total do sistema (valores expressivos), aumenta o total do valor demandado pelo SAA, pelo qual a demanda de cada setor é comparada. Cabe ressaltar que, uma vez que o sistema de abastecimento foi avaliado como um todo, a existência ou não de ponto de venda de água a jusante dos trechos analisados não foi considerada um parâmetro a parte, com peso diferente. Isso deve ao fato de que a água exportada por si só já representa valores significativos de demanda do SAA, principalmente para no caso de Navegantes. Ainda, tanto em Navegantes quanto em Balneário Camboriú existem grupos prioritários, o que eleva a classificação de prioridade dos trechos de adutoras que contribuem para o abastecimento dessas regiões.

A inexistência dessas expressivas demandas impacta na classificação de prioridade, uma vez que a região afetada foi considerada o critério mais importante para o cálculo das prioridades. Dessa forma, a inobservância de trechos com prioridade de análise altíssima é atribuída, principalmente, as regiões afetadas serem classificadas como de demanda baixíssima, baixa e média (nenhuma como região de demanda alta ou altíssima).

Em relação aos demais critérios, observam-se poucos trechos onde há a possibilidade de realização de manobra operacional com outros setores/adutoras. Exceto nos trechos onde a região abastecida é na extremidade do SAA (como Espinheiros, Itaipava e Brava), a inexistência de conexões entre adutoras, isoladas por registros fechados durante a operação normal, se deve a configuração atual e projetada do sistema. Tais conexões são importantes, justamente para momentos emergenciais como os tratados nesse trabalho. Já os critérios existência de adutora em paralelo e localização das adutoras (em vias principais ou secundárias) apresentaram grande variação. A presença de adutoras operando em paralelo em condições normais ocorre, principalmente, quando observadas adutoras existentes (e não projetadas no

SAA). Quanto a localização das adutoras, é interessante observar que muitos trechos se encontram em vias secundárias, visto que vias principais costumam ser as mais prováveis de implantar tais infraestruturas por serem de longa extensão (sem curvas) e atravessarem regiões e bairros. Por fim, observa-se que a maioria dos trechos abastecem grupos prioritários.

Nesse contexto, de acordo com a Tabela 11, não foram identificados cenários de prioridade altíssima, sendo identificados 09 de prioridade alta, 14 de prioridade média, 08 de prioridade baixa e 04 de prioridade baixíssima. Dessa forma, nesse trabalho foram analisados somente os cenários de prioridade alta, totalizando 09 cenários.

Os cenários de prioridade baixíssima estão associados aos trechos que abastecem unicamente os setores Barra do Rio (A3-T6), São João (A3-T8) e Cabeçadas (A7-T4 e A8-T1). O trecho A3-T6 tem como região a jusante somente o setor Barra do Rio, o qual apresenta demanda inferior a 10% da demanda total do SAA (baixíssima) e não possui grupo prioritário, sendo atribuído valor 0,00 para ambos os critérios. Ainda, há a possibilidade de se realizar manobra operacional para abastecer tal setor, também sendo atribuído valor 0,00 a esse critério. Os dois parâmetros “negativos” para esse trecho é a tubulação estar localizada em via principal (sendo este o critério de menor peso) e não haver adutora operando em paralelo, sendo atribuídos valores 1,00 em ambos os critérios. Já os trechos que abastecem São João e Cabeçadas ambos fornecem água para locais onde a demanda é inferior a 10% da demanda total do SAA (baixíssima) e onde não há grupo prioritário, além de as tubulações estarem localizadas em via secundária. Dessa forma, o valor atribuído a esses três primeiros critérios foi 0,00. Os demais parâmetros são “negativos” (maiores que zero), porém os parâmetros de maior peso (demanda da região afetada e existência de grupo prioritário) são “positivos”.

Já os cenários de prioridade alta apresentam similaridades quanto aos critérios considerados: pelo menos parte dos trechos analisados estão localizados em via principal; pelo menos um dos dois critérios de vulnerabilidade (adutora operando em paralelo e possibilidade de manobra com outra adutora/setor) possuem como resposta “não” (resultado “negativo”); todos os trechos de prioridade alta possuem grupo prioritário na região a jusante; e todos os trechos de prioridade alta apresentam demanda baixa ou média. Assim, nota-se que os resultados de análise de prioridade são consistentes com o esperado da metodologia.

Cabe ressaltar que, apesar de a ERAT Arapongas destinar água para diversos locais (setores Itaipava, Brava e Cabeçadas, ressaltando o ponto de venda para Balneário Camboriú interno ao setor Brava) pelo trecho A7-T1, os setores Cabeçadas e Brava representam pequena porcentagem de demanda do SAA (critério mais importante), não incrementando

significativamente a prioridade de análise dos trechos da adutora que parte dessa estação de recalque.

4.3 IMPACTOS NO SISTEMA EM SITUAÇÕES EMERGENCIAIS

Definidos os cenários a serem modelados, foram realizadas simulações em situações emergenciais para avaliar os impactos causados no sistema, ainda sem a proposição de estratégias de intervenção. Entretanto, em quatro dos cinco trechos sob danos ou falhas resulta em interrupção do abastecimento dos setores. Isso mostra o quanto o sistema é vulnerável a falhas, visto que o rompimento da maioria das adutoras resulta no desabastecimento completo dos setores a jusante.

Dessa forma, foram simulados somente 04 cenários em situação emergencial (A2-T2, A2-T3, A3-T2 e A3-T3), nos quais há a possibilidade de abastecimento contínuo e/ou intermitente das regiões a jusante da adutora em questão devido a existência de trajetos operando em paralelo em condições normais. Nessas simulações se observou que somente em um trecho (A3-T3) não há a necessidade de se realizar intervenção, devido ao impacto causado por essa falha não interromper o abastecimento dos setores a jusante por tempo suficiente a não garantir o acesso intermediário de água de 50 L/hab./dia aos consumidores (Figura 17). Esse resultado será melhor discutido posteriormente.

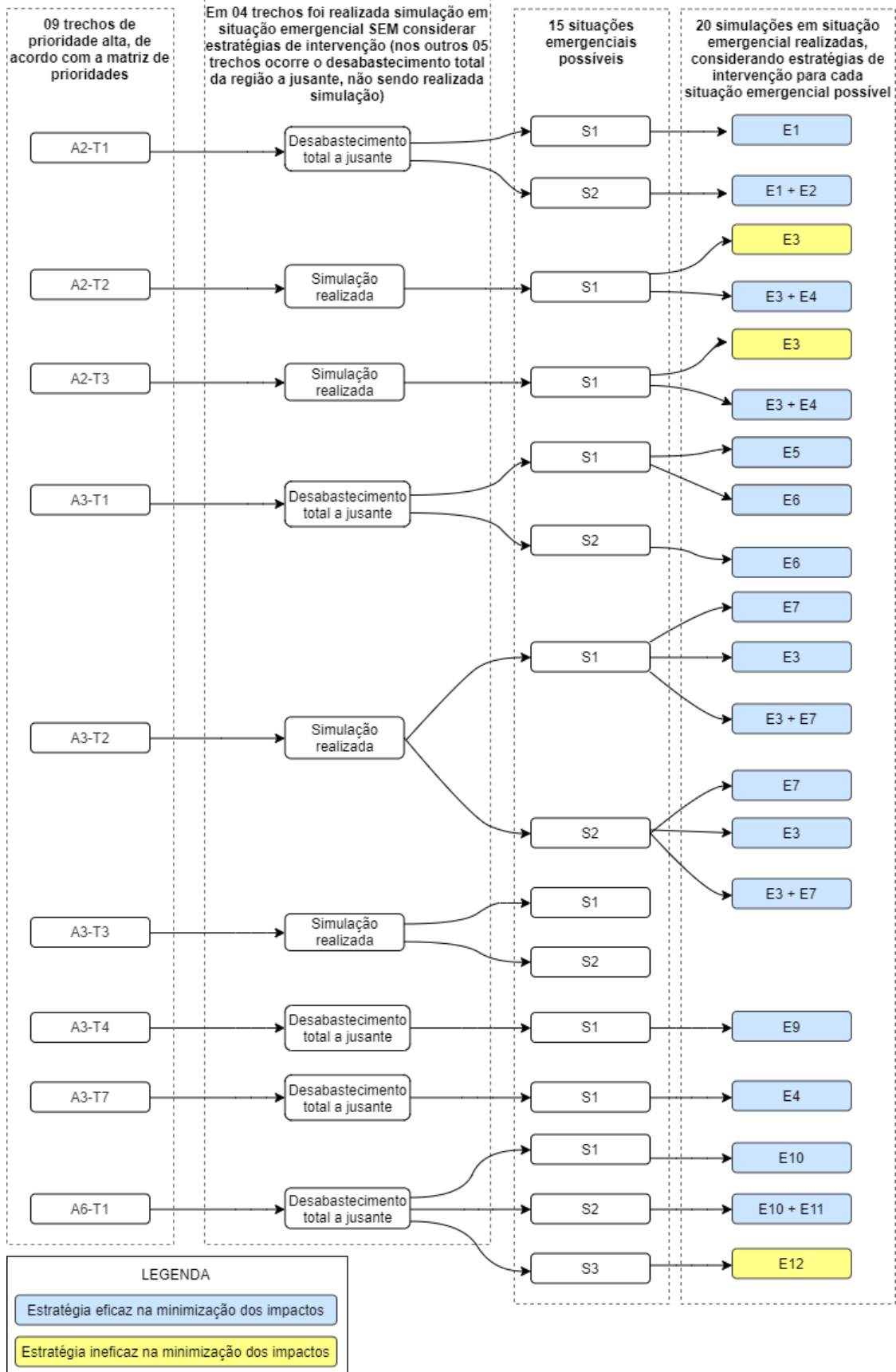
Observados os impactos causados no SAA após as falhas nos trechos de adutoras classificados como prioridade alta, foram realizadas simulações considerando a aplicação das estratégias de minimização dos impactos, apresentadas no Item 3.4. Em alguns casos foram observadas múltiplas possibilidades de rompimento de um mesmo trecho de adutora (localizados em ruas ou em posições relativas as demais adutoras diferentes), sendo destrinchados em mais simulações.

Na Figura 15 a seguir são elencadas todas as simulações realizadas. Ao todo, foram realizadas 24 simulações: 04 emergenciais sem intervenção e 20 emergenciais com diferentes alternativas de intervenção. As diferentes situações emergenciais possíveis para cada trecho analisado se devem ao fato de que podem ocorrer rupturas em diferentes pontos da adutora. Dependendo do local onde há uma ruptura, diferentes estratégias são aplicáveis.

Já no Quadro 4 todas as simulações realizadas são sintetizadas, inclusive os resultados obtidos nas mesmas. Conforme explicado na metodologia, o impacto para o SAA foi considerado minimizado a níveis aceitáveis quando a estratégia adotada foi eficaz para garantir

acesso intermediário à população – fornecimento mínimo igual a 50 L/d/hab., conforme OMS (2017). Esse acesso é possível quando a pressão na entrada dos setores é maior ou igual as pressões apresentadas na Tabela 9.

Figura 15 - Simulações realizadas elencadas



Fonte: Autoria própria (2021)

Quadro 4 – Resumo dos resultados das simulações visando a redução da vulnerabilidade.

Unidade	Região a jusante	Resultados da simulação <u>sem</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora	Cenários	Intervenção considerada	Resultados da simulação <u>com</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora
A2-T1 (APÊNDICE J)	Travessias para Navegantes	Interrupção total no abastecimento da região a jusante	Situação 1: rompimento de trecho entre a ETA São Roque e o ponto de interligação de A1 com A2 (com registro usualmente fechado). Ver ponto indicado como “S1” no mapa do APÊNDICE J	Aplicação de uma única estratégia. <u>Estratégia 01</u> : abrir registro de manobra entre A1 e A2, na rua Henrique Michels Júnior próximo a descida das adutoras A1 e A3 da ETA São Roque. Ver ponto indicado como “E1” no mapa do APÊNDICE J	Interligação entre A1 e A2 impacta nos setores abastecidos por A1 (Espinheiros Sul, Cordeiros, Murta e Espinheiros Norte). Entretanto, todos esses setores bem como as travessias resultaram em pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado. Os reservatórios na área de influência de São Roque (São Roque e Espinheiros) não esvaziam (APÊNDICE K)
			Situação 2: rompimento de trecho entre o ponto de interligação de A1 com A2 (com registro usualmente fechado) e o ponto de bifurcação de A2. Ver ponto indicado como “S2” no mapa do APÊNDICE J	Aplicação de duas estratégias concomitantemente. Devido a localização do rompimento considerado nessa situação, não é possível utilizar apenas uma estratégia de intervenção. <u>Estratégia 01</u> : abrir registro de manobra entre A1 e A2, na rua Henrique Michels Júnior próximo a descida das adutoras A1 e A3 da ETA São Roque. Ver ponto indicado como “E1” no mapa do APÊNDICE J <u>Estratégia 02</u> : abrir um segundo registro de manobra entre A1 e A2, na rua Onildo Reis, esquina com a rua Dr. Reinaldo Schmithausen. Ver ponto indicado como “E2” no mapa do APÊNDICE J	Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 1 de A2-T1 (APÊNDICE L)
A2-T2 (APÊNDICE M)	Travessias para Navegantes	Abastecimento intermitente das travessias (APÊNDICE N)	Situação 1: rompimento de trecho na rua Dr. Reinaldo Schmithausen. Ver ponto indicado como “S1” no mapa do APÊNDICE M	Aplicação de uma única estratégia. <u>Estratégia 03</u> : abrir registro próximo à entrada do setor Barra do Rio, onde interliga A2 e A3. Ver ponto indicado como “E3” no mapa do APÊNDICE M	Interligação entre A2 e A3 impacta nos setores abastecidos por A3 (São Vicente Oeste, São Vicente Leste, São João, São Judas e Barra do Rio). Estratégia não é eficaz, uma vez que ocorre intermitência no abastecimento das travessias, além de ocorrer pressão inferior a indicada na Tabela 9 nos setores São João, São Judas e Barra do Rio (iguais a 13, 17 e 15 mca, respectivamente) (APÊNDICE O)
				Aplicação de duas estratégias concomitantemente, visto que a aplicação de apenas uma estratégia não é suficiente. <u>Estratégia 03</u> : abrir registro próximo à entrada do setor Barra do Rio, onde interliga A2 e A3. Ver ponto indicado como “E3” no mapa do APÊNDICE M <u>Estratégia 04</u> : antecipar implantação de trecho de adutora projetado para 2025, em FoFo DN 450 e aproximadamente 19 metros de extensão, localizado na esquina entre as ruas Heitor Liberato e José Pereira Liberato (assim, São Judas passa a ser abastecido pela ETA Itajaí Mirim, a qual deve ter sua produção aumentada dentro da sua capacidade para suprir essa demanda). Ver ponto indicado como “E4” no mapa do APÊNDICE M	Interligação entre A2 e A3 impacta nos setores abastecidos por A3 (São Vicente Oeste, São Vicente Leste, São João, São Judas e Barra do Rio). Entretanto, todos esses setores bem como as travessias resultaram em pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado. Observa-se que o reservatório Arapongas tende a esvaziar próximo ao último dia de simulação, porém isso não afeta criticamente as regiões a jusante de si. Ainda, tal situação é passível de solução por meio de ajuste nos controles de operação. Os demais reservatórios (São Roque, Espinheiros, Itajaí

Unidade	Região a jusante	Resultados da simulação <u>sem</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora	Cenários	Intervenção considerada	Resultados da simulação <u>com</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora
					Mirim, Morro da Cruz, Cabeçadas e Brava) não esvaziam (APÊNDICE P)
A2-T3 (APÊNDICE Q)	Travessias para Navegantes	Abastecimento intermitente das travessias (APÊNDICE R)	Situação 1: rompimento de trecho na pior hipótese (na rua Agostinho Alves Ramos) * Ver ponto indicado como “S1” no mapa do APÊNDICE Q	Aplicação de uma única estratégia. <u>Estratégia 03</u> : abrir registro próximo à entrada do setor Barra do Rio, onde interliga A2 e A3. Ver ponto indicado como “E3” no mapa do APÊNDICE Q	Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 1 de A2-T2, considerando aplicação da estratégia 03 (APÊNDICE S)
				Aplicação de duas estratégias concomitantemente, visto que a aplicação de apenas uma estratégia não é suficiente. <u>Estratégia 03</u> : abrir registro próximo à entrada do setor Barra do Rio, onde interliga A2 e A3. Ver ponto indicado como “E3” no mapa do APÊNDICE Q <u>Estratégia 04</u> : antecipar implantação de trecho de adutora projetado para 2025, em FoFo DN 450 e aproximadamente 19 metros de extensão, localizado na esquina entre as ruas Heitor Liberato e José Pereira Liberato (assim, São Judas passa a ser abastecido pela ETA Itajaí Mirim, a qual deve ter sua produção aumentada dentro da sua capacidade para suprir essa demanda). Ver ponto indicado como “E4” no mapa do APÊNDICE Q	Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 1 de A2-T2, considerando aplicação das estratégias 03 e 04 (APÊNDICE T)
A3-T1 (APÊNDICE U)	Setores São Vicente Leste, São Vicente Oeste, Barra do Rio, São João e São Judas	Interrupção total no abastecimento da região a jusante	Situação 1: rompimento de trecho entre a ETA São Roque e a rua Henrique Michels Júnior. Ver ponto indicado como “S1” no mapa do APÊNDICE U	Aplicação de uma única estratégia. <u>Estratégia 05</u> : abrir registro de manobra entre A1 e A3, na rua Henrique Michels Júnior próximo a descida das adutoras A1 e A3 da ETA São Roque. Ver ponto indicado como “E5” no mapa do APÊNDICE U	Interligação entre A1 e A3 impacta nos setores abastecidos por A1 (Espinheiros Sul, Cordeiros, Murta e Espinheiros Norte). Entretanto, os resultados indicaram pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado, com exceção do setor São Judas nos horários de maior consumo. Ainda assim a estratégia é eficaz, visto que é fornecida vazão de 6.704 m ³ /dia (aproximadamente igual a 156 L/hab./dia) para São Judas nos momentos em que a pressão é maior ou igual a 17 mca. Esse valor é cerca de 2,5 vezes maior que o valor de demanda de acesso intermediário (60 L/hab./dia, considerando perdas). Nenhum reservatório esvazia (APÊNDICE V)
				Aplicação de uma única estratégia. <u>Estratégia 06</u> : abrir registro de manobra entre A2 e A3, na rua Henrique Michels Júnior próximo a descida da adutora A2 da ETA São Roque. Ver ponto indicado como “E6” no mapa do APÊNDICE U	Interligação entre A1 e A3 impacta nos setores abastecidos por A1 (Espinheiros Sul, Cordeiros, Murta e Espinheiros Norte). Entretanto, todos os setores resultaram em pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado. Nenhum reservatório esvazia (APÊNDICE W)
			Situação 2: rompimento de trecho na rua Henrique Michels Júnior. Ver ponto	Aplicação de uma única estratégia. <u>Estratégia 06</u> : abrir registro de manobra entre A2 e A3, na rua Henrique Michels Júnior próximo a descida da adutora A2 da ETA São Roque. Ver ponto indicado como “E6” no mapa do APÊNDICE U	Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 1 de A3-T1, considerando aplicação da estratégia 06 (APÊNDICE X)

Unidade	Região a jusante	Resultados da simulação <u>sem</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora	Cenários	Intervenção considerada	Resultados da simulação <u>com</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora
			indicado como “S2” no mapa do APÊNDICE U		
A3-T2 (Figura 18)	Setores São Vicente Leste, São Vicente Oeste, Barra do Rio, São João e São Judas	Todos os setores a jusante com abastecimento a pressão inferior a mínima em parte do tempo, inclusive abastecimento intermitente em alguns setores (Figura 19)	Situação 1: rompimento de trecho na rua Mário Uriarte. Ver ponto indicado como “S1” no mapa da Figura 18	<p>Aplicação de uma única estratégia.</p> <p><u>Estratégia 07</u>: implantar novo trecho de adutora, em FoFo DN 600 e aproximadamente 8 metros de extensão, localizado na esquina entre a avenida Mário Uriarte e a rua Gustavo Bernedet, interligando A2 e A3 e implantar novo trecho de adutora, em FoFo DN 400 e aproximadamente 13 metros de extensão, localizado no mesmo local, interligando A3-T2 e A3-T3. Ver ponto indicado como “E7” no mapa da Figura 18</p>	<p>Interligação entre A2 e A3 impacta na região abastecida por A2 (travessias para Navegantes). Entretanto, os resultados indicaram pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado, com exceção do setor São Judas, São João e Barra do Rio nos horários de maiores consumo. Ainda assim a estratégia é eficaz, visto que é fornecida vazão de 3.543 m³/dia (aproximadamente igual a 82 L/hab./dia) para São Judas nos momentos em que a pressão é maior ou igual a 17 mca (valor cerca de 1,4 vezes maior que o valor de demanda de acesso intermediário, igual a 60 L/hab./dia considerando perdas); fornecida vazão de 2.644 m³/d (aproximadamente igual a 158 L/hab./dia) para São João em pressão maior ou igual a 13 mca (valor cerca de 2,6 vezes maior que o valor de demanda de acesso intermediário, igual a 60 L/hab./dia considerando perdas); e fornecida vazão de 2.142 m³/dia (aproximadamente igual a 176 L/hab./dia) para Barra do Rio em pressão maior ou igual a 15 mca (valor cerca de 2,9 vezes maior que o valor de demanda de acesso intermediário, igual a 60 L/hab./dia considerando perdas). Nenhum reservatório esvazia (Figura 20)</p>
				<p>Aplicação de uma única estratégia.</p> <p><u>Estratégia 03</u>: abrir registro próximo à entrada do setor Barra do Rio, onde interliga A2 e A3. Ver ponto indicado como “E3” no mapa da Figura 18</p>	<p>Interligação entre A2 e A3 impacta na região abastecida por A2 (travessias para Navegantes). Entretanto, os resultados indicaram pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado, com exceção do setor São Judas nos horários de maiores consumo. Ainda assim a estratégia é eficaz, visto que é fornecida vazão de 6.226 m³/dia (aproximadamente igual a 145 L/hab./dia) para São Judas nos momentos em que a pressão é maior ou igual a 17 mca (valor cerca de 2,4 vezes maior que o valor de demanda de acesso intermediário, igual a 60 L/hab./dia considerando perdas). Nenhum reservatório esvazia (Figura 21)</p>
				<p>Aplicação de duas estratégias concomitantemente, com vistas a minimizar mais ainda os impactos causados aos setores afetados.</p> <p><u>Estratégia 08</u>: aplicar estratégias 03 e 07</p>	<p>Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 1 de A3-T2, considerando aplicação da estratégia 03. A única diferença é a vazão fornecida para São Judas, igual a 6.687 m³/dia (aproximadamente igual a 155 L/hab./dia) nos momentos em que a pressão é maior ou igual a 17 mca (valor cerca de 2,6 vezes</p>

Unidade	Região a jusante	Resultados da simulação <u>sem</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora	Cenários	Intervenção considerada	Resultados da simulação <u>com</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora
					maior que o valor de demanda de acesso intermediário, igual a 60 L/hab./dia considerando perdas) (Figura 22)
			Situação 2: rompimento de trecho na avenida Campos Novos. Ver ponto indicado como "S2" no mapa da Figura 18	Aplicação de uma única estratégia. <u>Estratégia 07</u> : implantar novo trecho de adutora, em FoFo DN 600 e aproximadamente 8 metros de extensão, localizado na esquina entre a avenida Mário Uriarte e a rua Gustavo Bernedet, interligando A2 e A3 e implantar novo trecho de adutora, em FoFo DN 400 e aproximadamente 13 metros de extensão, localizado no mesmo local, interligando A3-T2 e A3-T3. Ver ponto indicado como "E7" no mapa da Figura 18	Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 1 de A3-T2, considerando aplicação da estratégia 7, porém com pressões maiores observadas (APÊNDICE AA)
				Aplicação de uma única estratégia. <u>Estratégia 03</u> : abrir registro próximo à entrada do setor Barra do Rio, onde interliga A2 e A3. Ver ponto indicado como "E3" no mapa da Figura 18	Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 3 de A3-T2, considerando aplicação da estratégia 2, porém com pressões maiores observadas (APÊNDICE BB)
				Aplicação de duas estratégias concomitantemente, com vistas a minimizar mais ainda os impactos causados aos setores afetados. <u>Estratégia 08</u> : aplicar estratégias 03 e 07	Interligação entre A2 e A3 impacta na região abastecida por A2 (travessias para Navegantes). Entretanto, os resultados indicaram pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado (APÊNDICE CC)
A3-T3 (Figura 16)	Setores São Vicente Leste, São Vicente Oeste, Barra do Rio, São João e São Judas	Setor São Judas sob pressão inferior a mínima por cerca de 06h/dia (Figura 17)	Situação 1: rompimento de trecho na rua Mário Uriarte. Ver ponto indicado como "S1" no mapa da Figura 16 Situação 2: rompimento de trecho na avenida Campos Novos. Ver ponto indicado como "S2" no mapa da Figura 16	Não há necessidade de minimização dos impactos: a vazão fornecida é igual 7.166 m ³ /dia (aproximadamente igual a 166 L/hab./dia) para o setor São Judas nos momentos em que a pressão é maior ou igual a 17 mca (valor cerca de 2,8 vezes maior que o valor de demanda de acesso intermediário, igual a 60 L/hab./dia considerando perdas). Tamanha diferença nos resultados em relação ao trecho operando em paralelo (A3-T2) devido ao diâmetro dos trechos: A3-T2 em DN 600 e A3-T3 em DN 400	Não se aplica
A3-T4 (Figura 23)	Setores São Vicente Leste e São Vicente Oeste	Interrupção total no abastecimento da região a jusante	Situação 1: rompimento de trecho na avenida Campos Novos. Ver ponto indicado como "S1" no mapa da Figura 23	Aplicação de duas estratégias concomitantemente: uma física (antecipação de trecho a ser implantado) e outra de ajustes de operação. O ajuste de operação é necessário visto que o subsistema de Itajaí Mirim é complexo, exigindo alterações nos controles de operação para que não haja desabastecimento da população. <u>Estratégia 09</u> : Antecipar implantação de trecho de adutora projetada para 2030, em FoFo DN 450 e extensão aproximada de 982 metros, (assim, São Vicente Leste e São Vicente Oeste passam a ser abastecidos pela ETA Itajaí Mirim, a qual deve ter	Interligação entre A3 e A4 impacta nos setores abastecidos pela ETA Itajaí Mirim (Cidade Nova, Itaipava, Fazenda, Cabeçudas e Brava + Balneário Camboriú). Entretanto, os resultados indicaram pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado, com exceção dos setores SVO e SVL entre 08h e 24h, e no setor Fazenda durante 08 horas no último dia de simulação. Ainda assim a estratégia é eficaz, visto que é fornecida vazão de 3.768 m ³ /dia

Unidade	Região a jusante	Resultados da simulação <u>sem</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora	Cenários	Intervenção considerada	Resultados da simulação <u>com</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora
				<p>sua produção aumentada dentro da sua capacidade para suprir essa demanda). Ver ponto indicado como “E9” no mapa da Figura 23.</p> <p><u>Associar a ajustes de controle:</u> setores SVO e SVL abastecidos somente entre 00h e 08h; quando o reservatório Arapongas estiver com menos de 20% da sua capacidade a entrada do reservatório Morro da Cruz deve ser fechada e aberta somente quando o reservatório Arapongas chegar a 40%; reservatórios Brava e Cabeçadas devem operar somente entre 20% e 40% de suas capacidades.</p>	(aproximadamente igual a 127 L/hab./dia) para SVL e SVO entre 00h e 08h a pressão mínima requerida 17 e 16 mca (valor cerca de 2,1 vezes maior que o valor de demanda de acesso intermediário, igual a 60 L/hab./dia considerando perdas); e fornecida vazão de 7.921 m ³ /d (aproximadamente igual a 206 L/hab./dia) para Fazenda no último dia de simulação (valor cerca de 3,4 vezes maior que o valor de demanda de acesso intermediário, igual a 60 L/hab./dia considerando perdas). (Figura 24 e Figura 25)
A3-T7 (APÊNDICE DD)	Setores São João e São Judas	Interrupção total no abastecimento da região a jusante	Situação 1: rompimento de trecho na rua José Pereira Liberato. Ver ponto indicado como “S1” no mapa do APÊNDICE DD	<p>Aplicação de duas estratégias concomitantemente: uma física (antecipação de trecho a ser implantado) e outra de ajustes de operação. O ajuste de operação é necessário visto que o subsistema de Itajaí Mirim é complexo, exigindo alterações nos controles de operação para que não haja desabastecimento da população.</p> <p><u>Estratégia 04:</u> Antecipar implantação de trecho de adutora projetado para 2025, em FoFo DN 450 e aproximadamente 19 metros de extensão, localizado na esquina entre as ruas Heitor Liberato e José Pereira Liberato (assim, São Judas e São João passam a ser abastecidos pela ETA Itajaí Mirim, a qual deve ter sua produção aumentada dentro da sua capacidade para suprir essa demanda). Ver ponto indicado como “E4” no mapa do APÊNDICE DD.</p> <p><u>Associar a ajustes de controle:</u> setores SJo e SJu abastecidos somente entre 00h e 08h; quando o reservatório Arapongas estiver com menos de 20% da sua capacidade a entrada do reservatório Morro da Cruz deve ser fechada e aberta somente quando o reservatório Arapongas chegar a 40%; reservatórios Brava e Cabeçadas devem operar somente entre 20% e 40% de suas capacidades.</p>	Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 1 de A3-T4, considerando aplicação da estratégia 9 com ajuste de controle, porém com pressões maiores observadas (APÊNDICE EE e APÊNDICE FF)
A6-T1 (Figura 26)	Setor Cidade Nova e reservatório Arapongas (reservatórios Cabeçadas e Brava; setores Itaipava, Cabeçadas e Brava; Balneário Camboriú)	Interrupção total no abastecimento da região a jusante	Situação 1: Rompimento de trecho na rua José Natal Cugik. Ver ponto indicado como “S1” no mapa da Figura 26	<p>Aplicação de uma única estratégia.</p> <p><u>Estratégia 10:</u> Implantar novo trecho de adutora, em FoFo DN 600 e aproximadamente 9 metros de extensão, localizado na esquina entre rua José Natal Cugik e a BR-101, interligando A4 e A6. Ver ponto indicado como “E10” no mapa da Figura 26</p>	Estratégia eficaz, pois todos os setores na área de influência da ETA Itajaí Mirim resultaram em pressão maior ou igual a pressão mínima requerida nos pontos de abastecimento (Tabela 9) ao longo de todo o período simulado (APÊNDICE HH)
			Situação 2: Rompimento de trecho entre a rua José Natal Cugik e a avenida Gov. Adolfo Konder. Ver ponto indicado	<p>Aplicação de duas estratégias concomitantemente. Devido a localização do rompimento considerado nessa situação, não é possível utilizar apenas uma estratégia de intervenção.</p> <p><u>Estratégia 10:</u> implantar novo trecho de adutora, em FoFo DN 600 e aproximadamente 9 metros de extensão, localizado na esquina entre rua José Natal Cugik e a BR-101, interligando A4 e A6. Ver ponto indicado como “E10” no mapa da Figura 26</p>	Análogo aos resultados da simulação de situação emergencial 1 de A6-T1, considerando aplicação da estratégia 10 (APÊNDICE II)

Unidade	Região a jusante	Resultados da simulação <u>sem</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora	Cenários	Intervenção considerada	Resultados da simulação <u>com</u> intervenções para minimizar os impactos decorrentes rompimento de adutora
			como “S2” no mapa da Figura 26	<u>Estratégia 11</u> : implantar novo trecho de adutora, em FoFo DN 400 e aproximadamente 27 metros de extensão, localizado na esquina entre avenida Gov. Adolfo Konder e avenida Ministro Luiz Gallotti, interligando A4 e A6. Ver ponto indicado como “E11” no mapa da Figura 26	
			Situação 3: Rompimento de trecho entre a avenida Gov. Adolfo Konder e a entrada do setor Cidade Nova. Ver ponto indicado como “S3” no mapa da Figura 26	<p>Aplicação de duas estratégias concomitantemente: uma física (antecipação de trecho a ser implantado) e outra de ajustes de operação. O ajuste de operação é necessário visto que o subsistema de Itajaí Mirim é complexo, exigindo alterações nos controles de operação para que não haja desabastecimento da população.</p> <p><u>Estratégia 12</u>: Implantar novo trecho de adutora, em FoFo DN 500 e aproximadamente 11 metros de extensão, localizado na esquina entre rua Brusque e a rua Modesto Fernandes Vieira, interligando A4 e A7. Ver ponto indicado como “E12” no mapa da Figura 26</p> <p><u>Associar a ajustes de controle</u>: entre 00h e 08h setores Itaipava e Cidade Nova são abastecidos; entre 08h e 16h reservatório Brava; entre 16h e 24h reservatório Morro da Cruz; reservatório Cabeçudas operando entre 10% e 30% da sua capacidade.</p>	Com essa intervenção a ERAT Itajaí Mirim passa a recalcar água para a ERAT Cabeçudas, ERAT Santa Clara, setor Cidade Nova e setor Itaipava, não sendo utilizados reservatório e ERAT Arapongas. Estratégia ineficaz, uma vez que, mesmo recalçando água somente para a ERAT Santa Clara (que recalca água para o reservatório Brava) e para a ERAT Cabeçudas (que recalca água para o reservatório Cabeçudas, em vazão baixa), a ERAT Itajaí Mirim não possui capacidade para bombear a vazão necessária à altura manométrica necessária para a ERAT Santa Clara, resultando no esvaziamento do reservatório Brava e no desabastecimento completo do setor Brava e do ponto de venda para Balneário Camboriú (Figura 27)

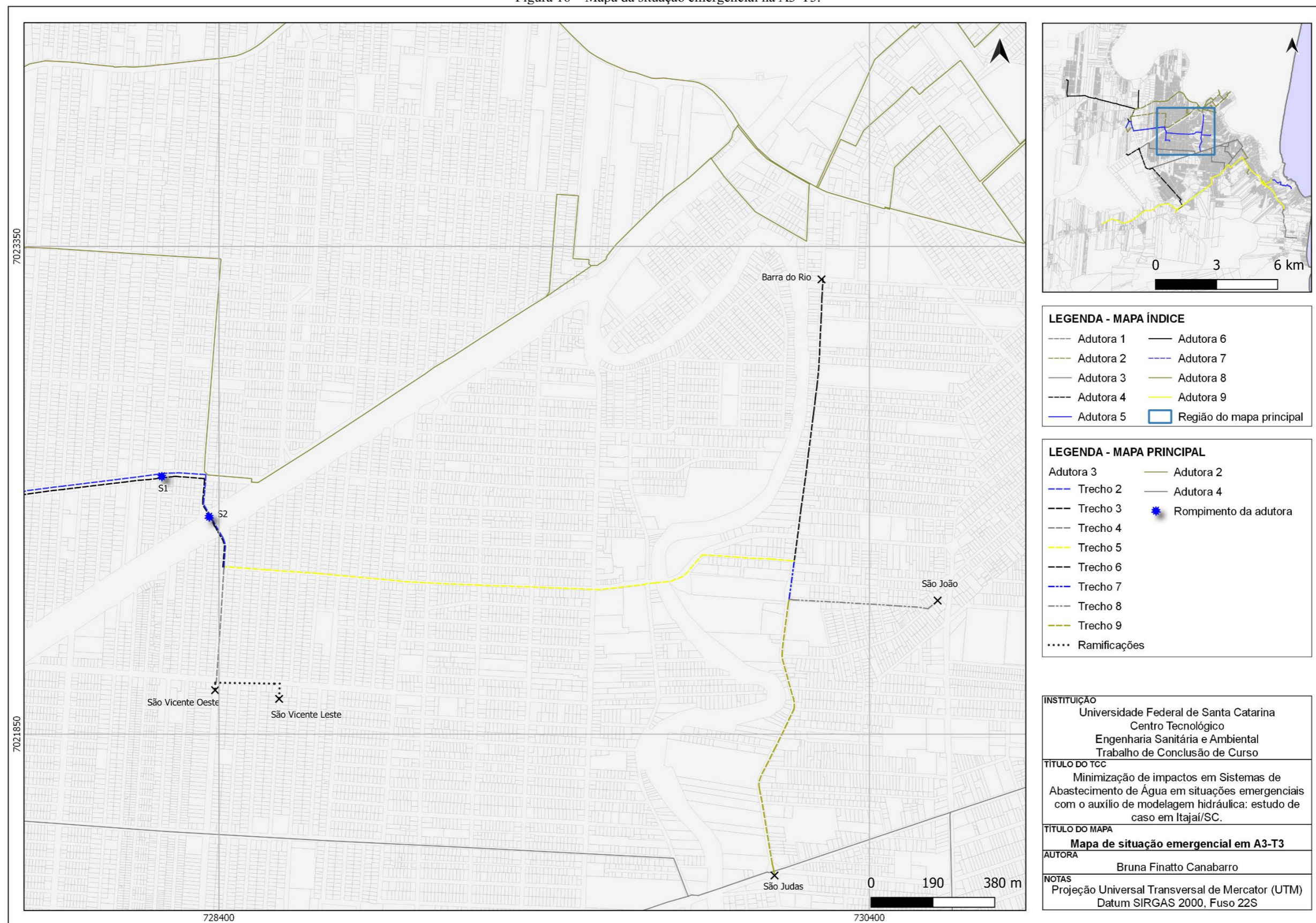
Fonte: Autoria própria (2021)

Com base na Figura 15 e no Quadro 4 é possível observar que três estratégias não foram eficazes nas situações avaliadas: estratégia 3 aplicada na situação emergencial 1 de rompimento em A2-T2, estratégia 3 aplicada na situação emergencial 1 de rompimento em A2-T3 e estratégia 12 aplicada na situação emergencial 3 de rompimento em A6-T1. Entretanto, tanto no rompimento em A2-T2 quanto no rompimento em A2-T3 a utilização de duas estratégias concomitantemente (E3 e E4) são suficientes para minimizar os impactos causados pelo rompimento dos trechos. Dessa forma, das 15 situações emergenciais possíveis, somente em uma não foram identificadas estratégias eficazes para minimizar os impactos a níveis aceitáveis. Observa-se, ainda, que o rompimento do trecho A3-T3 não causa o desabastecimento dos setores a jusante, não sendo propostas estratégias de minimização dos impactos.

A seguir são apresentados e discutidos os resultados da simulação do rompimento de A3-T3 (em ambas as situações emergenciais apresentadas), de A3-T2 (situação emergencial 01, com estratégias de intervenção 1 e 2), de A3-T4 (situação emergencial e estratégia de intervenção únicas) e de A6-T1 (situação emergencial 03). Esses resultados serão detalhados pois englobam todas as situações possíveis: necessidade e não necessidade de intervenção; intervenção eficaz e intervenção ineficaz; e aplicação de todas as estratégias de intervenção elencadas. Os demais resultados são apresentados do APÊNDICE J ao APÊNDICE II.

A adutora 03 (Apêndice E) faz parte da área de influência da ETA São Roque e é responsável por transportar a água dos reservatórios São Roque até setores São Vicente Oeste, São Vicente Leste, Barra do Rio, São João e São Judas. O rompimento de A3-T3, tanto na rua Mário Uriarte quanto na avenida Campos Novos, interrompe o fluxo d'água nesse trecho de adutora. Entretanto, observa-se que o trecho A3-T2, em DN 600, comumente opera em paralelo a esse trecho rompido (Figura 16). Dessa forma, o rompimento desse trecho não significa, necessariamente, desabastecimento dos pontos a jusante.

Figura 16 – Mapa da situação emergencial na A3-T3.



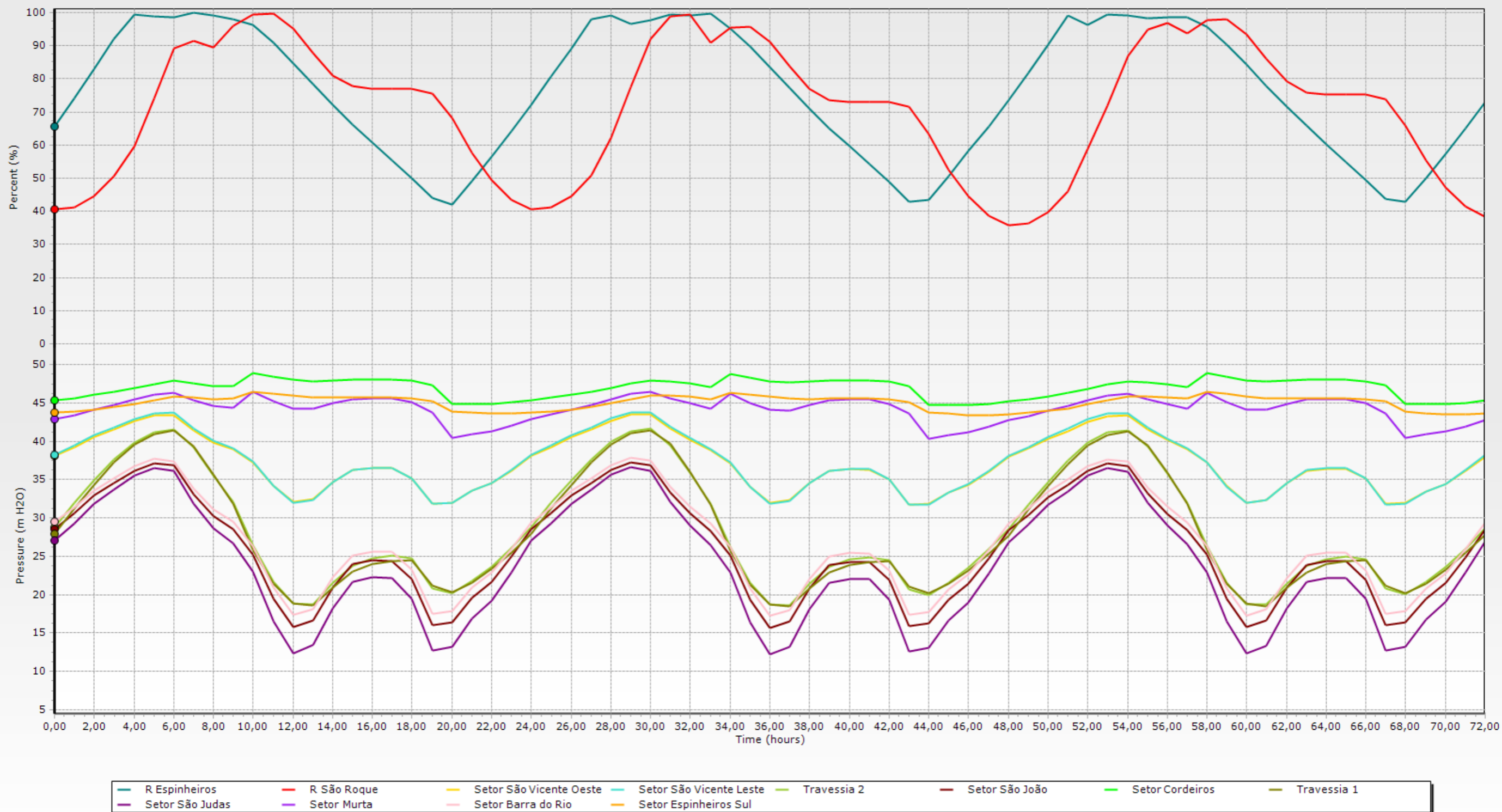
Fonte: Autoria própria (2021)

Os resultados da simulação considerando a interrupção de A3 – T3 são apresentados a seguir, na Figura 17. Esses resultados demonstraram a redução do abastecimento somente do setor São Judas por cerca de 6h/dia. Essa redução é observada nos momentos em que a pressão na entrada desse setor é inferior a necessária para que haja o abastecimento, em média, de todas as economias desse setor. Conforme apresentado na Tabela 9, a pressão mínima na entrada desse setor é igual a 17 mca. O primeiro momento em que se observa pressão inferior a 17 mca na entrada do setor São Judas é cerca de 11 horas após a ruptura de A3-T3.

Nesse sentido, o setor São Judas recebe água a pressão superior a 17 mca por 18 h/dia. Nesse período a vazão recebida é de 7.166 m³/d, equivalente a aproximadamente 166 L/hab./dia, enquanto a demanda mínima considerando acesso intermediário e as perdas no sistema igual a 60 L/hab./dia (equivalente a 2.583 m³/dia). Ou seja, apesar de haver um aumento do gradiente de perda de carga no trecho em paralelo ao afetado, ainda há carga suficiente para garantir, no mínimo, o abastecimento intermediário das regiões a jusante. Os demais setores e reservatórios sob a área de influência de São Roque não foram impactados significativamente pela falha em A3 – T3.

Dessa forma, não há necessidade de propor alternativa de abastecimento quando ocorre o rompimento de A3-T3, tanto na rua Mário Uriarte quanto na avenida Campos Novos, pois apesar de comporem cenários de prioridade alta conforme a Tabela 11, não são trechos vulneráveis – o risco não afeta o sistema a ponto de interromper o abastecimento por tempo suficiente para não possibilitar acesso intermediário à água pela população. Ressalta-se que, apesar de garantir o acesso intermediário da população, não se pode afirmar que a população desse setor não é afetada, uma vez que o consumo normal dessas pessoas não é garantido.

Figura 17 – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T3.



Fonte: Autoria própria (2021)

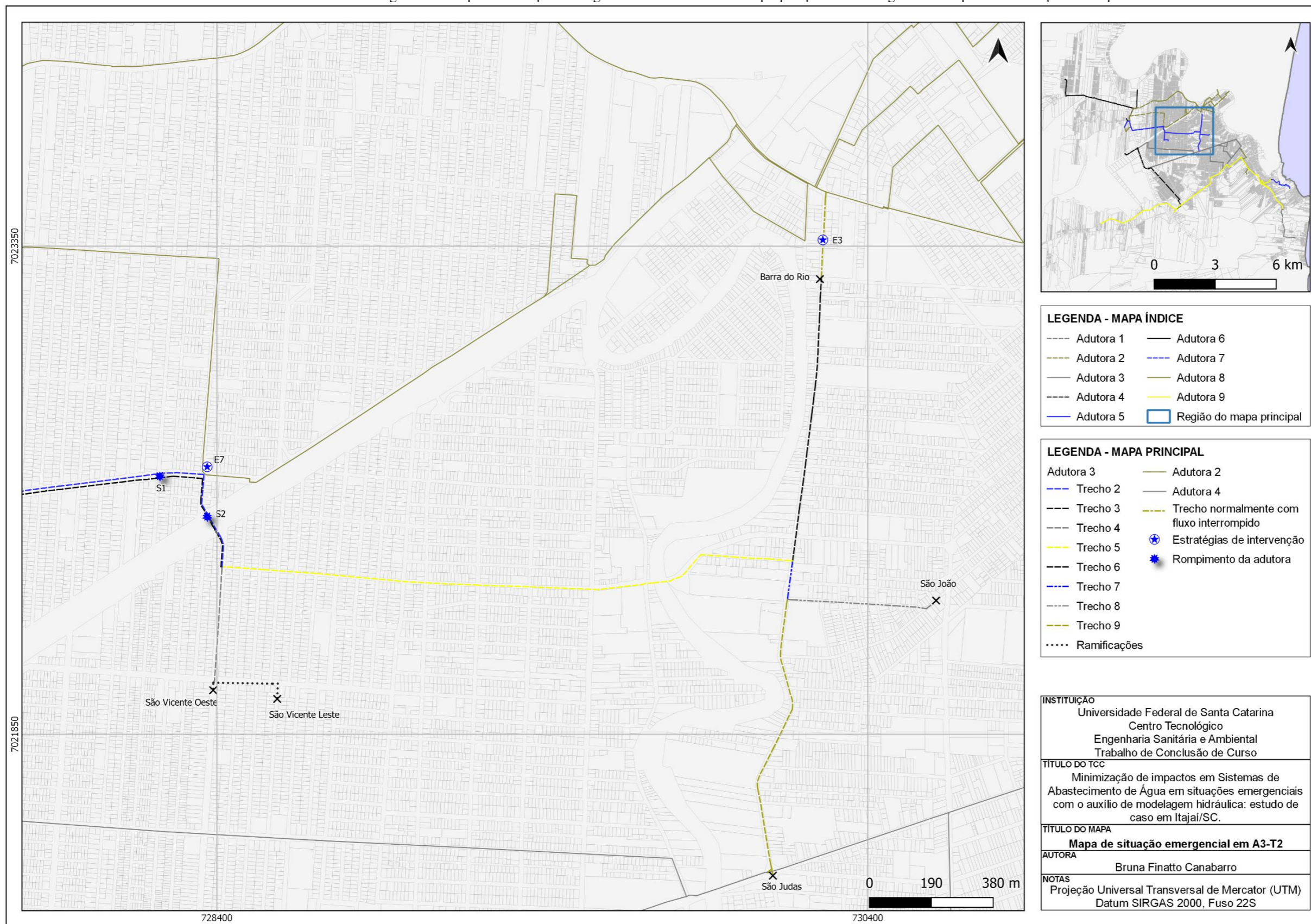
Em paralelo a A3-T3, recém apresentado, opera o trecho A3-T2, em DN 400, e que transporta água para os setores São Vicente Oeste, São Vicente Leste, Barra do Rio, São João e São Judas. São observadas duas situações emergenciais possíveis nesses dois trechos de adutora: situação emergencial 01, onde o rompimento ocorre na rua Mário Uriarte, e situação emergencial 02, onde o rompimento ocorre na avenida Campos Novos (Figura 18). Na sequência será apresentada a situação emergencial 01, sendo que a análise da situação emergencial 02 é similar.

Durante essa emergência observa-se abastecimento intermitente dos setores São João, São Judas e Barra do Rio (Figura 19). Já os setores São Vicente Oeste e São Vicente Leste em alguns momentos apresentam pressão inferior a mínima para que haja fornecimento da vazão de acesso intermediária, iguais a 17 e 16 mca, respectivamente. Tais impactos são sentidos após cerca de 09 horas após o rompimento de A3-T3. Portanto, foram propostas 03 estratégias de intervenção para esse rompimento:

- Estratégia 7: interligar A2 e A3 no ponto indicado com “E7” na Figura 18 a seguir. Na simulação essa interligação foi feita por meio da implantação de novo trecho de adutora, em FoFo DN 600 e aproximadamente 8 metros de extensão. Ainda, interligar A3-T2 e A3-T3, no mesmo ponto indicado com “E7” na Figura 18 a seguir. Na simulação essa interligação foi feita por meio da implantação de novo trecho de adutora, em FoFo DN 400 e aproximadamente 13 metros de extensão.
- Estratégia 3: abrir registro próximo à entrada do setor Barra do Rio, onde as adutoras A2-A3 estão conectadas (porém normalmente com registro fechado, isoladas entre si).
- Estratégia 8: aplicar ambas as estratégias acima elencadas, ao mesmo tempo.

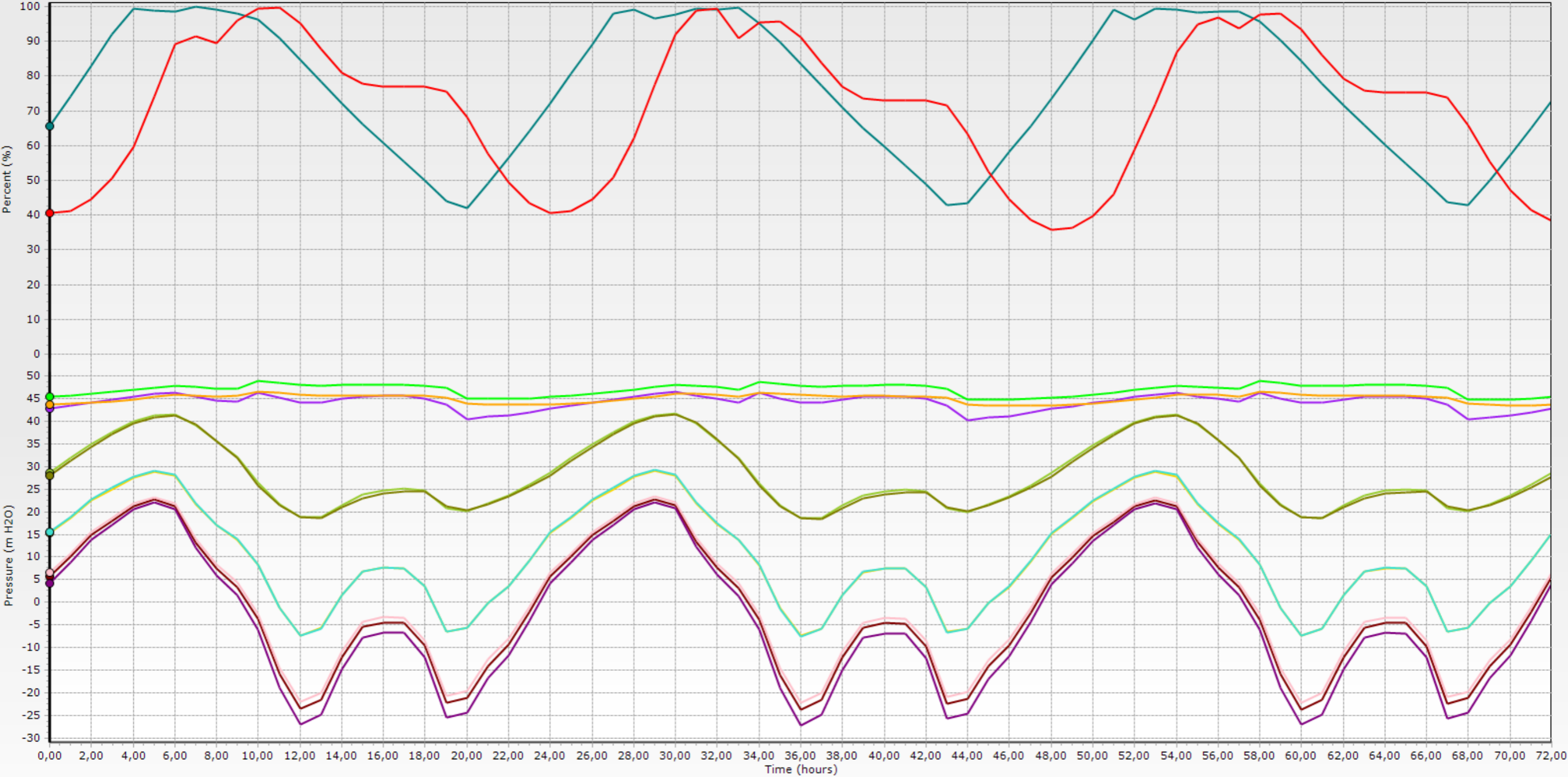
O mapa que apresenta ambas as situações emergenciais possíveis na A3-T2, bem como indica a proposição das três estratégias para minimização dos impactos decorrentes dessas situações, é apresentado na Figura 18 a seguir.

Figura 18 – Mapa das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T2 e proposição das estratégias 03 e 07 para minimização dos impactos.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 19 – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T2.



Fonte: Autoria própria (2021)

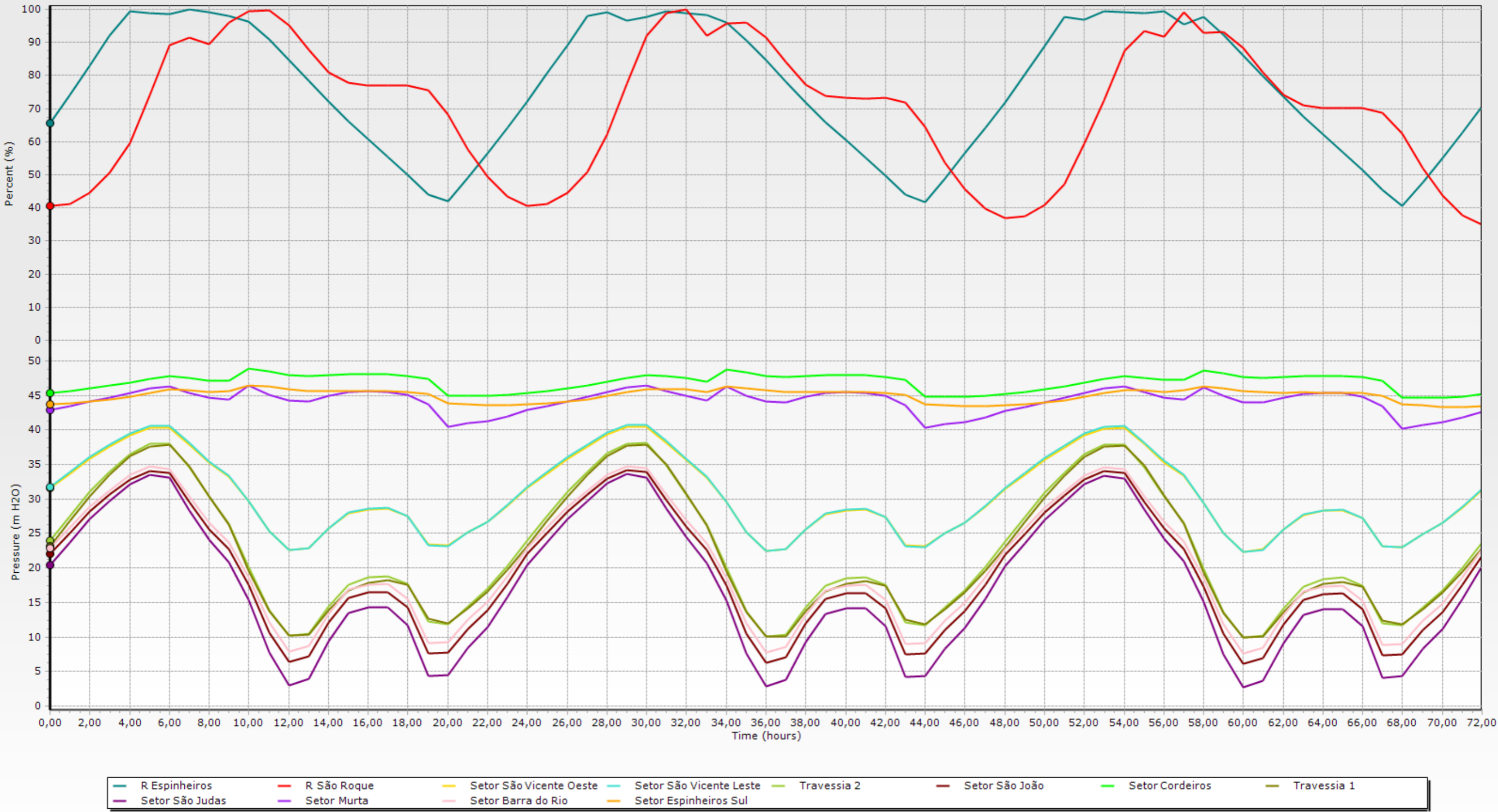
A aplicação da estratégia E7, onde são interligadas as adutoras A2 e A3, impacta na região abastecida por A2 (travessias para Navegantes), enquanto os demais setores do SAA não são impactados. Dessa forma, o consumo dos setores São Vicente Oeste, São Vicente Leste, Barra do Rio, São João e São Judas fazem influência nos pontos de venda para Navegantes (travessias 1 e 2), e vice-versa, durante essa situação emergencial considerando tal intervenção.

Apesar da influência entre as regiões que não se comunicam em operação normal, as adutoras A2 e A3 operando em conjunto são capazes de garantir o abastecimento de todas essas regiões ao longo do período simulado – em termos de acesso intermediário de água pela população (Figura 20). Os setores São Judas, São João e Barra do Rio apresentam pressão baixa (inferior a mínima requerida nos pontos de abastecimento conforme a Tabela 9, iguais a 17 mca, 13 mca e 15 mca, respectivamente) em diversos momentos, sendo o setor São Judas o que permanece por maior com abastecimento a pressão inferior a mínima requerida (entre as 09 horas da manhã e as 23 horas da noite).

Entretanto, nos horários em que a pressão mínima é atingida na entrada desses setores, somam-se volumes de água suficientes para garantir, em média, o acesso intermediário a todos os pontos de consumo ao longo do dia: São Judas recebe 3.543 m³/dia (aproximadamente igual a 82 L/hab./dia), valor cerca de 1,4 vezes maior que o acesso intermediário igual a 60 L/hab./dia considerando perdas; São João recebe 2.644 m³/dia (aproximadamente igual a 158 L/hab./dia), valor cerca de 2,6 vezes maior que o acesso intermediário igual a 60 L/hab./dia considerando perdas; e Barra do Rio recebe 2.142 m³/dia (aproximadamente igual a 176 L/hab./dia), valor cerca de 2,9 vezes maior que o acesso intermediário igual a 60 L/hab./dia. Ressalta-se que, apesar de garantir o acesso intermediário da população, não se pode afirmar que a população desses setores não é afetada, uma vez que o consumo normal dessas pessoas não é garantido.

Os demais pontos impactados por essa emergência (setores São Vicente Oeste e São Vicente Leste) e pela estratégia adotada (travessias) tem seu abastecimento contínuo ao longo de todo o período simulado.

Figura 20 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 07 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T2.



Fonte: Autoria própria (2021)

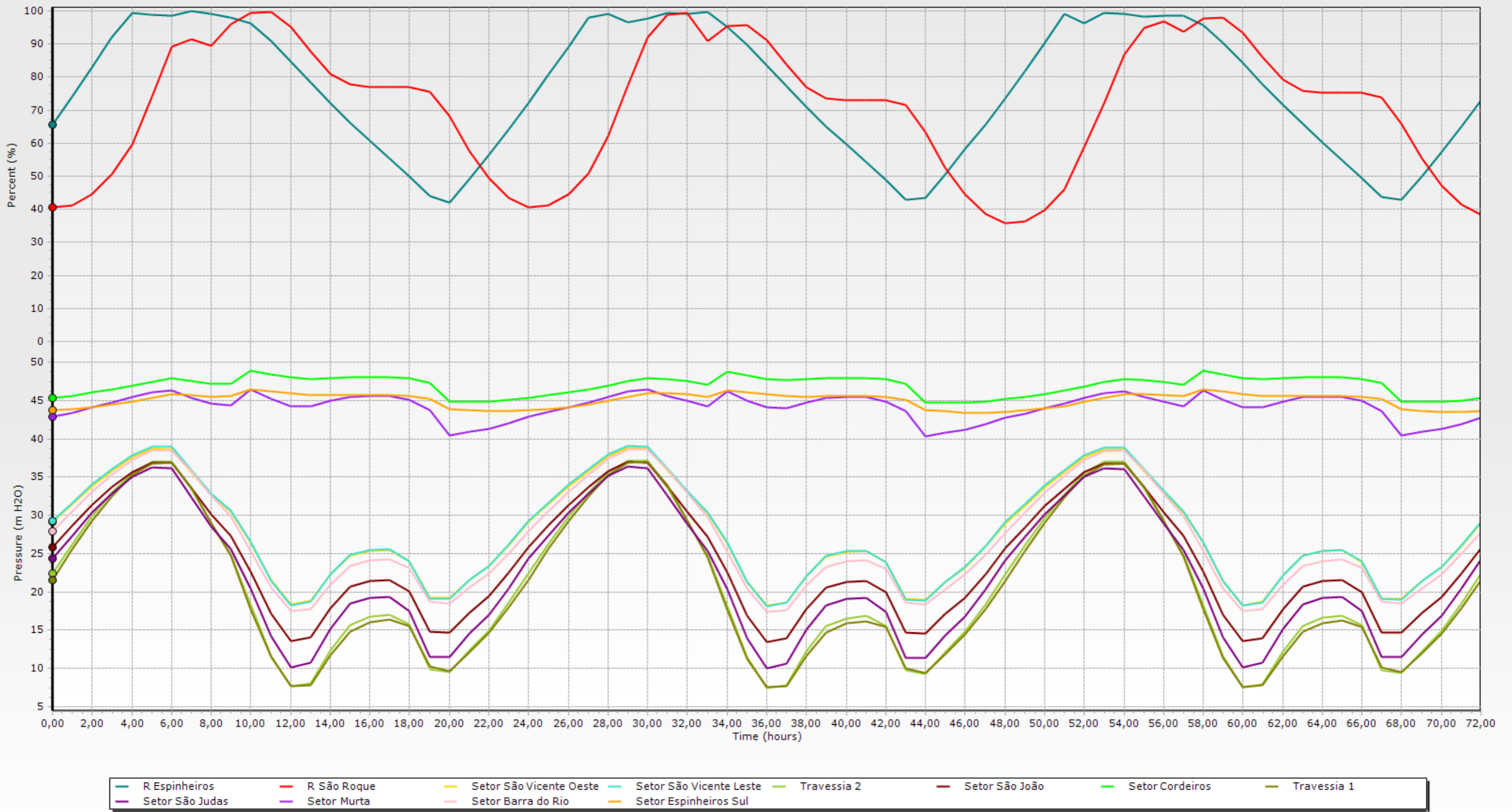
A aplicação da estratégia E3, onde as adutoras A2 e A3 são interligadas por meio da abertura de registro existente próximo à entrada do setor Barra do Rio, apresenta resultados similares ao observado quando aplicada a estratégia E7 (Figura 21). As regiões impactadas são as mesmas, porém de maneiras distintas devido ao local de interligação.

Observa-se uma diminuição como um todo da pressão nas travessias e na entrada dos setores São Vicente Leste e São Vicente Oeste: o novo ponto de interligação entre A2 e A3 está localizado mais próximo as travessias (que inicialmente não é impactada pelo rompimento de A3-T2, e sim pela estratégia adotada), e mais longe de São Vicente Leste e Oeste (para a água agora chegar até eles precisa percorrer um caminho maior, associado a uma maior perda de carga).

Entretanto, apesar da diminuição da pressão nesses pontos, ainda se observa pressão maior ou igual a pressão mínima indicada na Tabela 9, iguais a 5 mca nas travessias, 16 mca na entrada do setor São Vicente Leste e 17 mca na entrada do setor São Vicente Oeste, ao longo de todo período simulado. O único ponto onde é observada pressão inferior a mínima requerida é o setor São Judas, onde ocorrem pressões inferiores a 17 mca. Entretanto, nos horários em que a pressão mínima é atingida na entrada desse setor, somam-se volumes de água suficientes para garantir, em média, o acesso intermediário a todos os pontos de consumo ao longo do dia: São Judas recebe 6.226 m³/dia (aproximadamente igual a 145 L/hab./dia), valor cerca de 2,4 vezes maior que a demanda de acesso intermediária igual a 60 L/hab./dia considerando perdas.

Comparativamente, é evidente a diferença de pressão entre o cenário sem intervenção e os dois cenários com as intervenções propostas. No cenário sem intervenção a pressão na entrada dos setores São João, São Judas, Barra do Rio, São Vicente Oeste e São Vicente Leste oscilam entre valores e negativos. Nos três primeiros setores a pressão possui valor positivo por somente cerca de 9h30min por dia, enquanto os dois últimos setores por cerca de 18h30 por dia. Em ambos os cenários com intervenções a pressão é sempre positiva. No cenário sem intervenção a pressão mínima observada na entrada de São Judas é de aproximadamente -25 mca e a máxima igual a aproximadamente 22 mca. No primeiro cenário com intervenção (Figura 20) a pressão nesse mesmo setor varia entre 4 e 32 mca, aproximadamente, enquanto no cenário com intervenção (Figura 21) a pressão varia entre 10 e 36 mca, aproximadamente. Já os setores São Vicente Leste e Oeste apresentam variação de pressão entre -7 e +29 mca, aproximadamente, no cenário sem intervenção; já no primeiro cenário com intervenção (Figura 20) esses setores apresentam variação de pressão entre 23 e 41 mca, aproximadamente, enquanto no segundo cenário entre 17 e 38 mca, aproximadamente.

Figura 21 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 03 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T2.



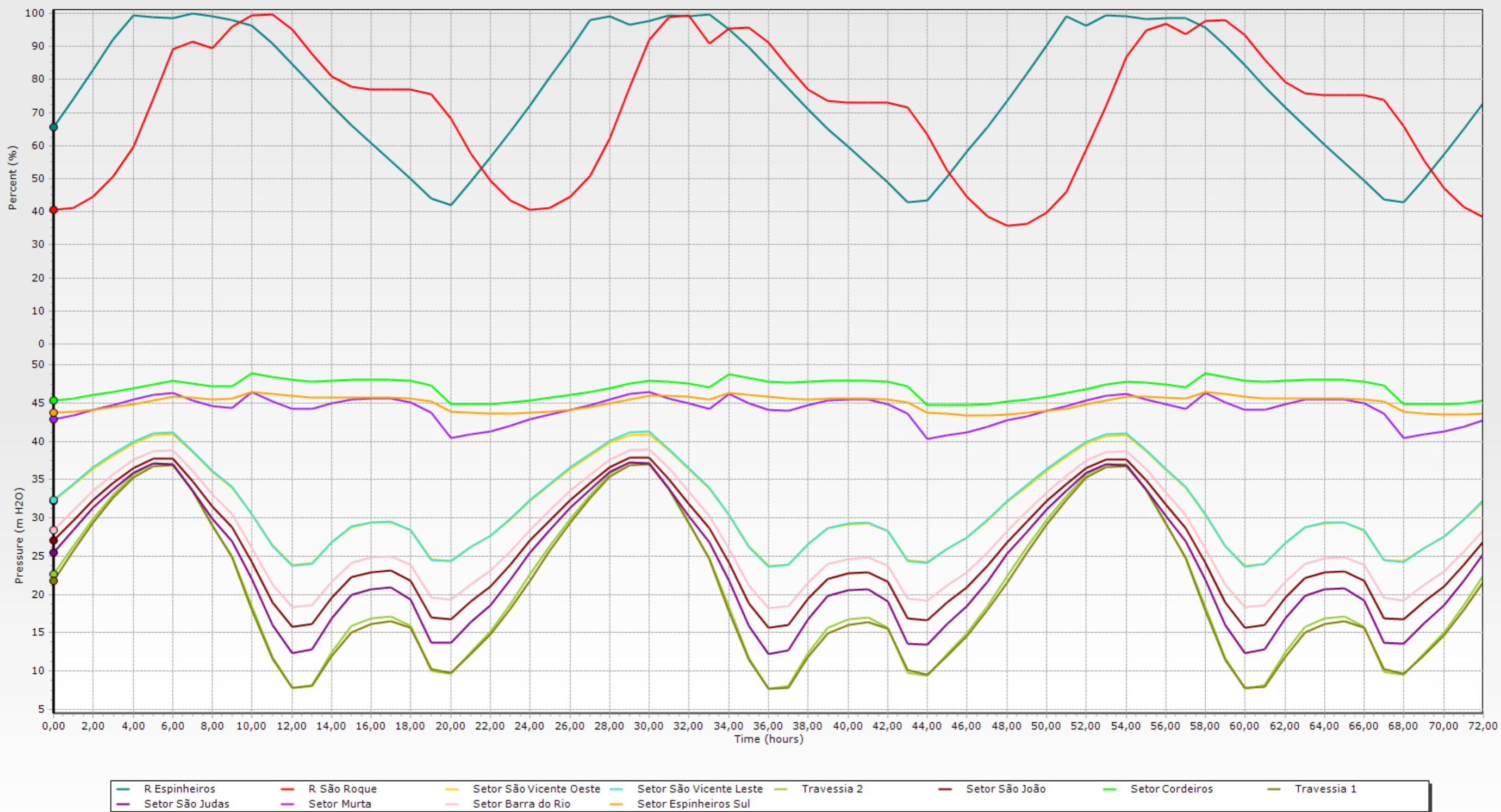
Fonte: Autoria própria (2021)

Assim, tanto a primeira quanto a segunda estratégia elencadas são individualmente eficazes para minimizar os impactos decorrentes de falha no trecho A3-T2. Logo, a estratégia 08 (aplicação das estratégias 07 e 03 concomitantemente) também é eficaz para minimizar tais impactos a níveis aceitáveis (Figura 22).

Por fim, observa-se que todas as três estratégias são válidas como forma de minimização dos impactos decorrentes da situação 01 de ruptura do trecho A3-T2. Dentre as três estratégias, a estratégia 03 é mais interessante de ser aplicada devido a dois fatores. O primeiro é em relação a pressão na entrada dos setores impactados (São João, São Judas, Barra do Rio, São Vicente Leste e São Vicente Oeste): a pressão apresenta valores maiores de pressão (sempre acima de 10 mca), enquanto com a estratégia 07 a pressão fica sempre acima de 3 mca apenas. Apesar de a pressão nas travessias diminuir cerca de 3 mca, ela ainda resulta sempre em valores acima de 7 mca (a pressão mínima requerida é de 5 mca, conforme a Tabela 9. O segundo fator é que a estratégia 03 compreende apenas manobra em registro existente no sistema, enquanto a estratégia 07 compreende a instalação de dois novos trechos de tubulações para interligar as adutoras 2 e 3. Comparativamente, a estratégia 08 apresenta resultados ligeiramente superiores a estratégia 03 (a pressão na entrada dos setores é cerca de 2 mca maior que quando aplicada a estratégia 03). Entretanto, devido a pouca diferença nos resultados e ao maior esforço de implementação da estratégia, a estratégia 03 é preferível à estratégia 08.

Dessa forma, a estratégia 03 é mais simples de ser implementada que a estratégia 07 (e obviamente mais simples que a estratégia 08 também), ao mesmo tempo em que é mais eficaz que a estratégia 07. Assim, dentre as alternativas elencadas para minimizar os impactos decorrentes da situação 01 de ruptura do trecho A3-T2 a estratégia 03 apresenta a melhor solução.

Figura 22 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 08 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T2.



Fonte: Autoria própria (2021)

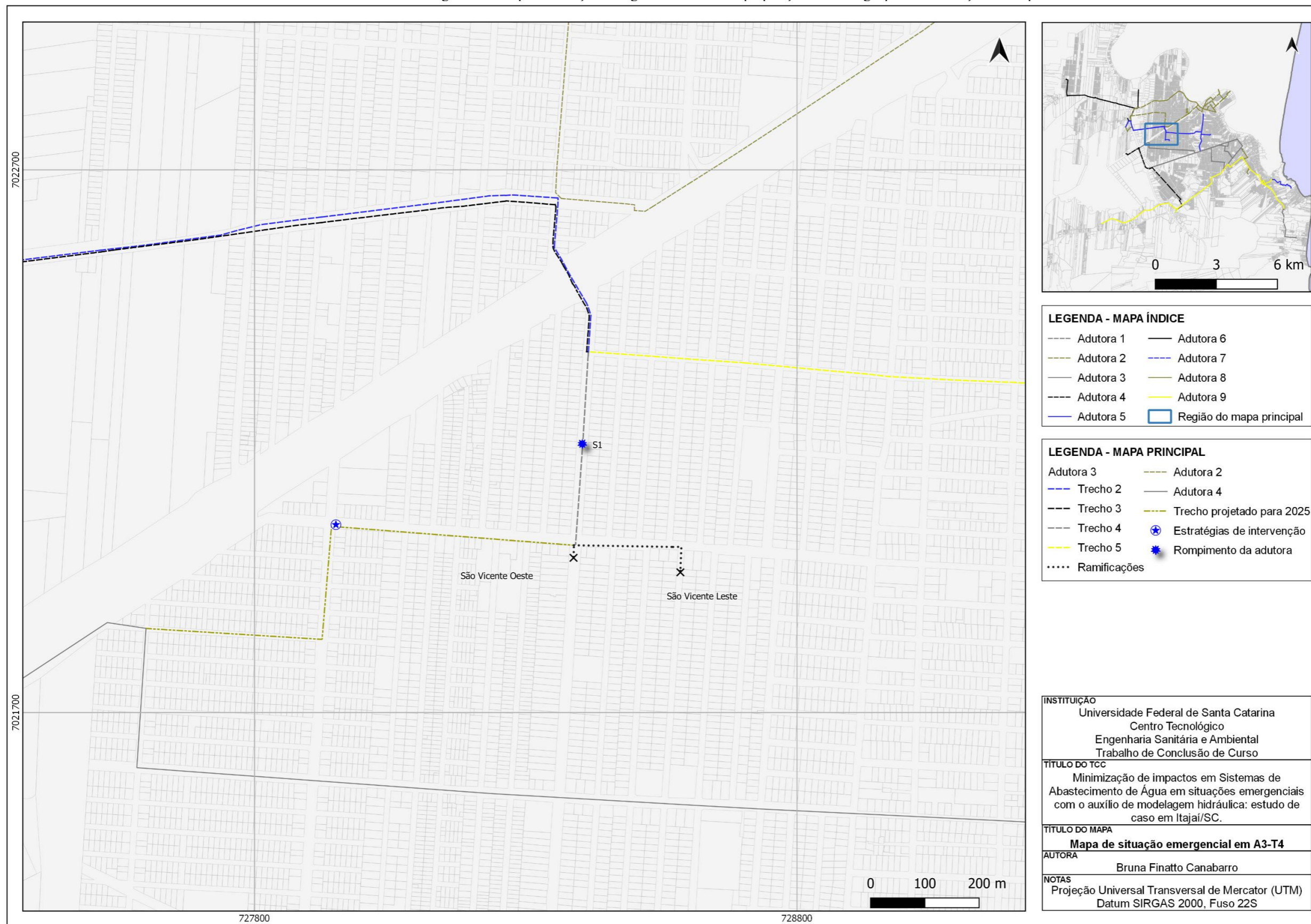
Já em relação ao rompimento de A3-T4, onde os setores a jusante são São Vicente Leste e São Vicente Oeste, não foi possível realizar a simulação emergencial sem a proposição de estratégias, visto que o rompimento desse trecho resulta na interrupção total do abastecimento de ambos os setores a jusante.

Assim, como forma de minimizar os impactos decorrente dessa emergência, foi analisada a antecipação da implantação de trecho de adutora projetada para 2030, em FoFo DN 450 e extensão aproximada de 982 metros (Figura 23). Essa alteração é a estratégia 09, e implica na mudança na área de influência das ETAs sob operação normal, visto que os setores São Vicente Leste e São Vicente Oeste são, normalmente, abastecidos pela ETA São Roque e, com essa intervenção, passam a ser abastecidos pela ETA Itajaí Mirim. Para tanto, a ETA Itajaí Mirim deve ter sua produção aumentada para suprir essa demanda extra (dentro de sua capacidade total).

Dessa forma, com a inclusão dos setores São Vicente Leste e São Vicente Oeste na área de influência da ETA Itajaí Mirim, a ERAT Itajaí Mirim (anexa a ETA e reservatório Itajaí Mirim, todas em cota igual a 5 metros) deve recalcar água diretamente para três setores (Cidade Nova, São Vicente Leste e São Vicente Oeste), um reservatório (Arapongas) e duas ERATs (Santa Clara e Cabeçadas). Observa-se, assim, que além da capacidade das adutoras para transportarem água para mais dois setores (São Vicente Leste e Oeste), um componente crítico para que a estratégia seja eficaz ou não é a ERAT Itajaí Mirim. Nesse sentido, observou-se que os conjuntos motobombas dessa ERAT não são capazes de recalcar a vazão de água necessária à altura manométrica requerida para abastecer todos os setores, reservatório e ERATs a jusante. Essa observação foi realizada com base nos resultados a serem apresentados na sequência, sem considerar o ajuste nos controles de operação. Dessa forma, junto a implantação da estratégia 09 foi realizado o ajuste de controles de operação:

- Abastecimento dos setores SVO e SVL somente entre 00h e 08h, por meio de abertura e fechamento de válvulas de manobra a montante dos mesmos;
- Quando o reservatório Arapongas estiver com menos de 20% da sua capacidade a entrada do reservatório Morro da Cruz deve ser fechada, sendo aberta somente quando o reservatório Arapongas chegar a 40% da sua capacidade;
- Os reservatórios Brava e Cabeçadas devem operar somente entre 20% e 40% de suas capacidades, de maneira a garantir o abastecimento de todos os reservatórios do SAA.

Figura 23 – Mapa da situação emergencial na A3-T4 e proposição de estratégia para minimização dos impactos.



Fonte: Autoria própria (2021)

Assim, com a estratégia 09 aplicada e sem considerar os ajustes dos controles (Figura 24), observa-se o esvaziamento dos reservatórios Arapongas, Brava e Cabeçadas, além de erro na modelagem as 68 horas da simulação hidráulica. Dessa forma, foram realizados testes com os controles de operação com o objetivo de abastecer todos os setores, reservatórios e ERATs de maneira ininterrupta. Entretanto, devido ao aumento de demanda e, conseqüentemente, a vazão de recalque necessária, a ERAT Itajaí Mirim não é capaz de recalcar a vazão requerida a altura manométrica necessária.

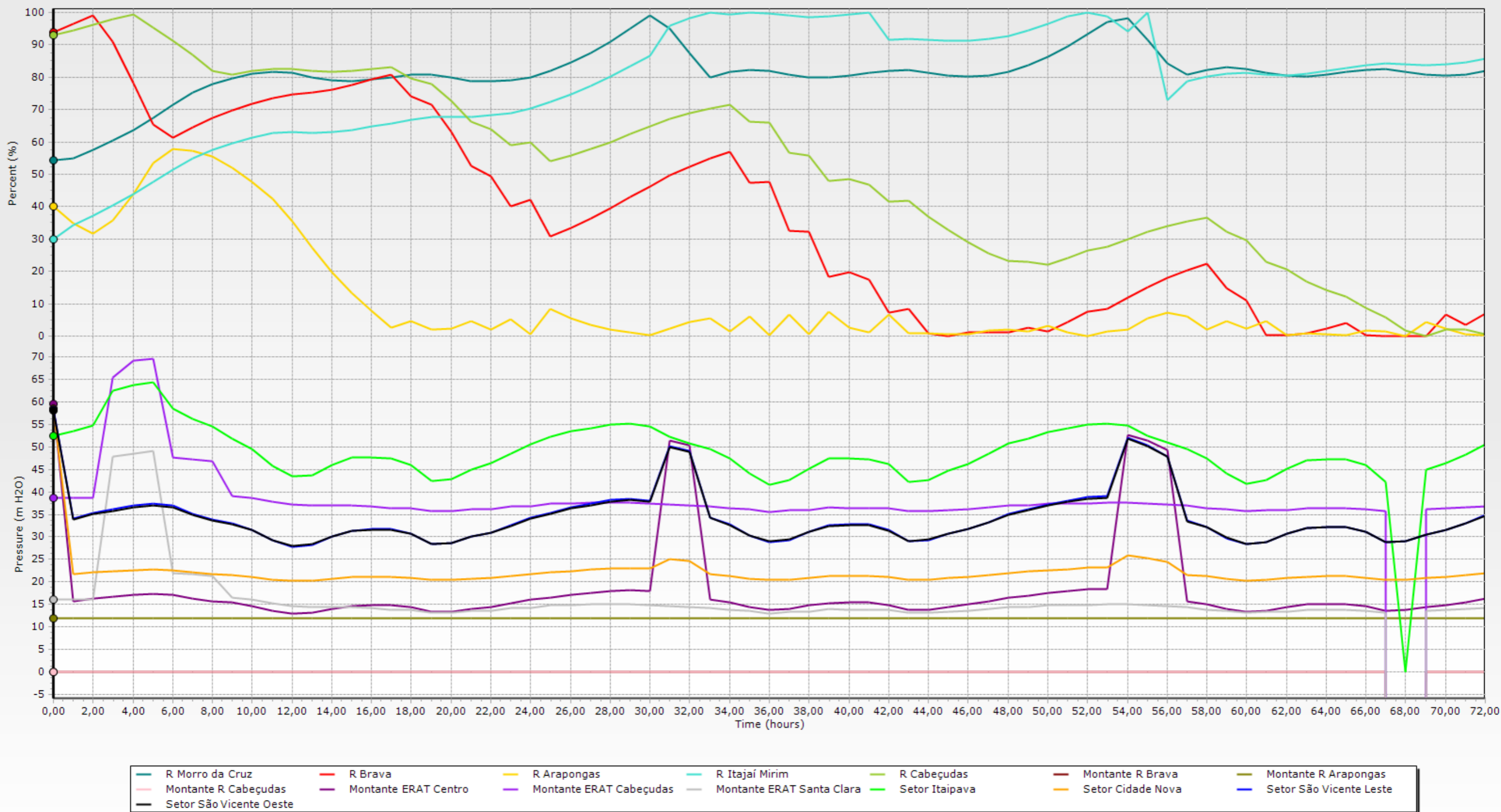
Dessa forma, com a estratégia 09 aplicada, apesar dos setores SVO e SVL não serem abastecidos ao longo de todo o dia, o abastecimento dos mesmos entre 00h e 08h garante acesso intermediário a pressão adequada: SVO e SVL demandam, juntos, 3.559 m³/dia de água considerando acesso intermediário, sendo fornecidos 3.768 m³/dia de água (aproximadamente 64 L/hab./dia) nessas condições a pressão superior ao mínimo apresentado na Tabela 9 (17 e 16 mca, respectivamente), ou seja, cerca de 1,1 vezes o valor de acesso intermediário.

Já o reservatório Morro da Cruz, que abastece o setor Fazenda, apresenta esvaziamento no último dia de simulação, por cerca de 08 horas. Apesar dessa intermitência no abastecimento desse setor, o mesmo recebe 7.921 m³ de água (aproximadamente 206 L/hab./dia) nesse último dia de simulação, valor cerca de 3,4 vezes superior ao de acesso intermediário. Os demais setores e reservatórios não possuem impactos a níveis significantes, sendo abastecidos sem interrupções ao longo do período simulado.

Dessa forma, considerando a diferença nos resultados sem e com intervenção no SAA, a estratégia 09 associada a controles de operação foi considerada adequada para minimizar a vulnerabilidade dessa parte do sistema. Ressalta-se que, apesar de garantir o acesso intermediário da população, não se pode afirmar que a população desses setores não é afetada, uma vez que o consumo normal dessas pessoas não é garantido.

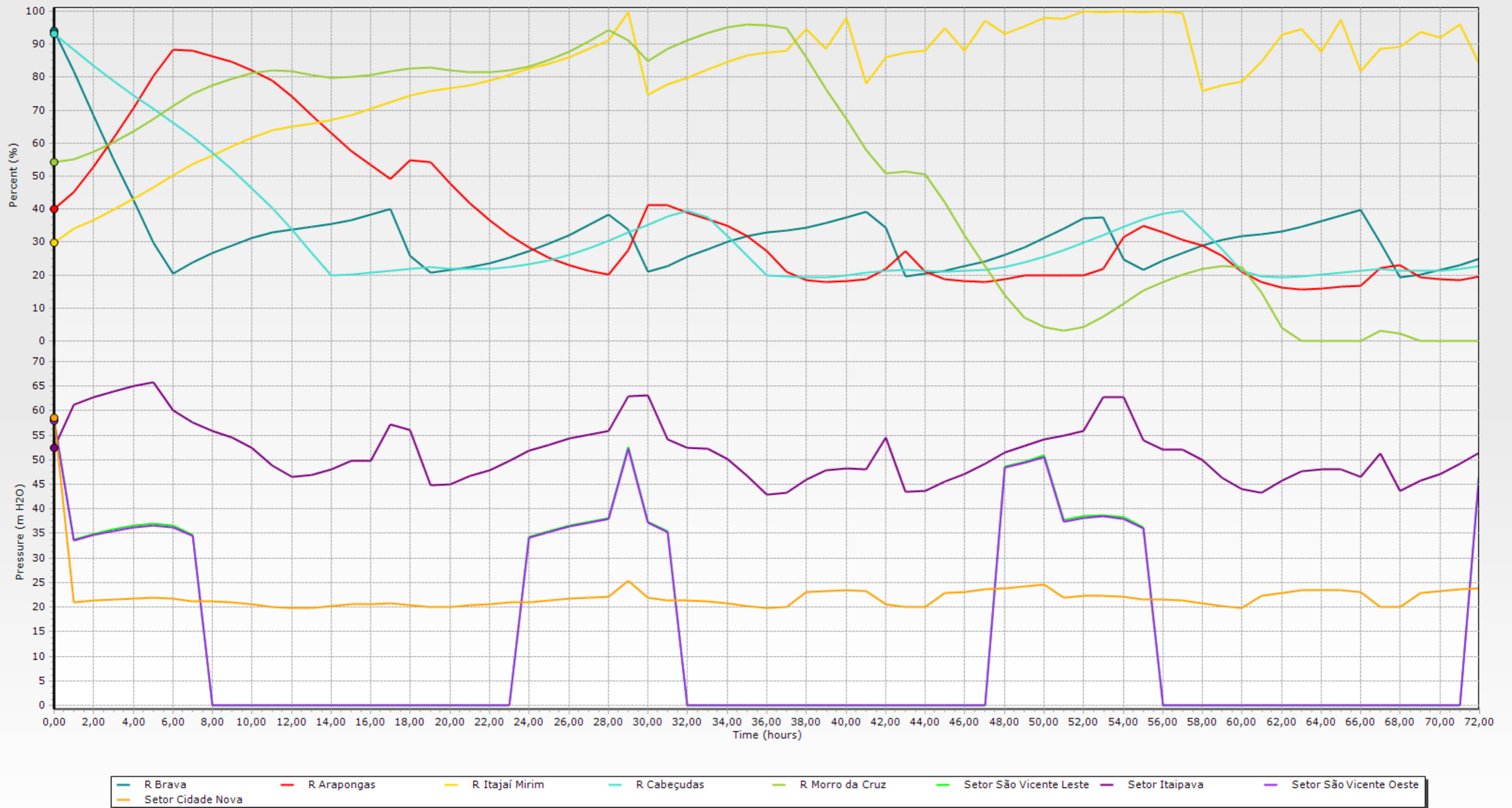
Na Figura 24 a seguir são apresentados os resultados da simulação sem ajuste de controles, onde o modelo apresenta erro ao final do segundo dia de simulação, devido ao esvaziamento de três dos cinco reservatórios. Já na Figura 25 são apresentados os resultados da simulação com ajuste de controles.

Figura 24 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 09 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T4 – sem ajustes de controle.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 25 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 09 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T4 – com ajustes de controle.



Fonte: Autoria própria (2021)

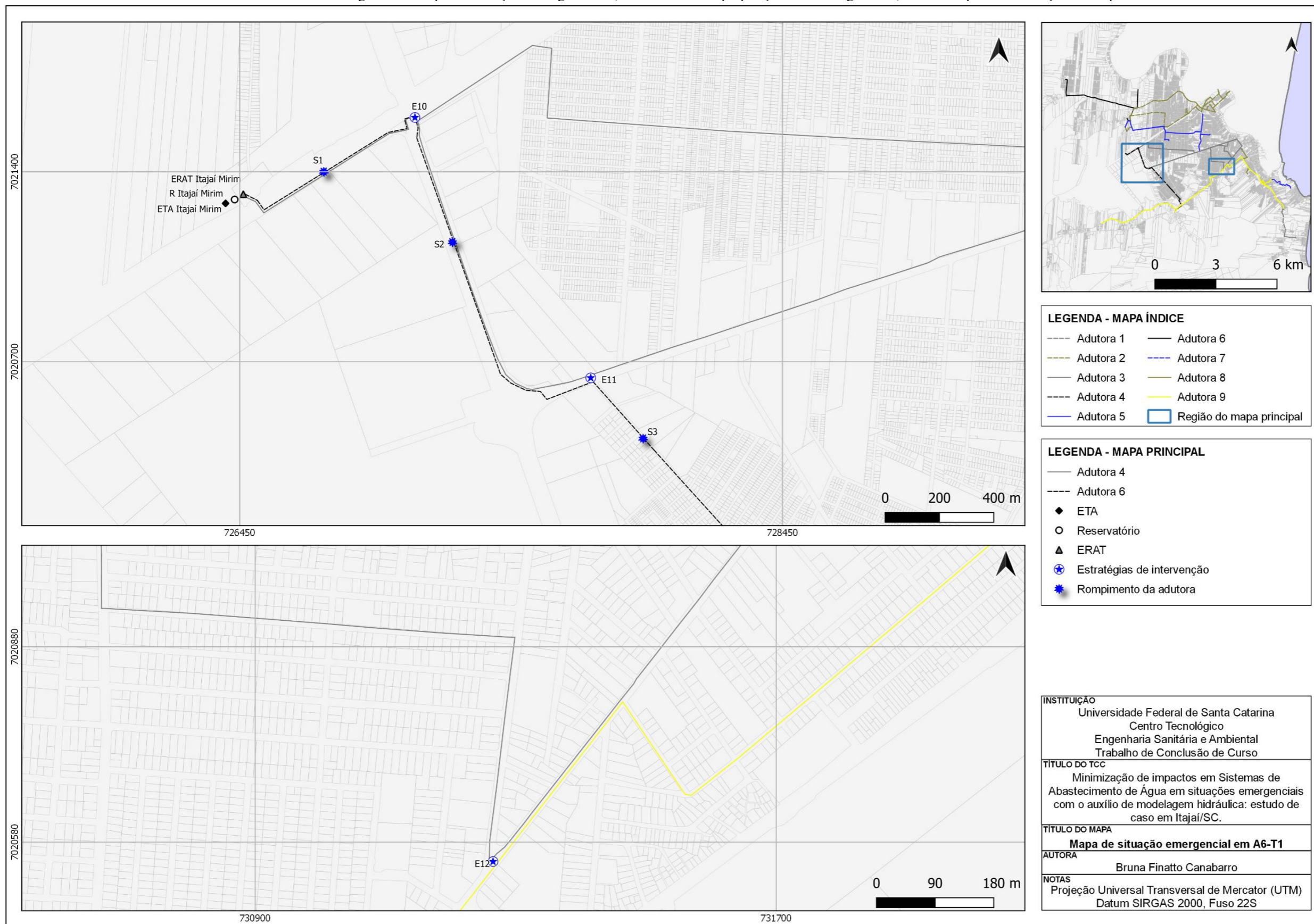
Assim como ocorrido no trecho A3-T4, a situação emergencial 03 de rompimento de A6-T1 (onde é analisado o rompimento de trecho entre a avenida Gov. Adolfo Konder e a entrada do setor Cidade Nova) não foi simulada sem considerar a proposição de estratégias. Não foi possível realizar essa simulação visto que o rompimento desse trecho também resulta na interrupção total do abastecimento dos setores e reservatórios a jusante.

Dessa forma, foi analisada a implantação de novo trecho de adutora como estratégia para minimizar os impactos gerados por essa emergência. Esse novo trecho tem como objetivo interligar A4 e A7, no ponto indicado por E12 (estratégia 12) na Figura 26 a seguir. Para tanto, na simulação foi considerado um novo trecho em FoFo DN 500, de aproximadamente 11 metros de extensão. Assim, a água que normalmente faz o trajeto complexo Itajaí Mirim → reservatório e ERAT Arapongas → setor Itaipava, ERAT Cabeçudas (e posteriormente setor Cabeçudas) e ERAT Santa Clara (e posteriormente setor Brava e Balneário Camboriú), agora faz o trajeto complexo Itajaí Mirim → ERAT Centro (e posteriormente reservatório Morro da Cruz e setor Fazenda), ERAT Cabeçudas (e posteriormente setor Cabeçudas), ERAT Santa Clara (e posteriormente setor Brava e Balneário Camboriú), setores Cidade Nova (entrada de água alternativa do setor) e Itaipava. Observa-se que, dessa forma, o reservatório e ERAT Arapongas não são utilizados.

Ainda, devido à complexidade do subsistema sob a área de influência da ETA Itajaí Mirim, foi necessário o ajuste de controles de operação. Os ajustes de controle aplicados foram:

- Abastecimento dos setores Cidade Nova e Itaipava somente entre 00h e 08h, por meio de abertura e fechamento de válvulas de manobra a montante dos mesmos;
- Abastecimento do reservatório Brava somente entre 08h e 16h e do reservatório Morro da Cruz entre 16h e 24h;
- Reservatório Cabeçudas deve operar somente entre 10% e 30% de sua capacidade.

Figura 26 – Mapa das situações emergenciais 1, 2 e 3 na A6-T1 e proposição das estratégias E10, E11 e E12 para minimização dos impactos.

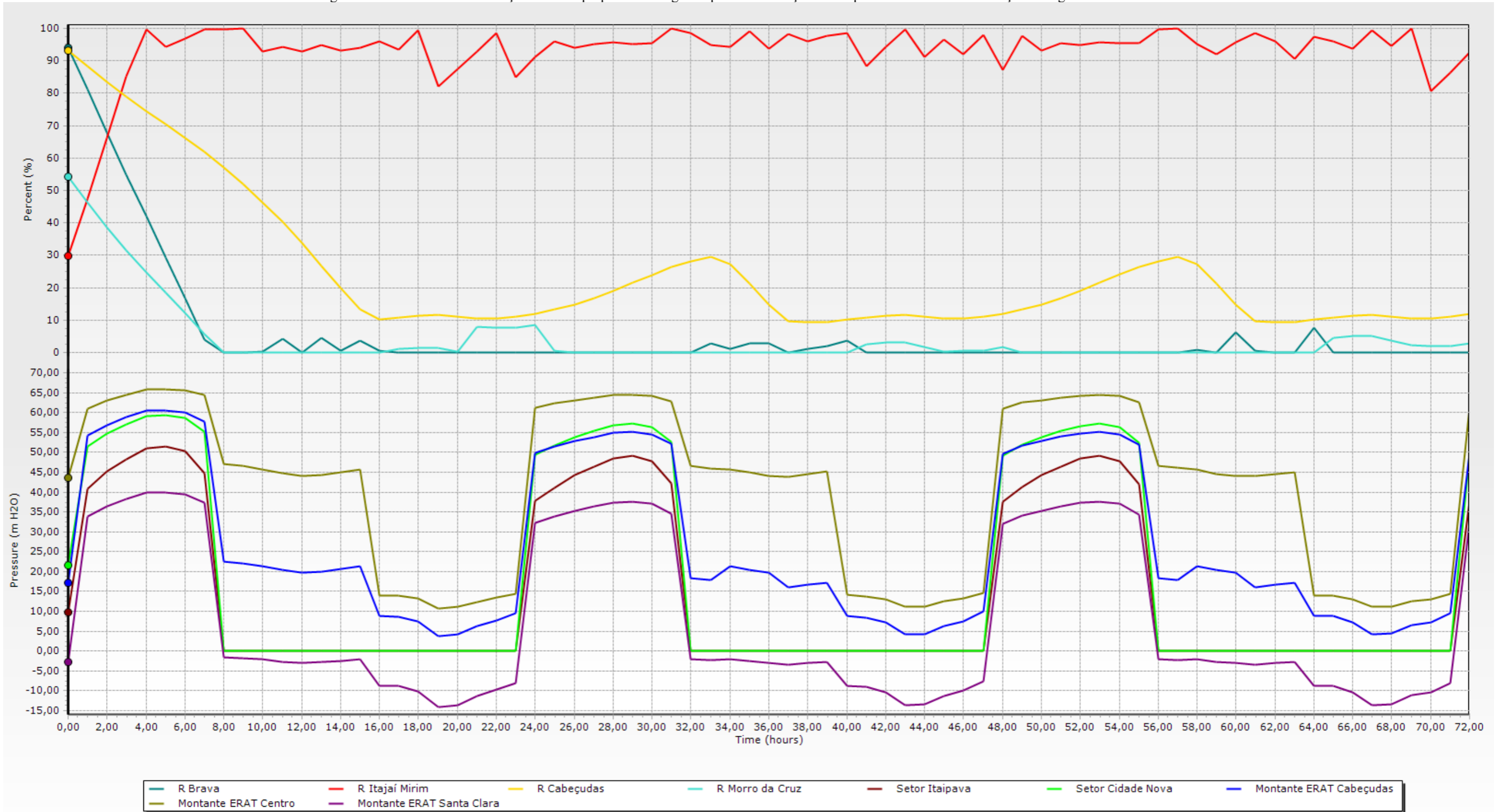


Fonte: Autoria própria (2021)

A estratégia de intervenção E12 inclui a realização de rodízio do abastecimento dos setores e reservatórios impactados. Entretanto, de acordo com os resultados apresentados na Figura 27 a seguir, os conjuntos motobomba da ERAT Itajaí Mirim (localizada em cota igual a 5,00 metros) não possuem capacidade para recalcar a vazão necessária na altura manométrica requerida para que a água chegue a ERAT Santa Clara (localizada em cota igual aproximada de 26,50 metros). A ERAT Santa Clara é responsável por recalcar, mais uma vez, a água até o reservatório Brava. Dessa forma, ocorre o esvaziamento do reservatório Brava e, conseqüentemente, o desabastecimento do setor Brava e de parte do município de Balneário Camboriú. Apesar de que na Figura 27 o volume do reservatório da Brava varia, a pressão imediatamente a montante da ERAT Santa Clara é negativa nos horários em que esse reservatório deveria ser abastecido. Ressalta-se que, quando a água é bombeada para a ERAT Santa Clara, há também o bombeamento para a ERAT Cabeçudas, que possui vazão pequena (em média 11 L/s) e está localizada em cota baixa (aproximadamente 6,00 metros), não influenciando de maneira suficiente nesse desabastecimento.

Assim, mesmo com um rodízio rígido da região afetada, a estratégia aplicada não é eficaz para reduzir a vulnerabilidade do sistema ao nível esperado, conforme apresentado na Tabela 9, pois a população do setor Brava não é abastecida a nível intermediário de acesso à água (60 L/hab./dia considerando perdas).

Figura 27 – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia 12 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 03 na A6-T1.



Fonte: Autoria própria (2021)

Assim, dentro dos trechos analisados e simulados não foram observados casos em que as estratégias elencadas não foram consideradas interessantes para a redução da vulnerabilidade do trecho – com exceção do trecho A6-T1. Assim, no caso em que a estratégia elencada é ineficaz, recomenda-se, como forma de evitar o dano ou falha da adutora bem como de minimizar os impactos:

- Garantir estoque dos equipamentos necessários para manutenção, com vistas a diminuir o tempo de reabilitação dos trechos que não possuem alternativas de abastecimento;
- Atentar para a realização de manutenção periódica desses trechos, com o objetivo de diminuir a probabilidade de danos e falhas evitáveis;
- A instalação de medidores de pressão próximo a esses trechos críticos, de maneira a possibilitar a análise por telemetria dos mesmos e, conseqüentemente, identificar mais rapidamente eventuais problemas;
- Manter o cadastro do SAA atualizado e compartilhado com órgãos responsáveis por demais infraestruturas do município, para que durante obras e manutenções nas vias seja possível identificar com a maior precisão possível a localização das tubulações, minimizando choques mecânicos e rompimentos;
- Realizar simulações visando a minimização da vulnerabilidade com base nas tubulações internas aos setores e não da macrodistribuição. Dentre as tubulações internas aos setores pode-se realizar o estudo considerando especificamente as tubulações que encaminham água para os distritos de medição e controle de cada setor, pois essas tubulações possuem diâmetros maiores que a rede de distribuição em si.

Tais recomendações também podem ser empregadas em outras situações, como em trechos de adutoras onde as estratégias elencadas não são aplicáveis. Essas situações podem ocorrer em adutoras localizados em regiões onde uma ou mais das seguintes possibilidades não existem: realização de manobra operacional para minimizar o impacto; antecipação da implantação de adutora projetada por uma empresa responsável para outras etapas de projeto; operação normal de adutora em paralelo.

5 CONCLUSÃO

Devido a sua complexidade, os sistemas de abastecimento de água eventualmente precisam operar sob condições não ideais. Assim, devem ser analisadas alternativas para que o abastecimento da população seja mantido de maneira satisfatória sob as diversas condições operacionais passíveis de ocorrer. A avaliação dessas diversas estratégias possíveis de serem aplicadas pode ser realizada por meio de modelagem hidráulica, onde é possível avaliar a vazão e a pressão nos pontos de consumo, bem como a variação dos níveis dos reservatórios.

Nesse sentido, o conhecimento das áreas de influência não somente das unidades localizadas, como também das unidades lineares, tem papel fundamental na análise das alternativas possíveis. Já a classificação das principais fragilidades e vulnerabilidades ajuda a nortear o programa de manutenções do sistema, por meio da priorização das unidades e trechos mais vulneráveis. Uma vez que um sistema de abastecimento é composto por uma grande quantidade de unidades, as quais ainda podem ser subdivididas em trechos (no caso das unidades lineares), a utilização de metodologia multicritério de tomada de decisão pode facilitar na escolha dos trechos e unidades mais vulneráveis do sistema. Assim, garante-se maior atenção as unidades críticas e se propõe a redução do risco a elas associado. Nesse sentido, as principais fragilidades do sistema em termos de adutoras da macrodistribuição (objetivo i) foram identificadas por meio da matriz de prioridades, resultando em nove trechos mais frágeis, classificados com prioridade alta para análise. O fato de não terem sido observados trechos de prioridade altíssima decorre, principalmente, de não existirem trechos de tubulações com demandas a jusante superiores a 50% do total demandado pelo SAA.

Os impactos causados no sistema devido a falhas nesses nove trechos analisados foram avaliados por meio de simulação hidráulica (objetivo ii), quando possível simular. Cinco dos nove trechos sob danos ou falhas resultaram em interrupção total da região a jusante. Dos quatro trechos simulados, três apresentaram abastecimento intermitente de parte ou toda região a jusante do trecho rompido. Esses impactos causados pelas situações emergenciais demonstra a vulnerabilidade do sistema a falhas.

Assim, foram propostas estratégias para minimizar os impactos causados por essas emergências (objetivo iii). As quatro estratégias consideradas são relativamente simples, pois envolvem ajustes de controle de operação, realização de manobra em válvulas existentes, a antecipação de adutoras já projetadas para etapas posteriores do projeto realizado por uma empresa responsável e a implantação de pequenos trechos de adutoras. A proposição dessas

estratégias foi avaliada por meio de simulação hidráulica (objetivo iv), onde foram avaliadas as possibilidades de implantação de cada estratégia e modelado o sistema considerando a implantação das mesmas. Dessa forma, foi possível comparar o sistema com e sem as estratégias elencadas, em termos de pressão e vazão nas entradas dos setores e nos pontos de venda para Navegantes, bem como de variação do nível dos reservatórios.

Dentre as estratégias elencadas e analisando-se quais estratégias são aplicadas a quais casos (Figura 15), observa-se que as estratégias 05, 07 e 08 não são as mais interessantes e podem ser suprimidas em função de se adotar outra estratégia. A estratégia 05 é aplicável (e eficaz) somente na situação 01 de rompimento de A3-T1, onde também é possível aplicar a estratégia 06. Comparando os resultados considerando a estratégia 05 (APÊNDICE V) com os resultados considerando a estratégia 06 (APÊNDICE W), observa-se maiores pressões na entrada dos setores quando aplicada a estratégia 06. Além disso, a estratégia 06 também é aplicável a outros casos, como a situação 02 de rompimento de A3-T1 (sendo inclusive a única alternativa elencada). A mesma análise pode ser feita considerando as estratégias 07 e 08, com base no apresentado e discutido no Item 4.3. Portanto, conclui-se que as estratégias E1, E2, E3, E4, E6, E9, E10 e E11 são meios eficazes para a redução da vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água.

6 RECOMENDAÇÕES

A redução da vulnerabilidade de um sistema tão complexo quanto um sistema de abastecimento de água pode ser realizada de diversas maneiras. Nesse sentido, esse trabalho não esgotou todas as alternativas possíveis, sendo algumas delas elencadas a seguir:

- Inclusão de outros critérios na matriz de prioridade, como classe de pressão das tubulações, se as tubulações estão aparentes ou enterradas, população sob influência direta do trecho, tempo de reabilitação médio de cada trecho, complexidade do reparo e tipo de solo no local. O conhecimento operacional dos técnicos que trabalham com o sistema também pode ser incluído nessa análise;
- Simulação para as outras prioridades da matriz apresentada na Tabela 11 (baixíssima, baixa e média);
- Simulação considerando diferentes condições de contorno iniciais, como o nível dos reservatórios apresentado na Figura 8);
- Simulação com tempo de simulação maior que 72 horas, visto que durante a alta temporada os dias de maior consumo podem superar o tempo simulado;
- Análise das unidades localizadas do sistema, como captação, estação de tratamento de água, estações de recalque e reservatórios;
- Análise de interligação entre os setores por meio das sub-adutoras internas aos mesmos, as quais transportam água entre os distritos de medição e controle.

Ainda, podem ser criados indicadores para avaliar a vulnerabilidade do sistema e a sua redução. Por exemplo, esses indicadores podem ser utilizados para mensurar os impactos causados no sistema quando uma falha ocorre sem e com a aplicação de estratégias emergenciais, bem como para avaliar o tempo de reabilitação do sistema.

Cabe ressaltar que nesse estudo não foi realizada análise de custos, ou seja, qual o custo-benefício da implantação e operação de uma alternativa emergencial quando comparado ao abastecimento por caminhão pipa da região afetada por uma falha, por exemplo.

REFERÊNCIAS

ACEVEDO, Dumar Mauricio Toro. Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidade de sistema de agua potable y saneamento. In: CURSO INTERNACIONAL MICROZONIFICACIÓN Y SU APLICACIÓN EM LA MITIGACIÓN DE DESASTRES, III, 2002, Lima. **Anais...** Lima: 2002.

AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE SANTA CATARINA - ARESC. Resolução nº 46, de 19 de novembro de 2016. Estabelece as condições gerais para a prestação e utilização dos serviços públicos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. **Lex:** Coletânea de Legislação e Jurisprudência, Florianópolis, 1. trim. 2016. Disponível em: <<https://www.aresc.sc.gov.br/>>. Acesso em: 16 out. 2020.

AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE SANTA CATARINA - ARESC. Resolução nº 156, de 15 de abril de 2020. Estabelece diretrizes para a elaboração e implementação do Plano de Contingência e Emergência dos serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, inclusive racionamento, e dá outras providências. **Lex:** Coletânea de Legislação e Jurisprudência, Florianópolis, 2. trim. 2020. Disponível em: <<https://www.aresc.sc.gov.br/>>. Acesso em: 16 out. 2020.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Manual of Water Supply Practices: Emergency Planning for Water Utility Management.** 3ª ed. Denver, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12211:** Estudo de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro, 1992. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12214:** Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2020. 35p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12215-1:** Projeto de adutora de água – Parte 1: Conduto forçado. Rio de Janeiro, 2017a. 26p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12217:** Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1994. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218:** Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento. Rio de Janeiro, 2017b. 23p.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de; FERNANDEZ, Miguel Fernandez y; ARAUJO, Roberto de; ITO, Acácio Eiji. **MANUAL DE HIDRÁULICA.** 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

BENTLEY. **WaterCAD CONNECT Edition:** Modelagem e Gerenciamento de Redes de Distribuição de Água – Resumo do produto. 2007, 2p. Disponível em: <<https://prod-bentleycdn.azureedge.net/en>>. Acesso em: 15 out. 2020.

BENTLEY. **WaterCAD:** User's guide. Watertown: Bentley Systems, 2005. 966p.

BRASIL. Lei n. 11445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos

6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. **Lex:** Coletânea de Legislação e Jurisprudência, Brasília, janeiro, 1. trim. 2007. Legislação Federal e marginalia.

BRIOZO, Rodrigo Amancio; MUNETTI, Marcel Andreotti. Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma unidade de pronto atendimento UPA 24 h. **Gestão & Produção**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 805-819, 29 set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x975-13>.

CALDO, Leandro de Almeida; RAMALHO, Tiago Batista; SELVA, Ricardo Verde. Desenvolvimento de ferramenta operacional para o sistema de abastecimento de água de Coxim-MS por meio de modelagem hidráulica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2015.

CARRIJO, Ivaltemir Barros. **Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina**. 2004. 234 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia em Hidráulico e Saneamento, Escolha de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/>. Acesso em: 09 out. 2020.

CLARK, Robert M.; DEININGER, Rolf A.. Protecting the Nation's Critical Infrastructure: the vulnerability of u.s. water supply systems. **Journal Of Contingencies And Crisis Management**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 73-80, jun. 2000. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1468-5973.00126>.

DINIZ, Tibério Gomes. **Vulnerabilidade ao desabastecimento em situação de intermitência no abastecimento de água**. 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://www.ppgeca.ufcg.edu.br>. Acesso em: 05 abr. 2021.

ECOLIBRA. **Plano Municipal de Saneamento Básico**: prognóstico. Itajaí, 2012. 120 p. Disponível em: <<http://www.semasaitajai.com.br/>>. Acesso em: 21 set. 2021.

FORMIGA, Klebber Teodomiro Martins; CHAUDHRY, Fazal Hussain. Modelos de análise hidráulica de redes de distribuição de água considerando demanda dirigida pela pressão e vazamentos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 153-162, jun. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522008000200005>.

HABITARK. **Plano de Ação Emergencial**: Sistema de Abastecimento de Água. Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura de Itajaí – SEMASA. Itajaí, 2020. 101 p.

HAIMES, Yacov Y.; MATALAS, Nicholas C.; LAMBERT, James H.; JACKSON, Bronwyn A.; FELLOWS, James F. R.. Reducing Vulnerability of Water Supply Systems to Attack. **Journal Of Infrastructure Systems**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 164-177, dez. 1998. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(1998\)4:4\(164\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(1998)4:4(164)).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 05 março 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geociências**: organização do território – malha municipal. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/>>. Acesso em: 16 março 2021.

ITAJAÍ. Coordenação da Rede de Urgência e Emergência. Secretaria da Saúde (org.). **REDE DE URGÊNCIA E EMERGÊNCIA**. Disponível em: < <https://saude.itajai.sc.gov.br/>>. Acesso em: 26 fev. 2021.

MASSACHUSETTS. The Commonwealth of Massachusetts. Department of Environmental Protection. Drinking Water Program. **Guidelines and Policies for Public Water Systems: Handbook for Water Supply Emergencies**. 2007. 38 p. Disponível em: < <https://www.mass.gov/service-details/guidelines-for-public-water-systems>>. Acesso em: 21 novembro 2021.

MENESES, Ronaldo Amâncio. **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água**: o caso de campina grande. 2011. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br/>. Acesso em: 22 out. 2020.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Secretaria de Defesa Civil. **Política Nacional de Defesa Civil**. Brasília, 2000. Disponível em: <<http://www.defesacivil.mg.gov.br/>>. Acesso em: 27 outubro 2020.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. Brasília, 2020. Relatório. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos>>. Acesso em: 15 março 2021.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS**. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>>. Acesso em: 05 março 2021.

MISIRDALI, Metin. **A METHODOLOGY FOR CALCULATING HYDRAULIC SYSTEM RELIABILITY OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência, Department Of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ancara, 2003. Disponível em: <<https://etd.lib.metu.edu.tr/>> Acesso em: 05 out. 2021.

NAVARRO-ROA, Zacarías. **Avaliação da vulnerabilidade hidráulica de um sistema de abastecimento de água**: o caso da cidade de santiago de los caballeros, república dominicana. 2008. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br>. Acesso em: 23 set. 2020.

NOGUEIRA, Christiane Wenck. **A METODOLOGIA MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP):** um estudo de caso na priorização de traçado de pavimentação de uma estrada. 2002. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br>. Acesso em: 16 abr. 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Guidelines for Drinking-Water Quality. 4ª ed. Geneva, 2017. 631 p. Disponível em: <<https://www.who.int/publications>>. Acesso em: 01 dez. 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Pan American Health Organization. **Mitigación de desastres naturales em sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario.** Washington, 1998. 100 p. Disponível em: <<https://iris.paho.org>>. Acesso em: 22 out. 2020

PINTO, Jorge; VARUM, Humberto; DUARTE, António; AFONSO, Luís; VARAJÃO, João; BENTES, Isabel. Risco de cenários de dano vulneráveis de redes de abastecimento de água. **Territorium**, [S.L.], n. 18, p. 271-278, 29 jul. 2011. Coimbra University Press. http://dx.doi.org/10.14195/1647-7723_18_26.

PIRES, Wilson Diniz Fernandes. **GESTÃO DE RISCOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA:** uma abordagem. 2020. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2020. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/>. Acesso em: 11 abr. 2021.

PIZZOLATTI, Bruno Segalla. **AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE DESINFECÇÃO:** cloração e radiação ultravioleta, com a finalidade de utilização da água de chuva em escala residencial. 2007. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br>. Acesso em: 16 abr. 2021.

PORTO, Rodrigo de Melo. **HIDRÁULICA BÁSICA.** 4. ed. São Carlos: EESC/USP, 2006. 540 p.

RIGHETTO, Antonio Marozzi. Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA, 1., 2002, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: 2002

SANTOS, Davide dos; MOREIRA, Madalena; ALMEIRA, António Betâmio de. Aplicação do método *bow-tie* no controlo do risco em serviços de abastecimento de água. In: 11º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA – SILUSBA. **Anais...** Maputo: 2013.

SANTOS, Davide dos; MOREIRA, Madalena; ALMEIRA, António Betâmio de. Avaliação do risco da degradação da qualidade da água em sistemas públicos de abastecimento. In: 6º CONGRESSO LUSO-MOÇAMBICANO DE ENGENHARIA – CLME. **Anais...** Maputo: 2011.

SERVIÇO MUNICIPAL DE ÁGUA SANEAMENTO BÁSICO E INFRAESTRUTURA (Itajaí). **Sobre o SEMASA**: histórico. Disponível em: < <http://www.semasaitajai.com.br/>>. Acesso em: 05 mar. 2021.

SPHERE. **O Manual Esfera**: Carta Humanitária e Normas Mínimas para Resposta Humanitária. Genebra, 2018. 470 p. Disponível em: <<https://spherestandards.org/handbook/editions/>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

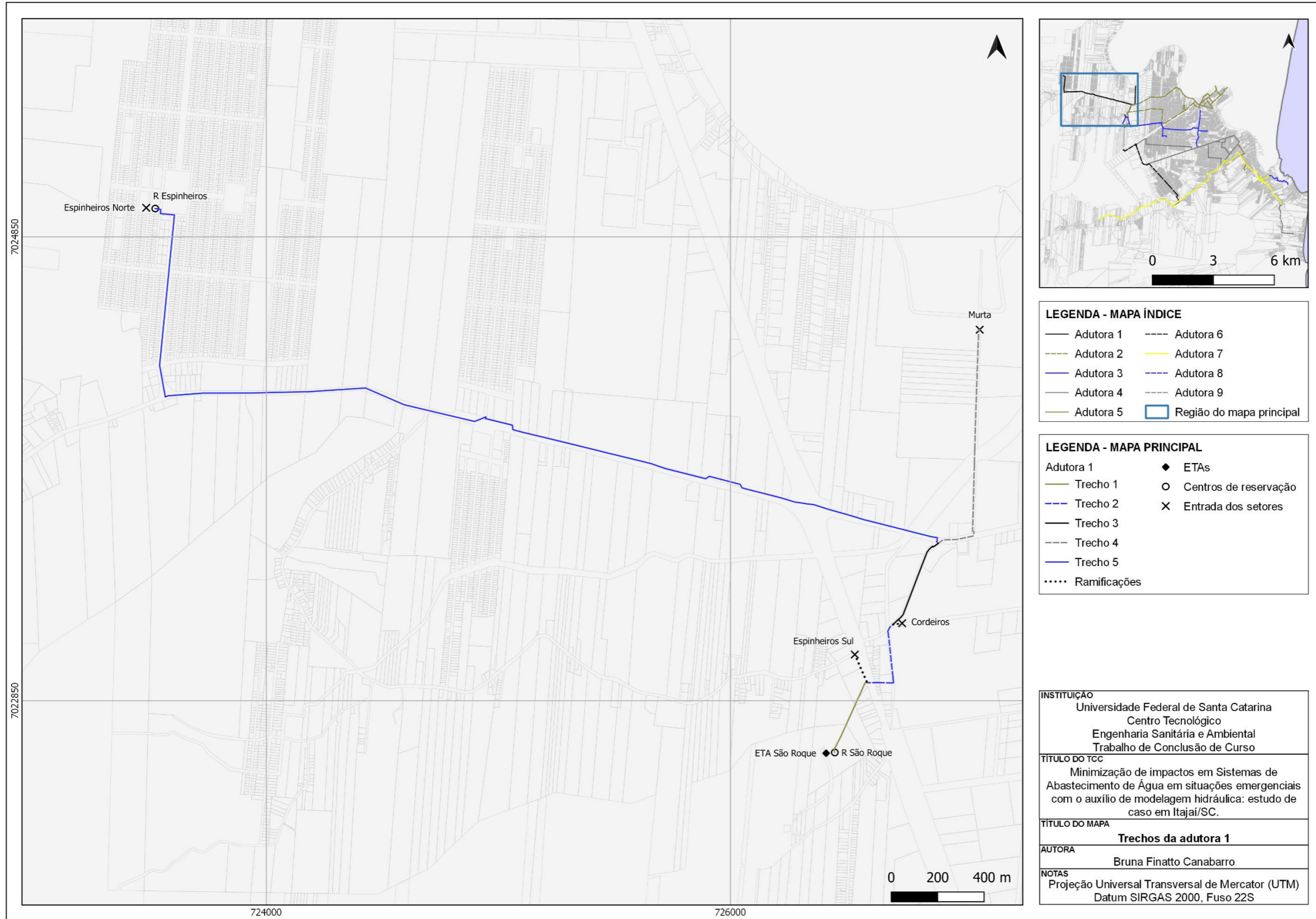
TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. 4. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006. 643 p.

VARGAS, Luis G.. An overview of the analytic hierarchy process and its applications. **European Journal Of Operational Research**, [S.L.], v. 48, n. 1, p. 2-8, set. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-h](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-h).

WISNER, Ben. “Vulnerability” in disaster theory and practice: from soup to taxonomy, then to analysis and finally tool. In: INTERNATIONAL WORK-CONFERENCE: Disaster Studies of Wageningen University and Research Centre, 2001, Oberlin. **Anais...** Oberlin: 2001.

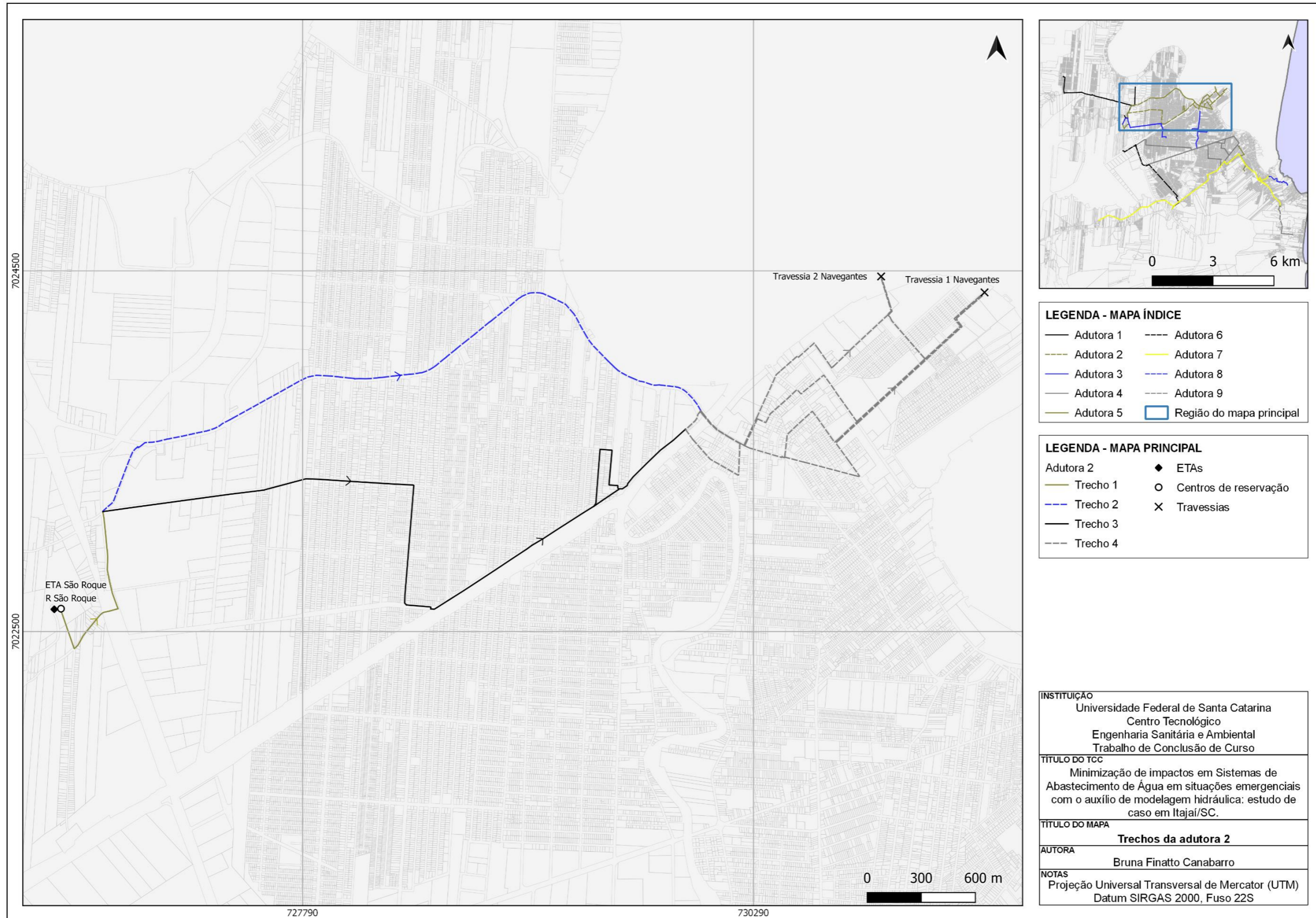
YANG, Jiaqin; LEE, Huei. An AHP decision model for facility location selection. **Facilities**, [S.L.], v. 15, n. 9/10, p. 241-254, set. 1997. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/02632779710178785>.

APÊNDICE A – Mapa da adutora 1



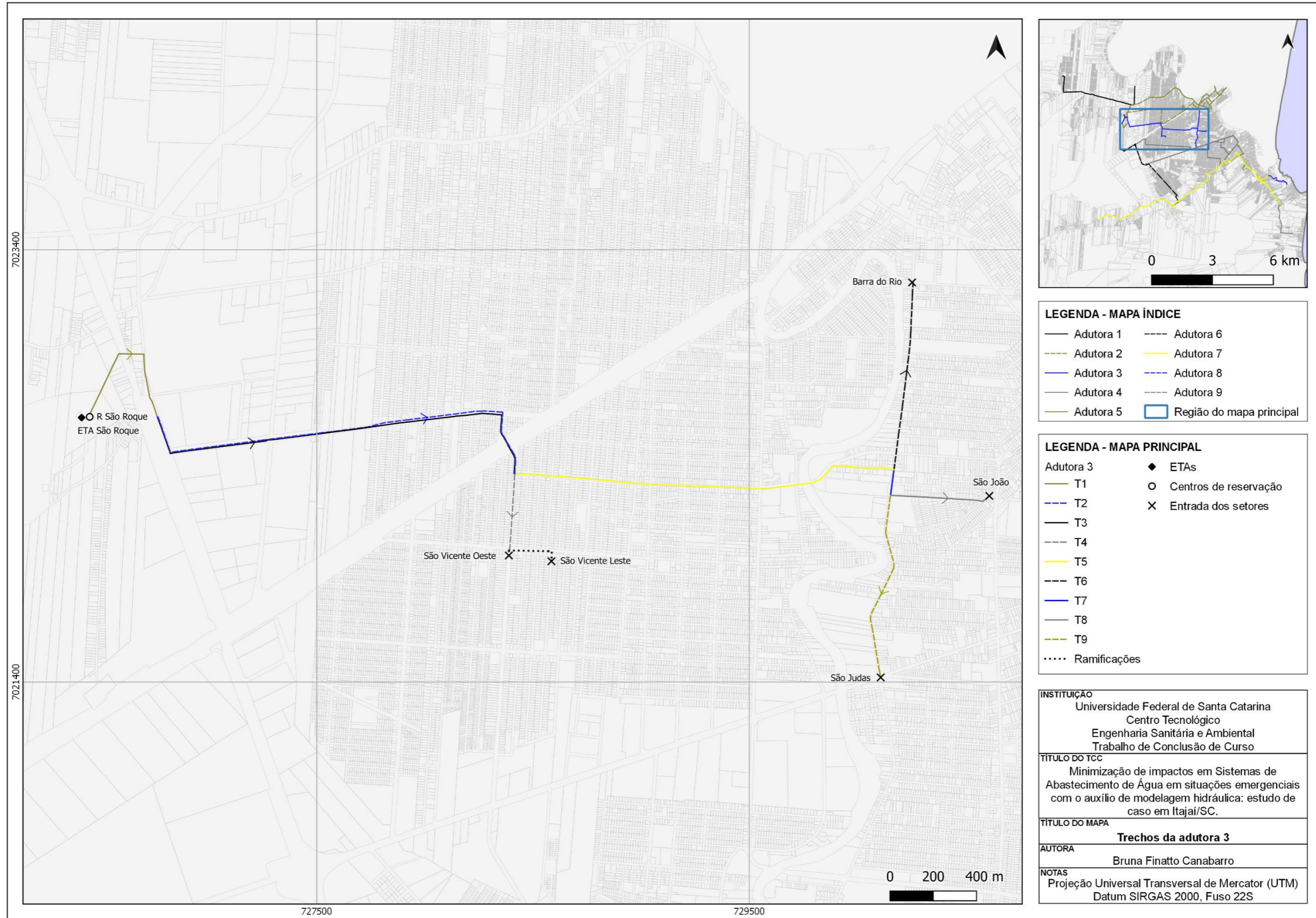
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE B – Mapa da adutora 2



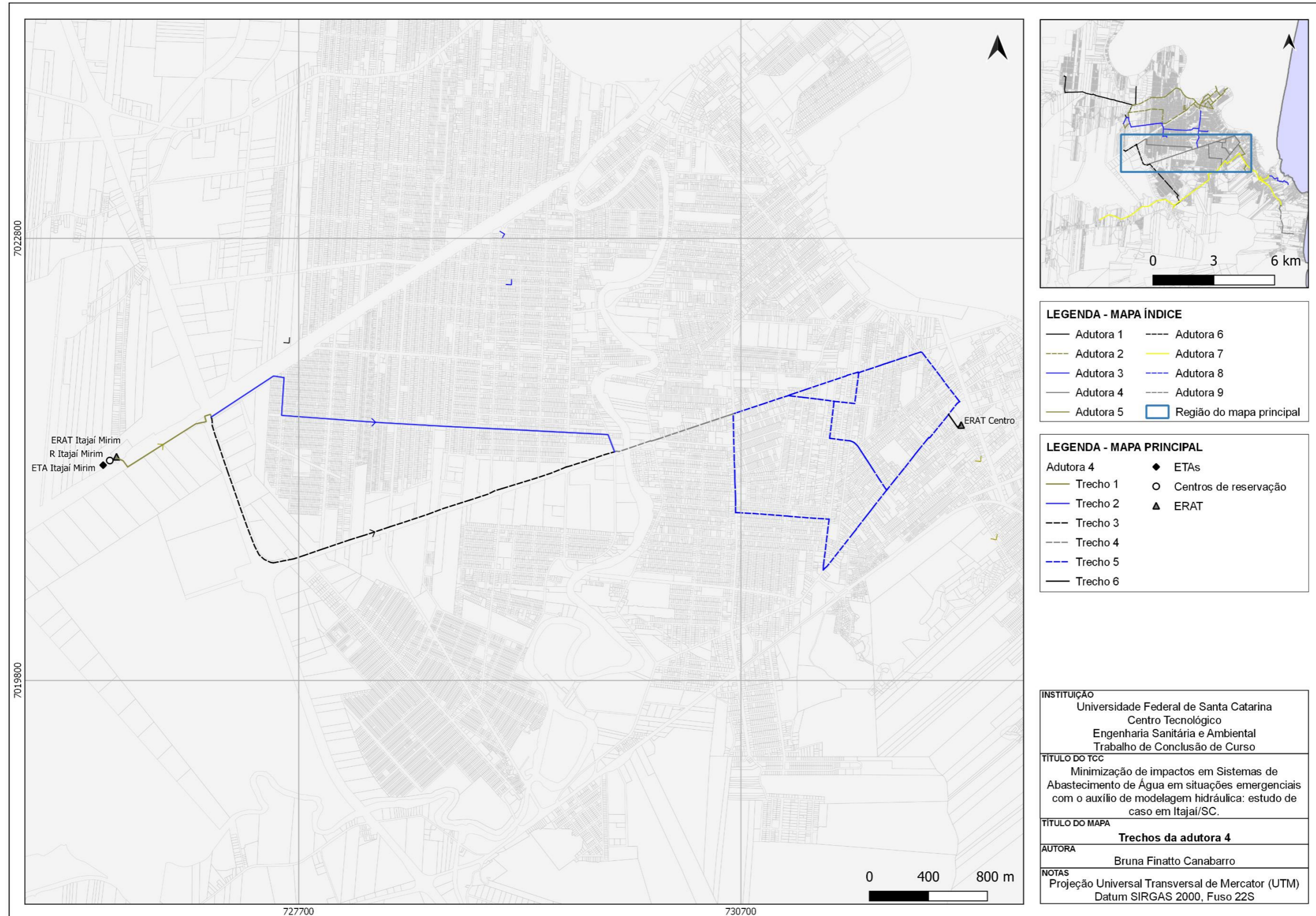
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE C – Mapa da adutora 3



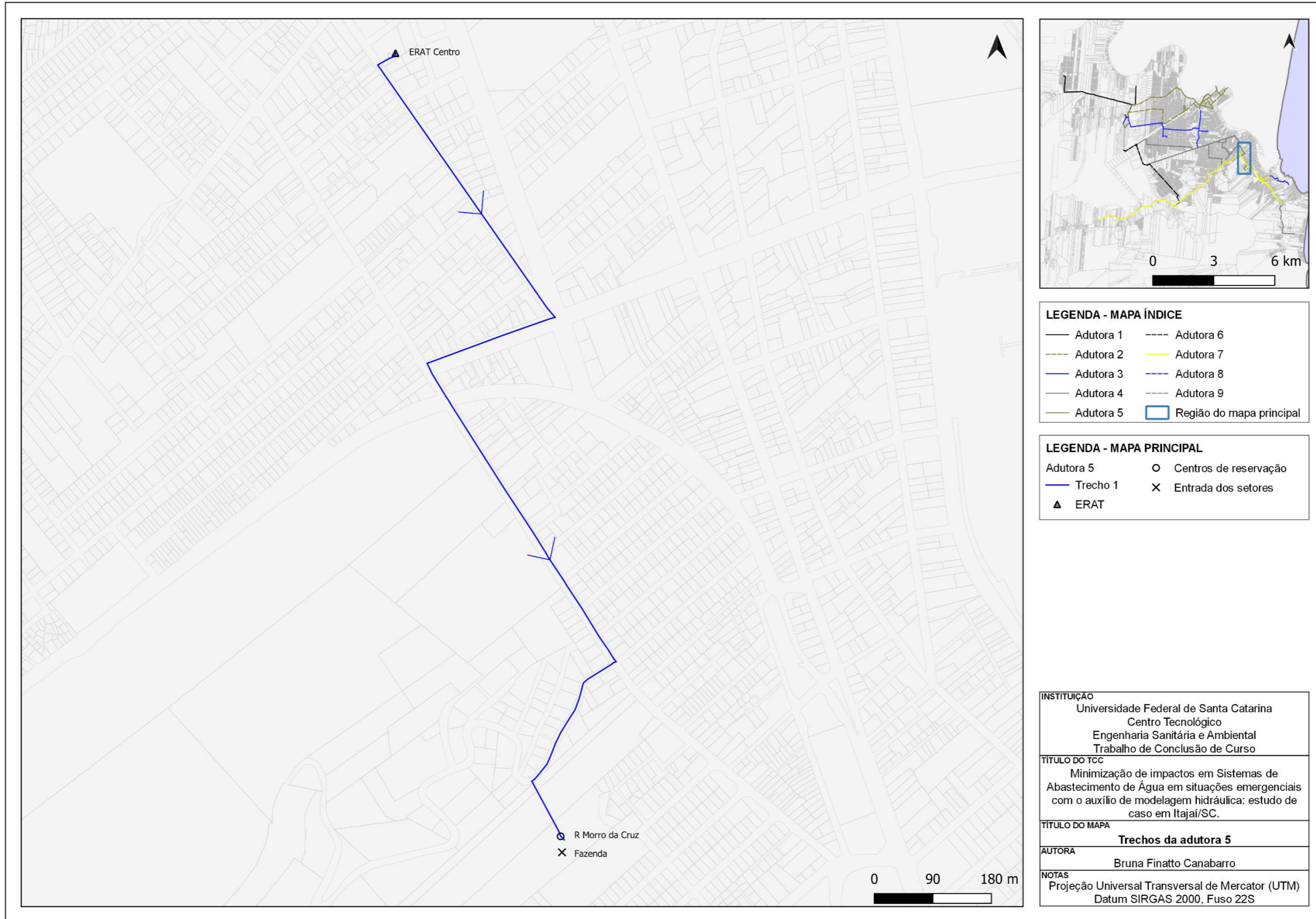
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE D – Mapa da adutora 4



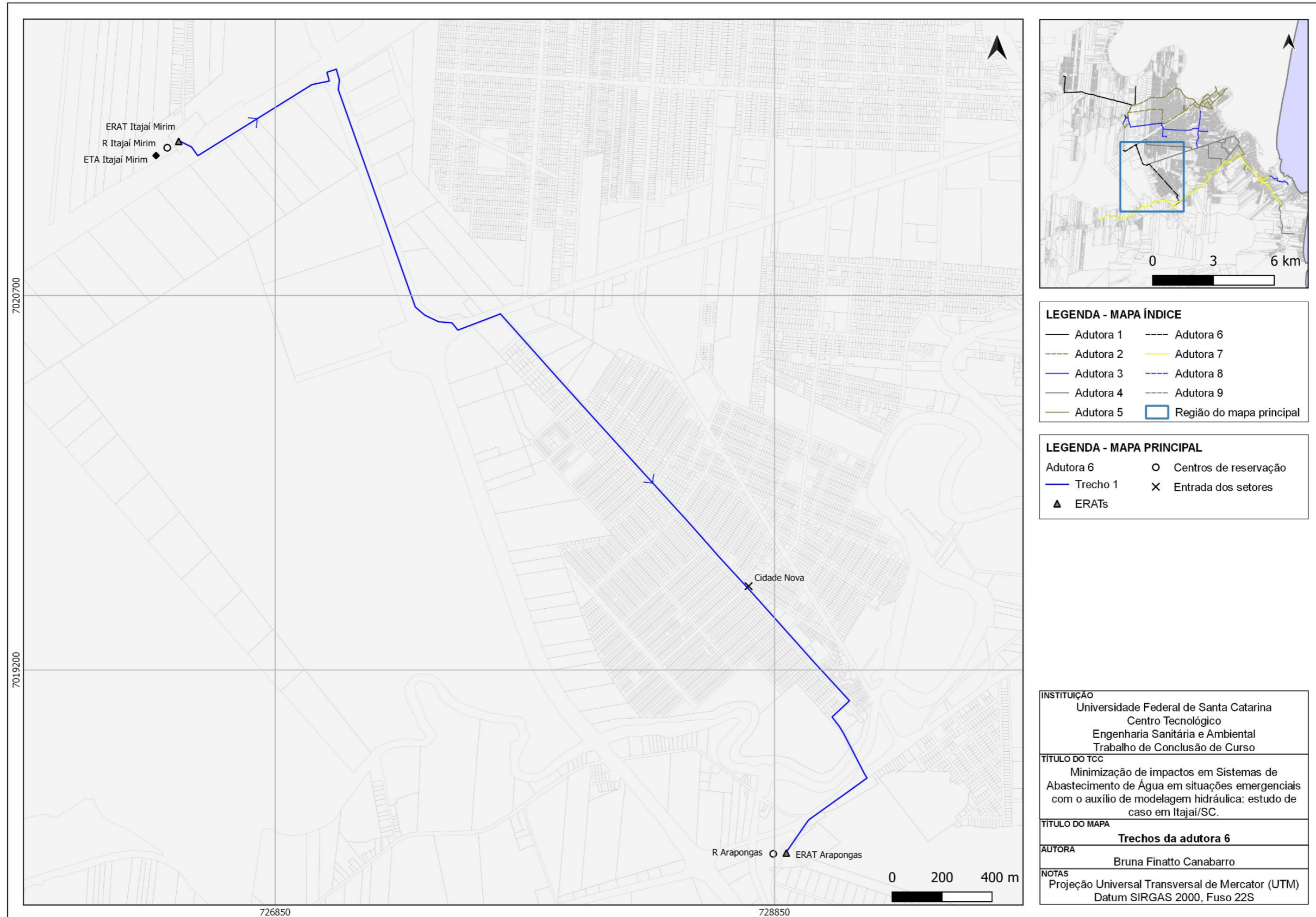
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE E – Mapa da adutora 5



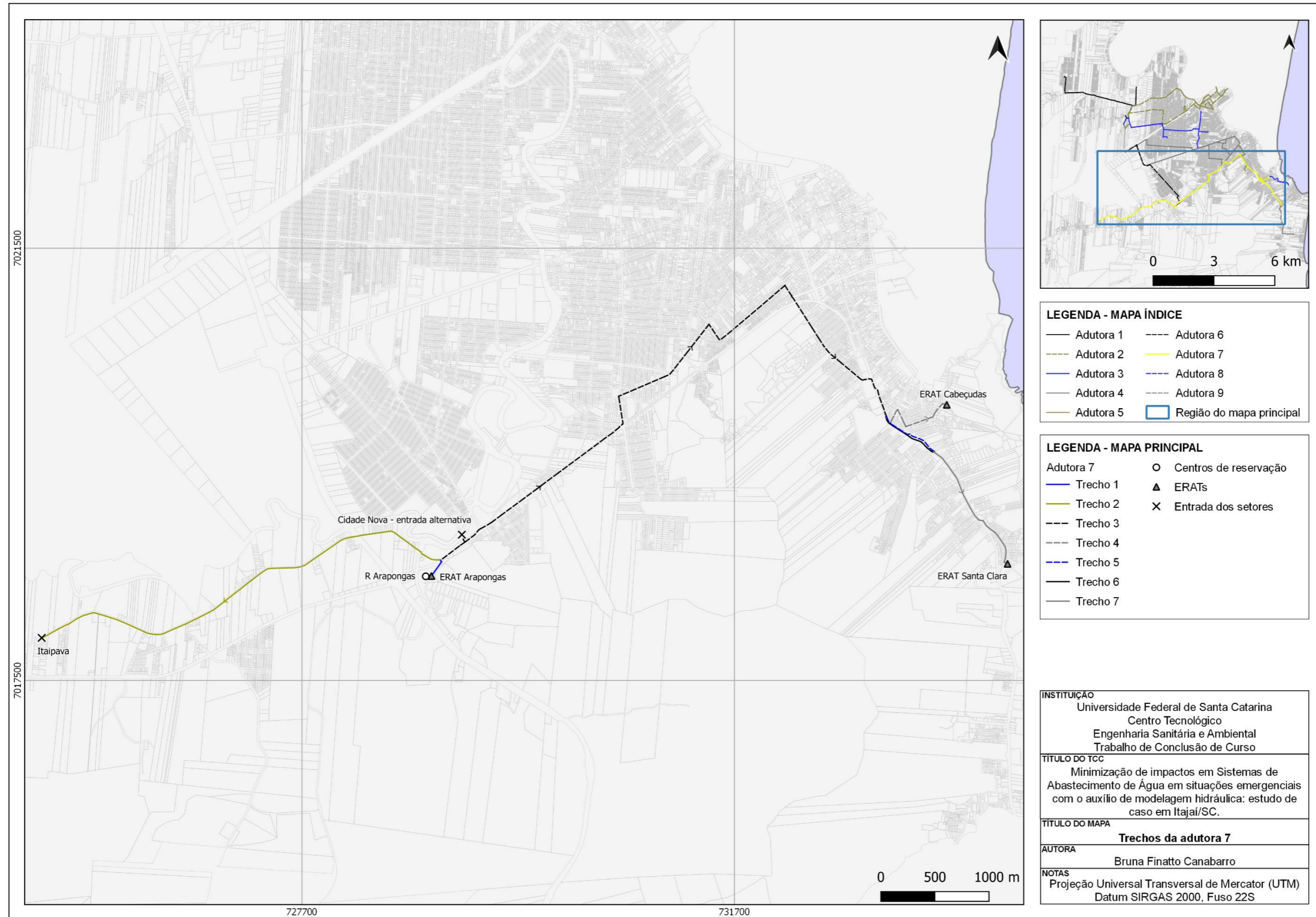
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE F – Mapa da adutora 6



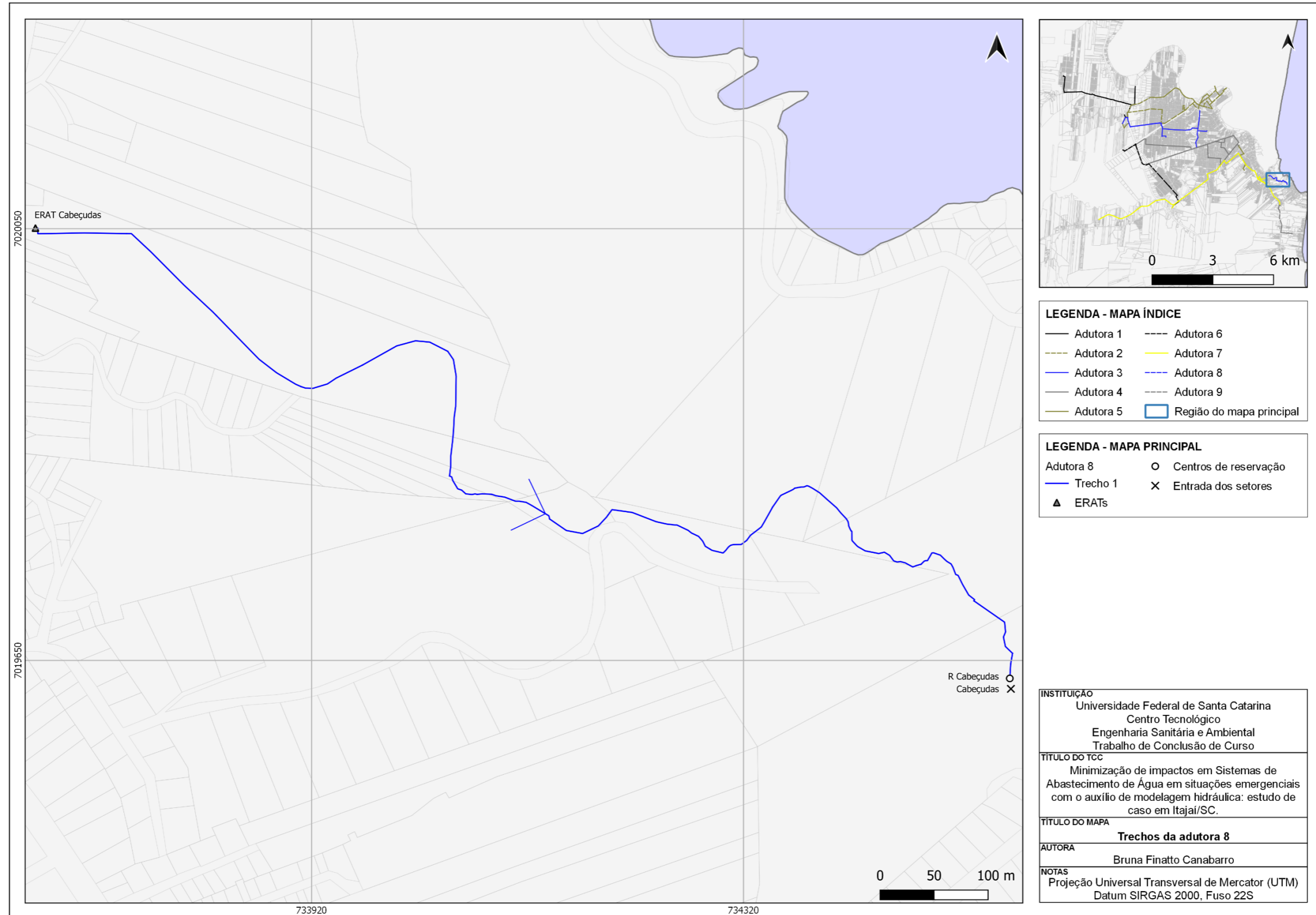
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE G – Mapa da adutora 7



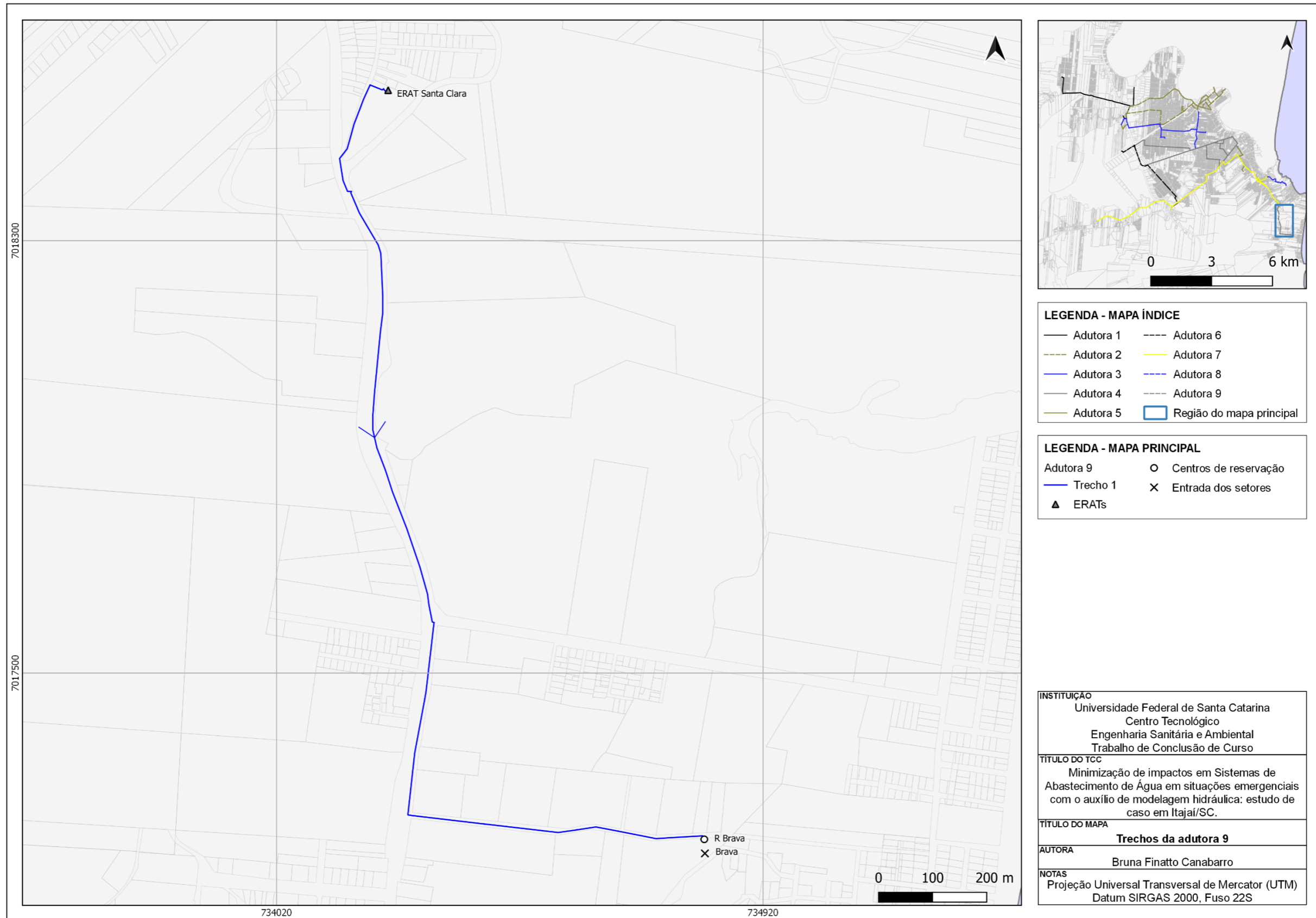
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE H – Mapa da adutora 8



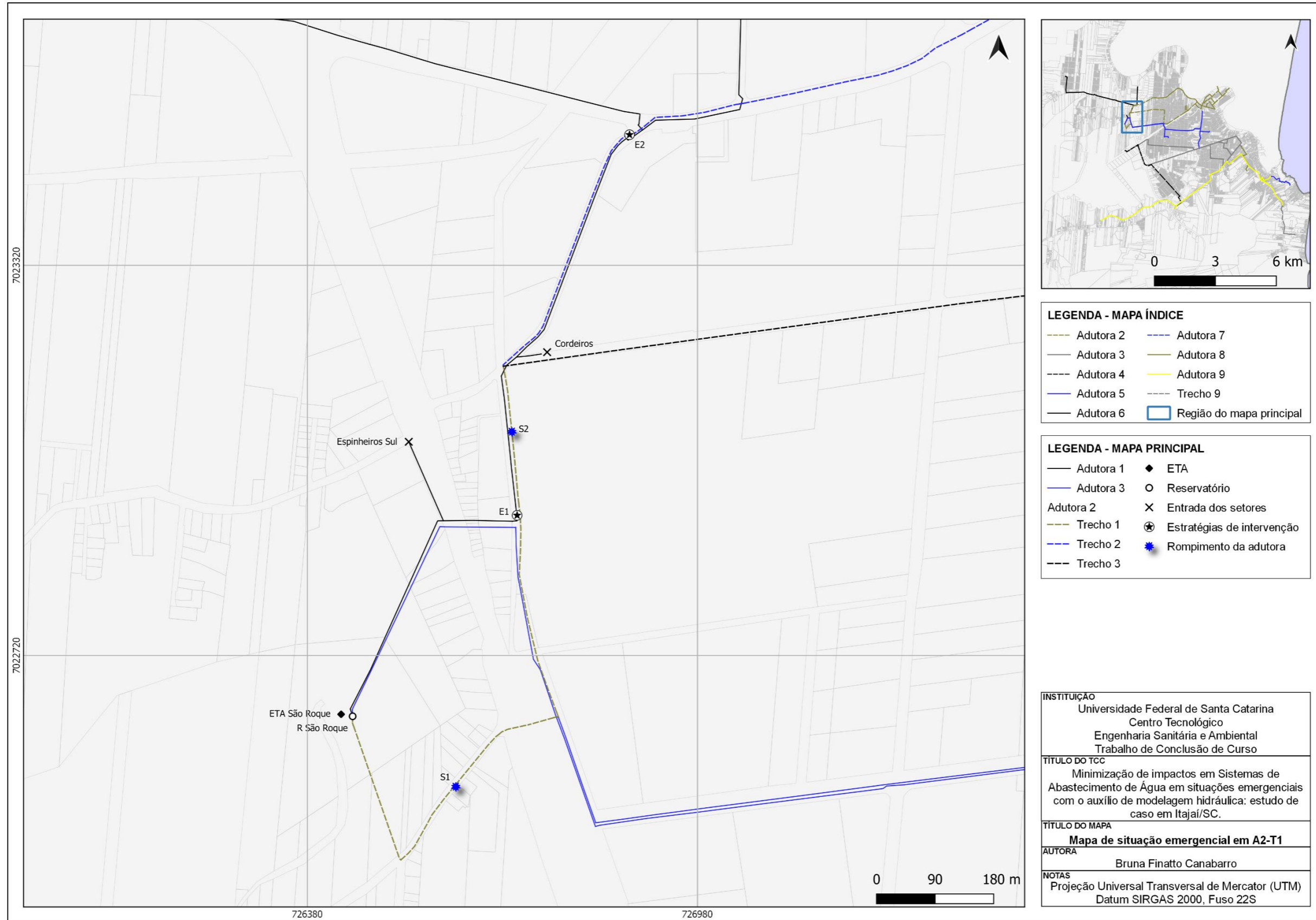
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE I – Mapa da adutora 9



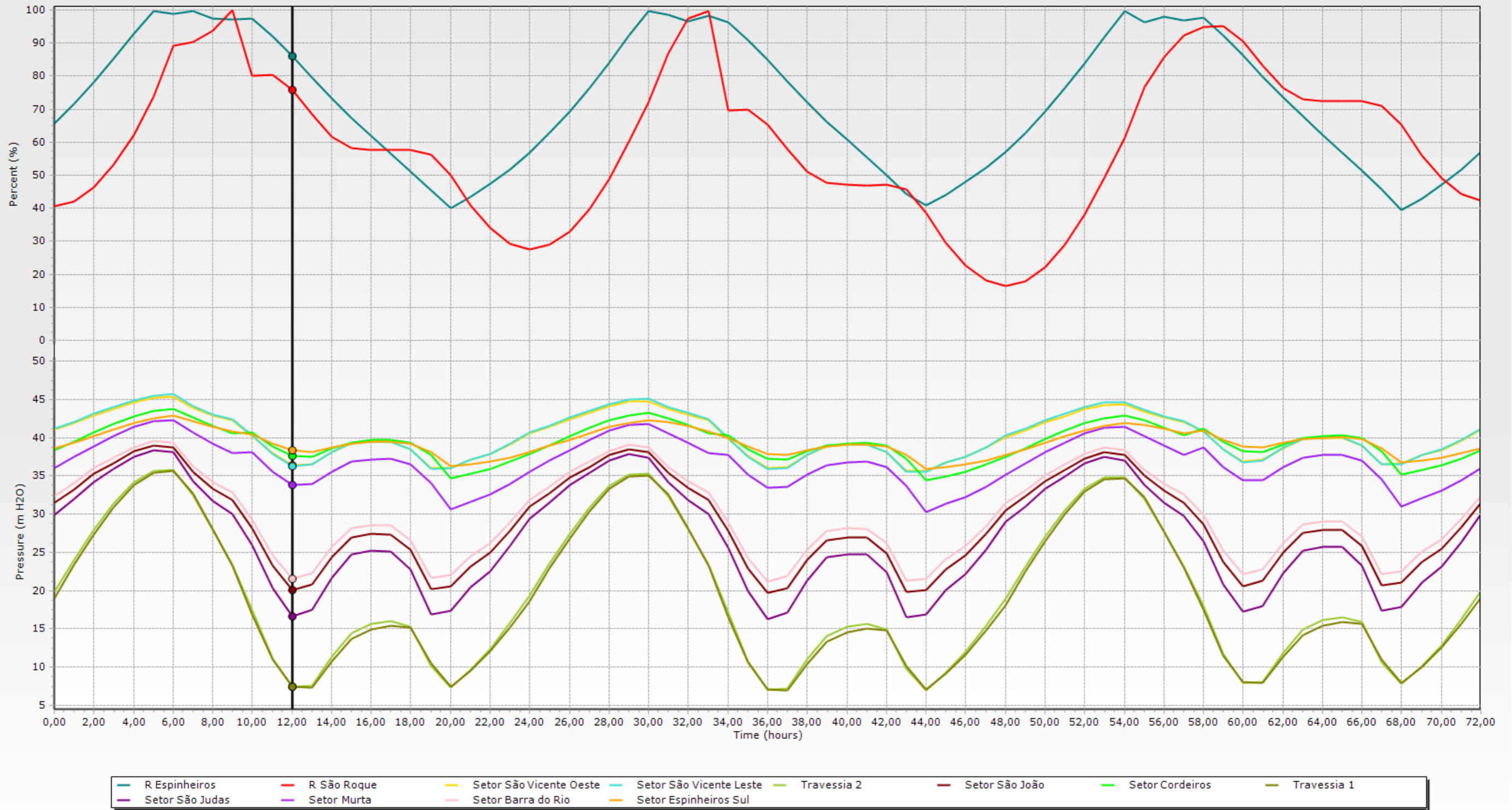
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE J – Mapa das situações emergenciais 01 e 02 na A2-T1 e proposição das estratégias 01 e 02 para minimização dos impactos



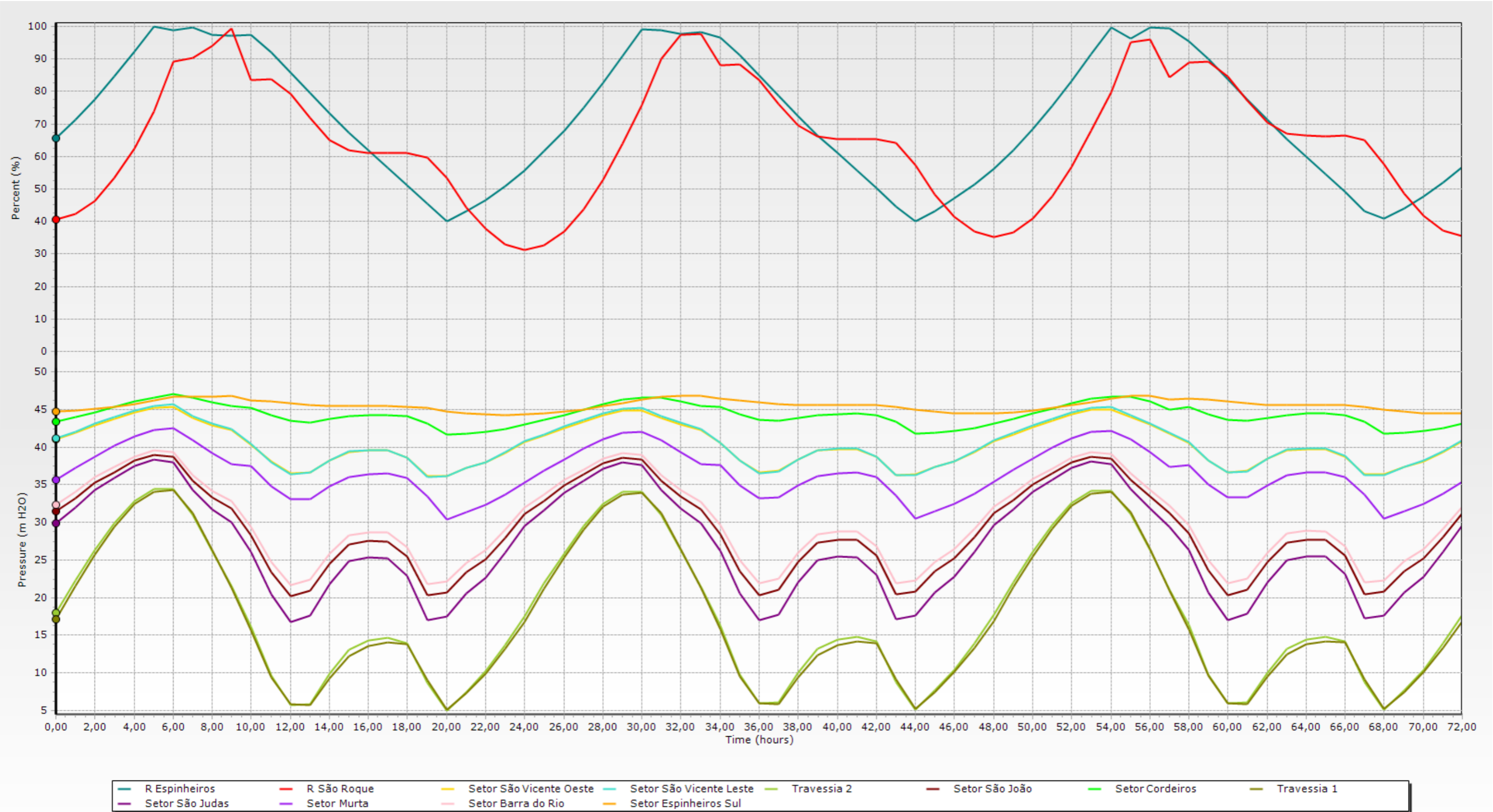
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE K – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E1 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A2-T1



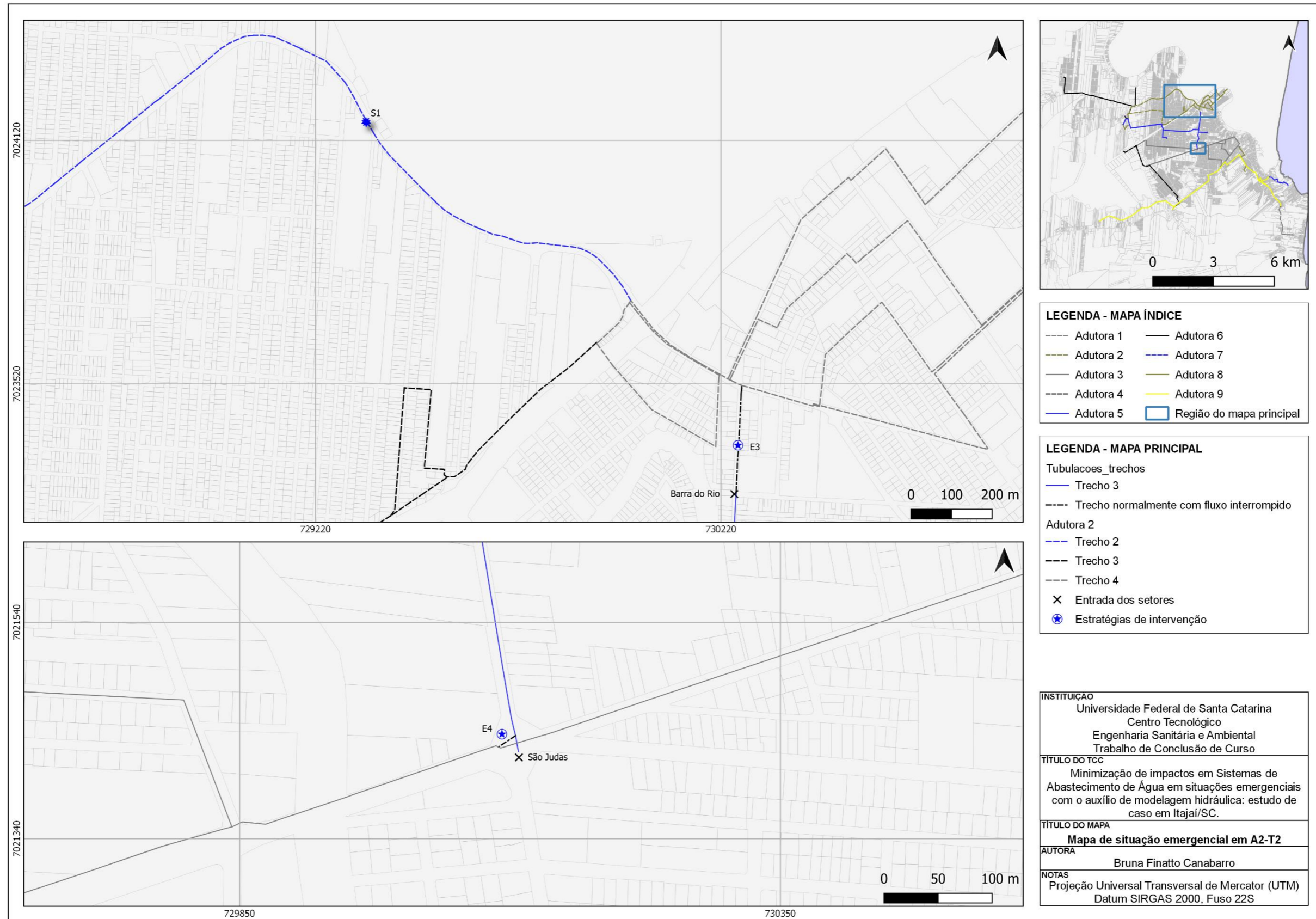
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE L – Resultados da simulação onde foram propostas estratégias E1 e E2 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A2-T1



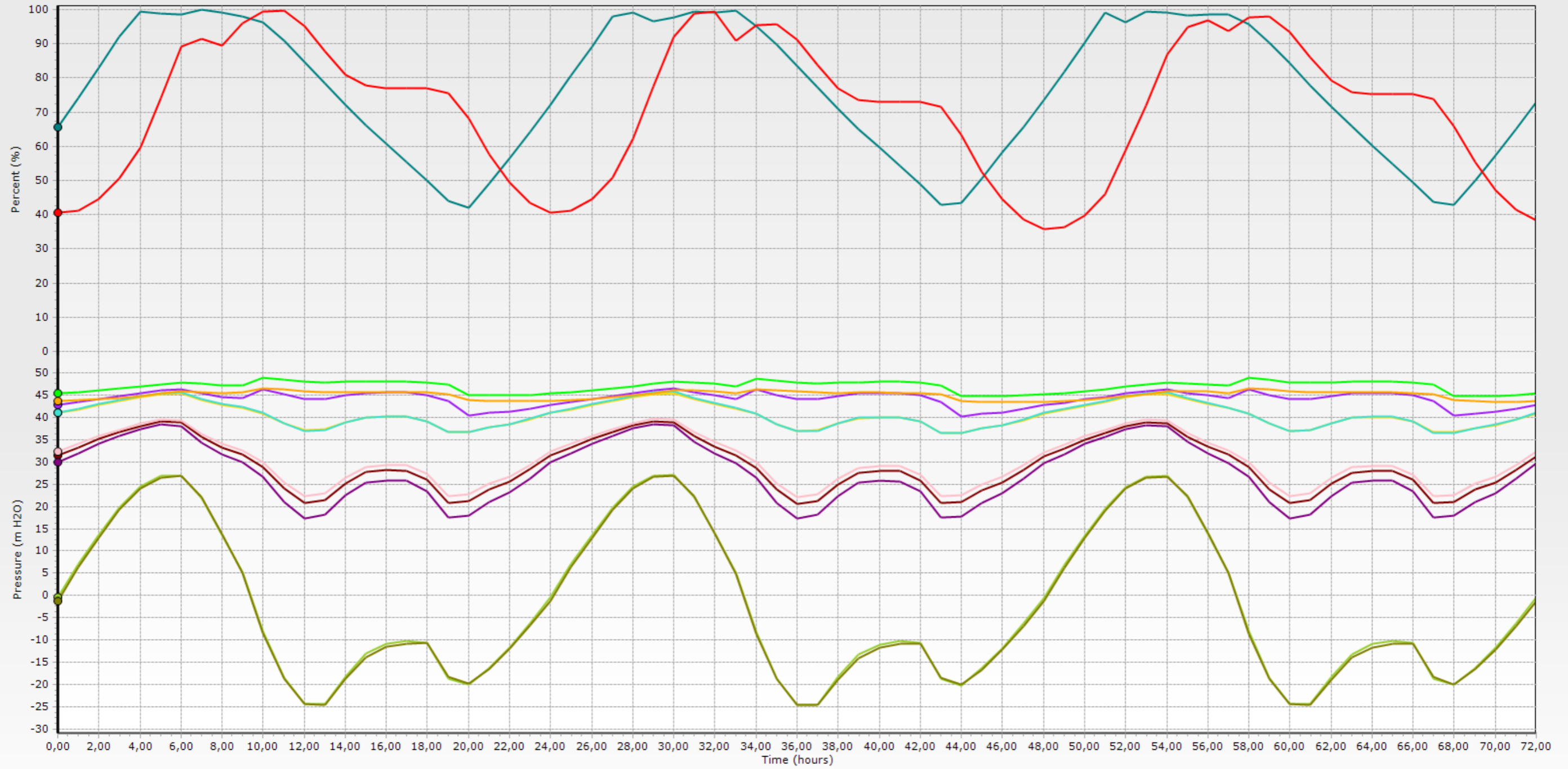
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE M – Mapa da situação emergencial na A2-T2 e proposição das estratégias 03 e 04 para minimização dos impactos



Fonte: Autoria própria (2021)

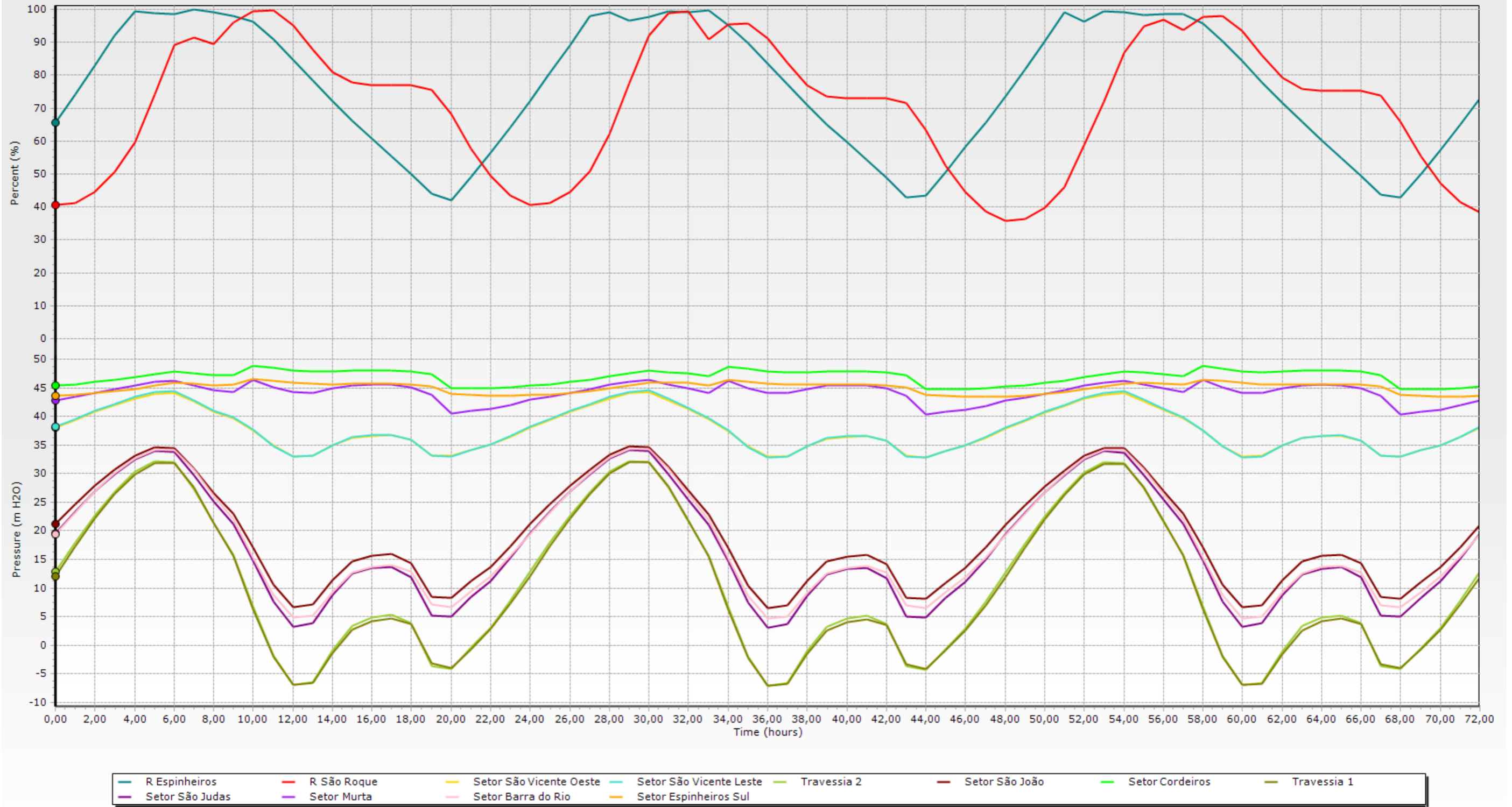
APÊNDICE N – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T2



- R Espinheiros
- R São Roque
- Setor São Vicente Oeste
- Setor São Vicente Leste
- Travessia 2
- Setor São João
- Setor Cordeiros
- Travessia 1
- Setor São Judas
- Setor Murta
- Setor Barra do Rio
- Setor Espinheiros Sul

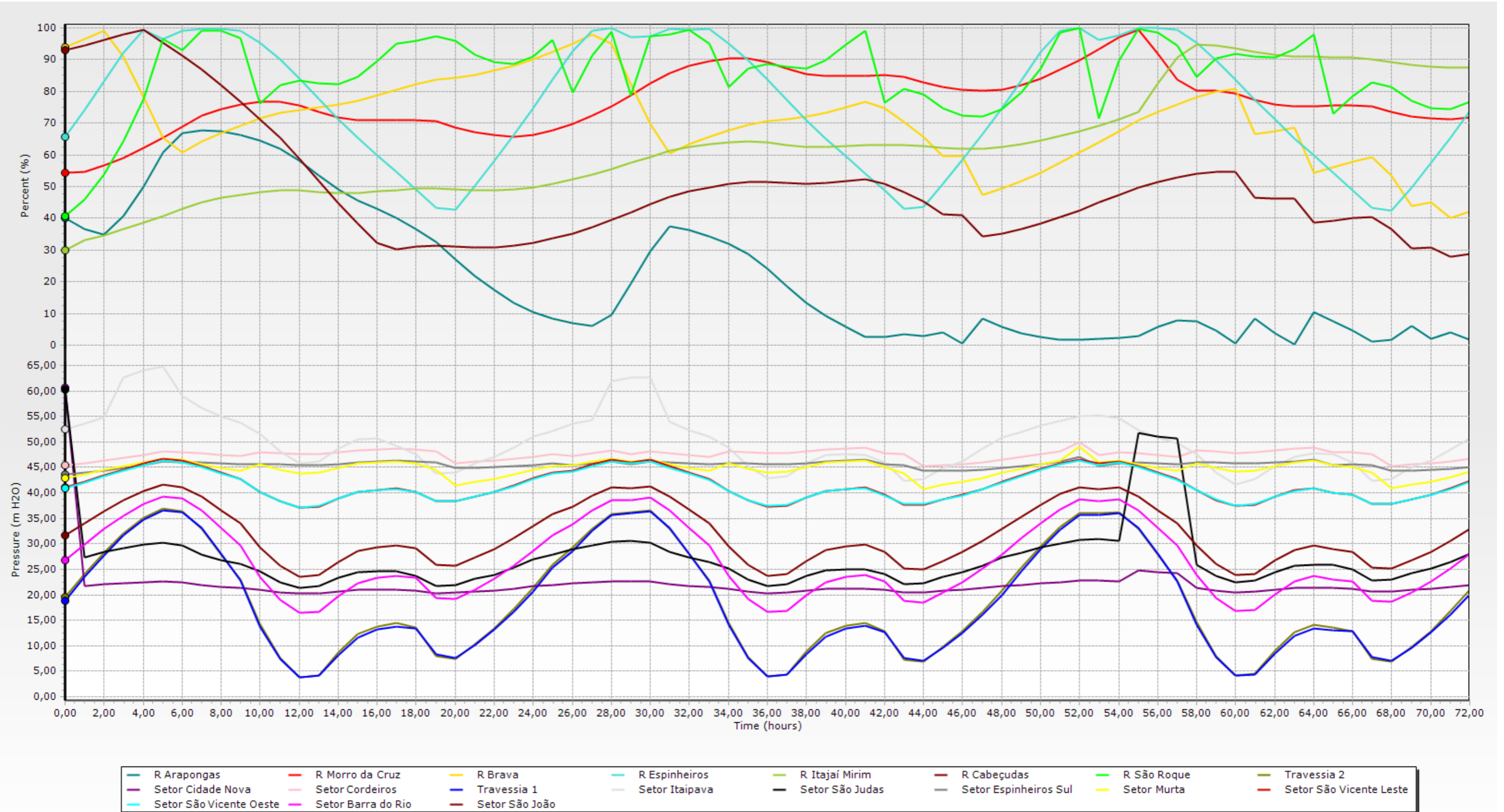
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE O – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E3 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T2



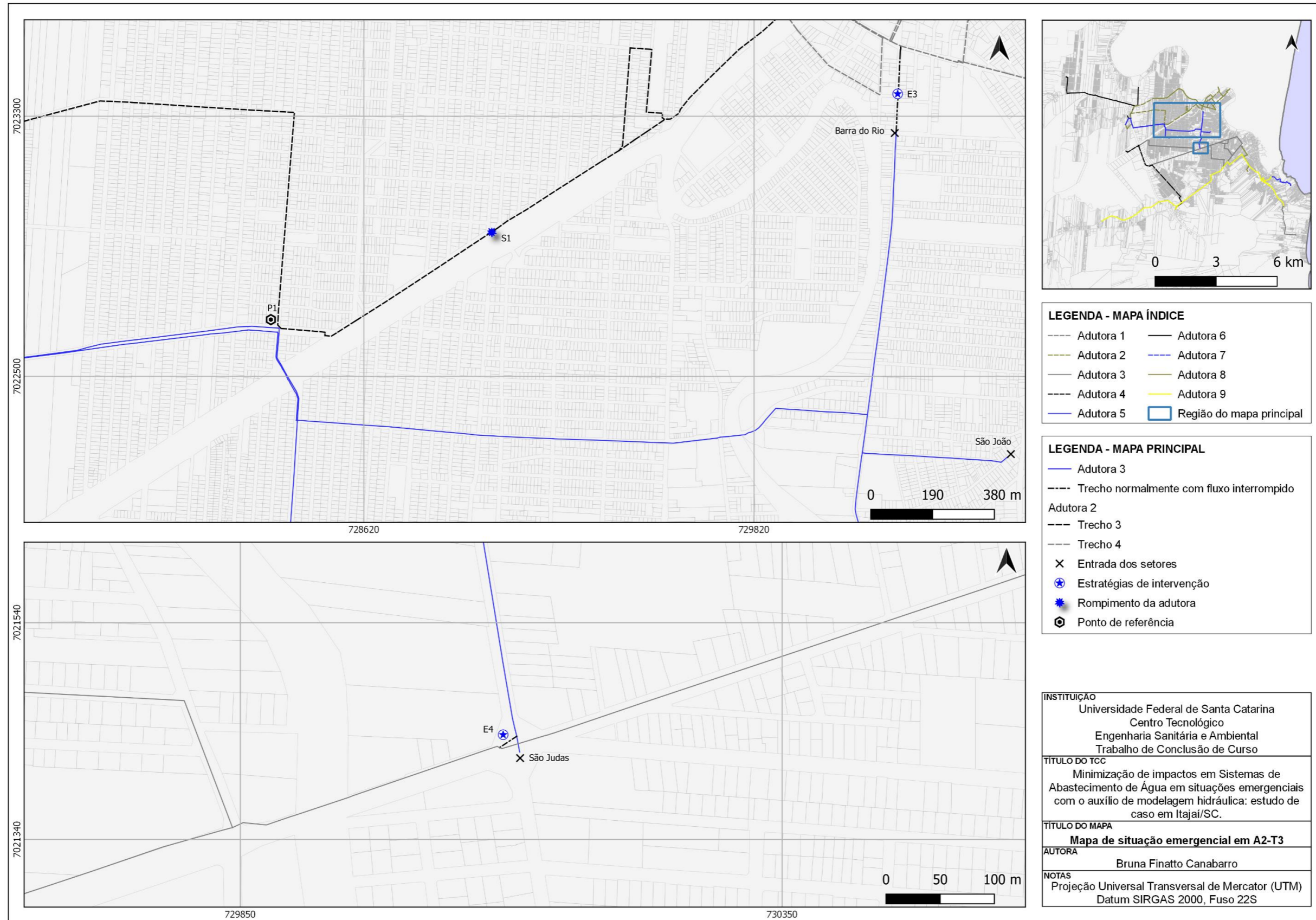
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE P – Resultados da simulação onde foram propostas estratégias E3 e E4 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T2



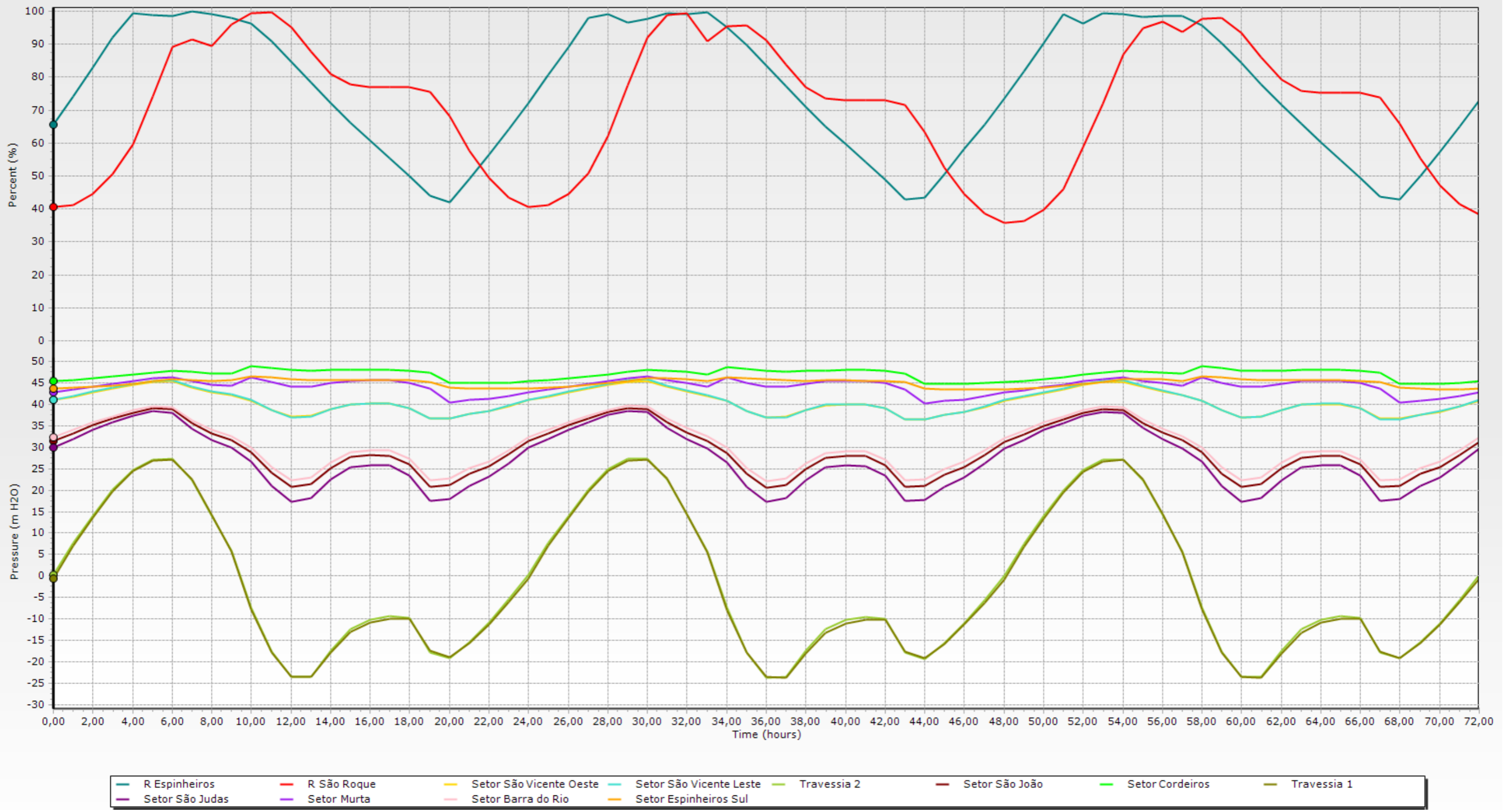
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE Q – Mapa da situação emergencial na A2-T3 e proposição de estratégias 03 e 04 para minimização dos impactos



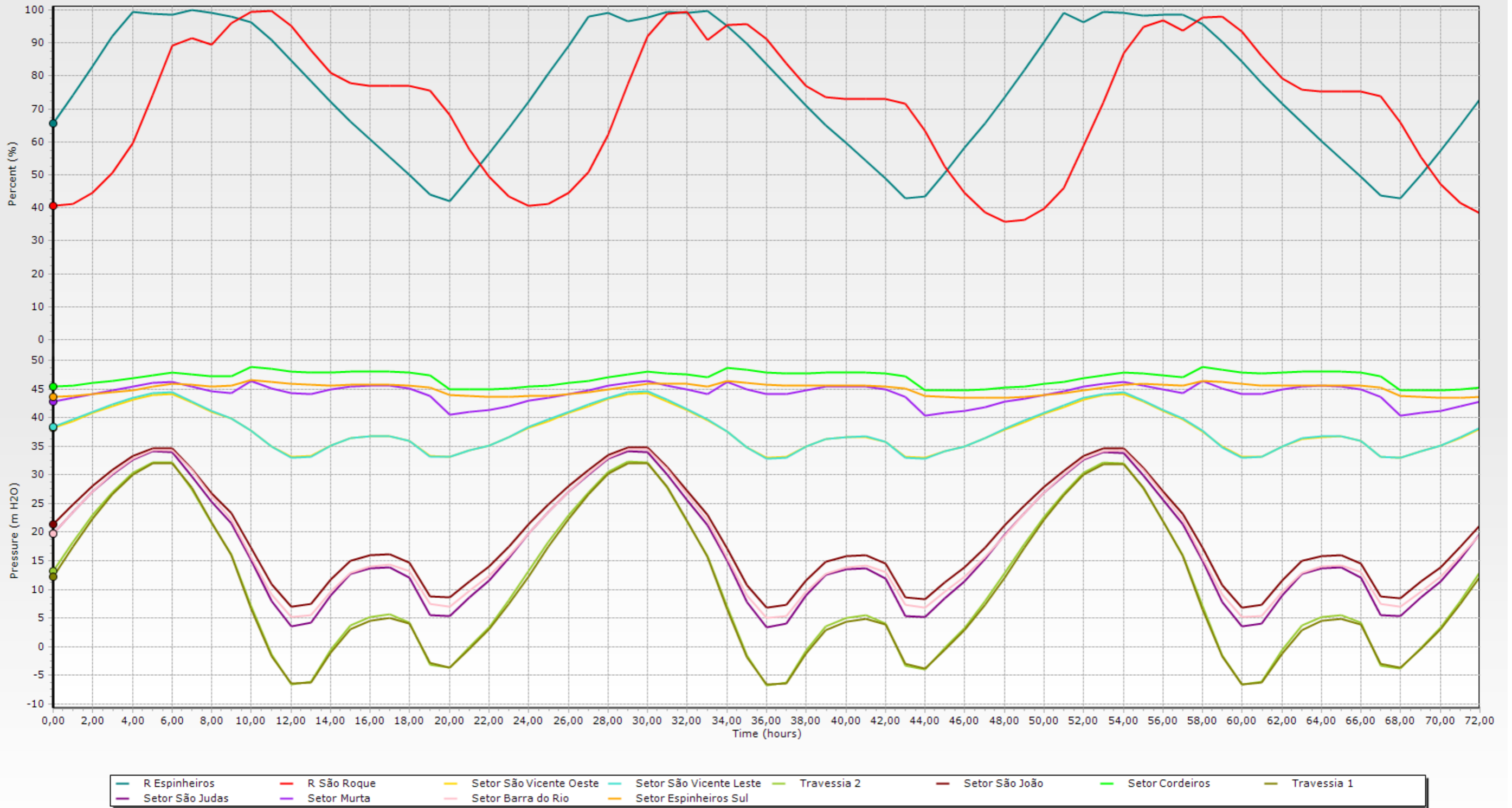
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE R – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T3



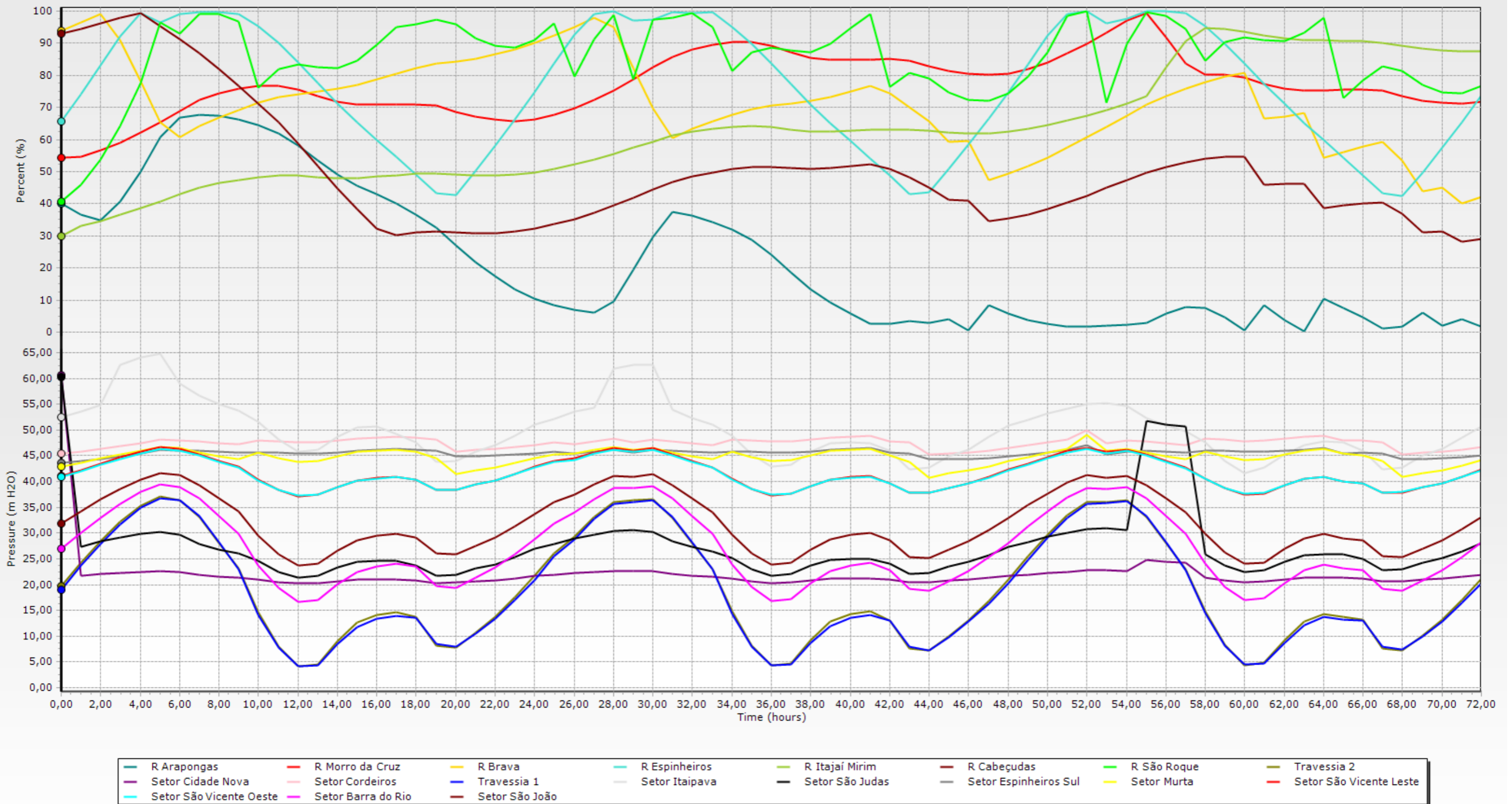
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE S – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E3 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T3



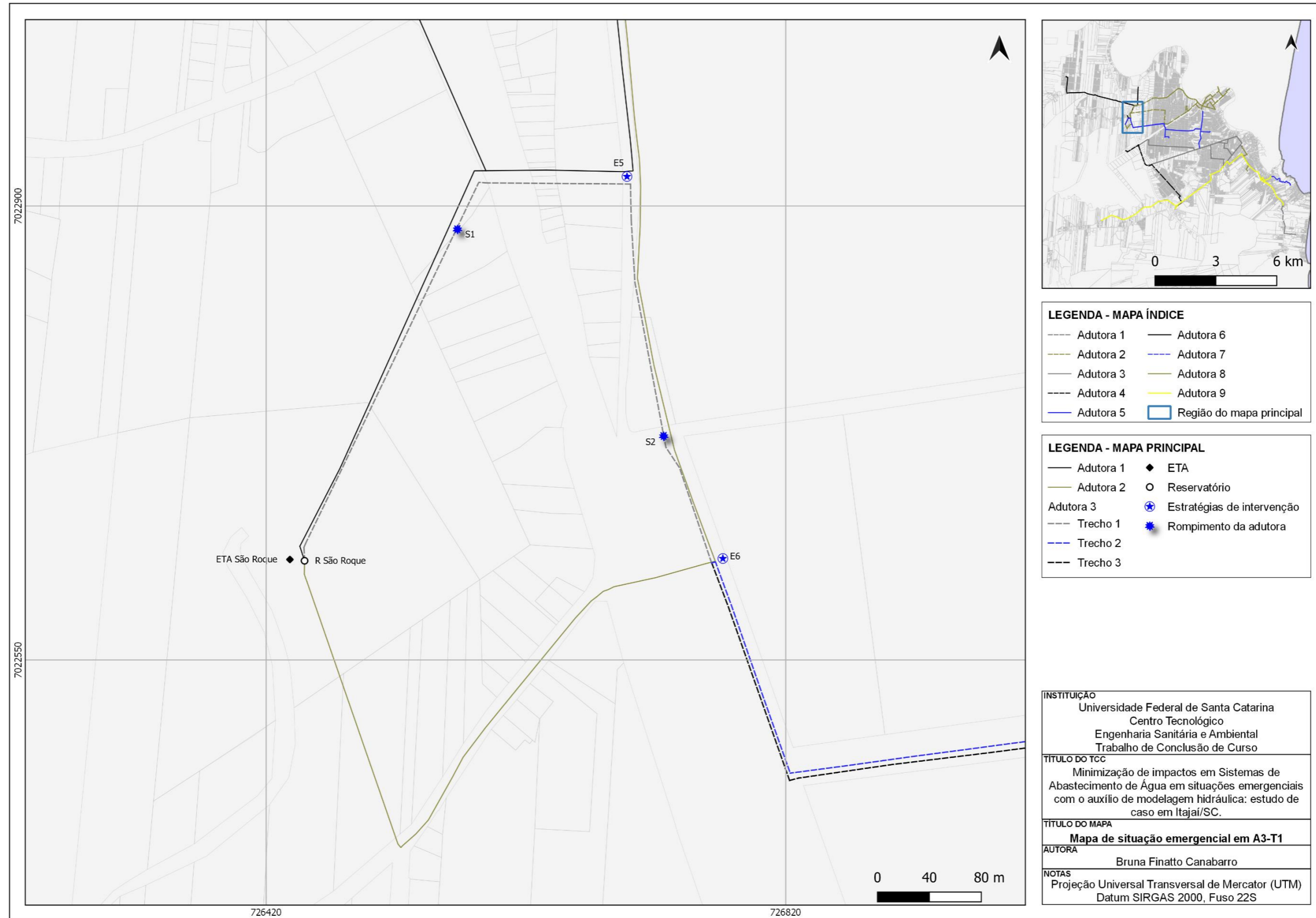
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE T – Resultados da simulação onde foram propostas estratégias E3 e E4 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A2-T3



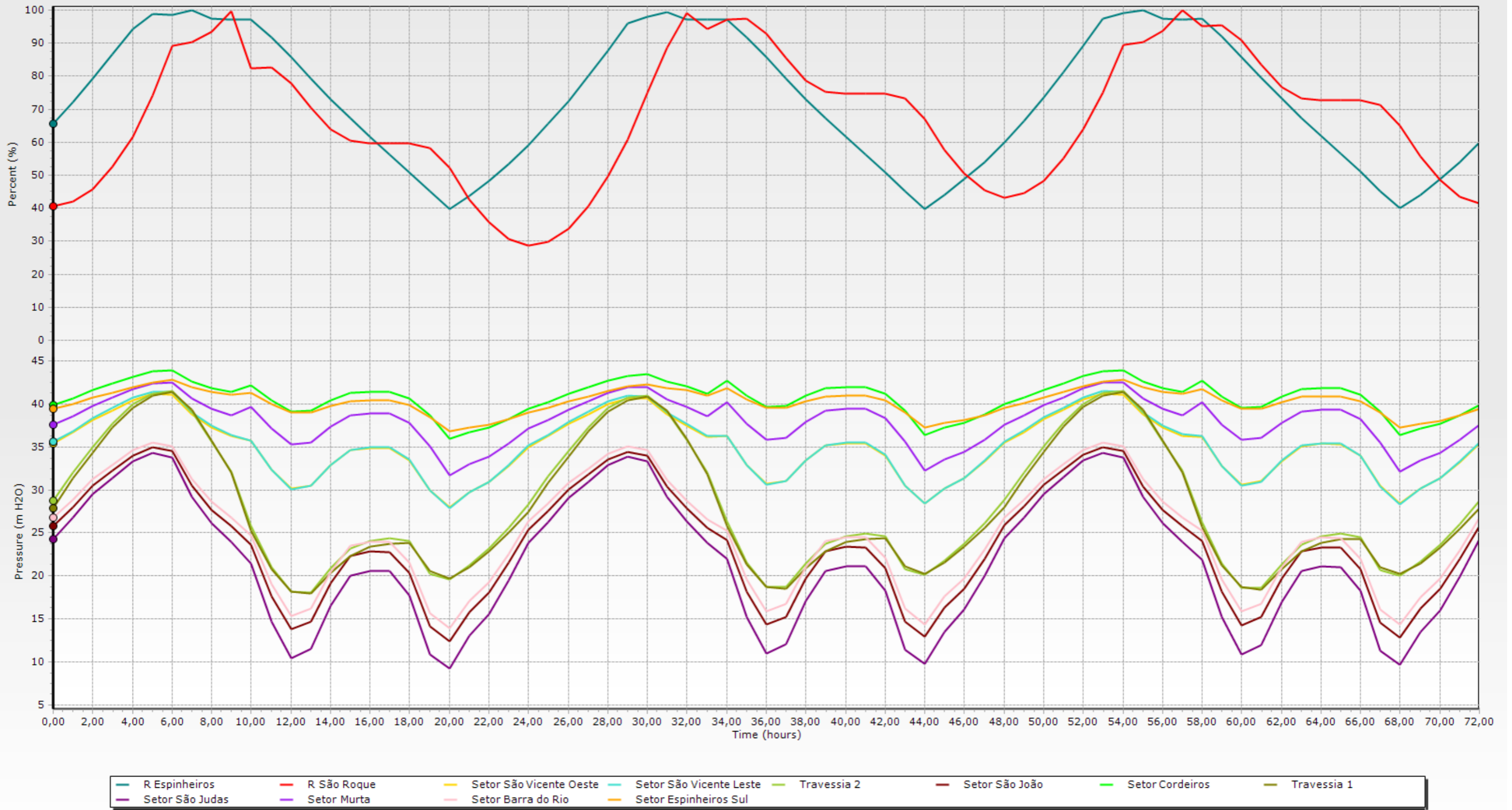
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE U – Mapa das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T1 e proposição de estratégias 05 e 06 para minimização dos impactos



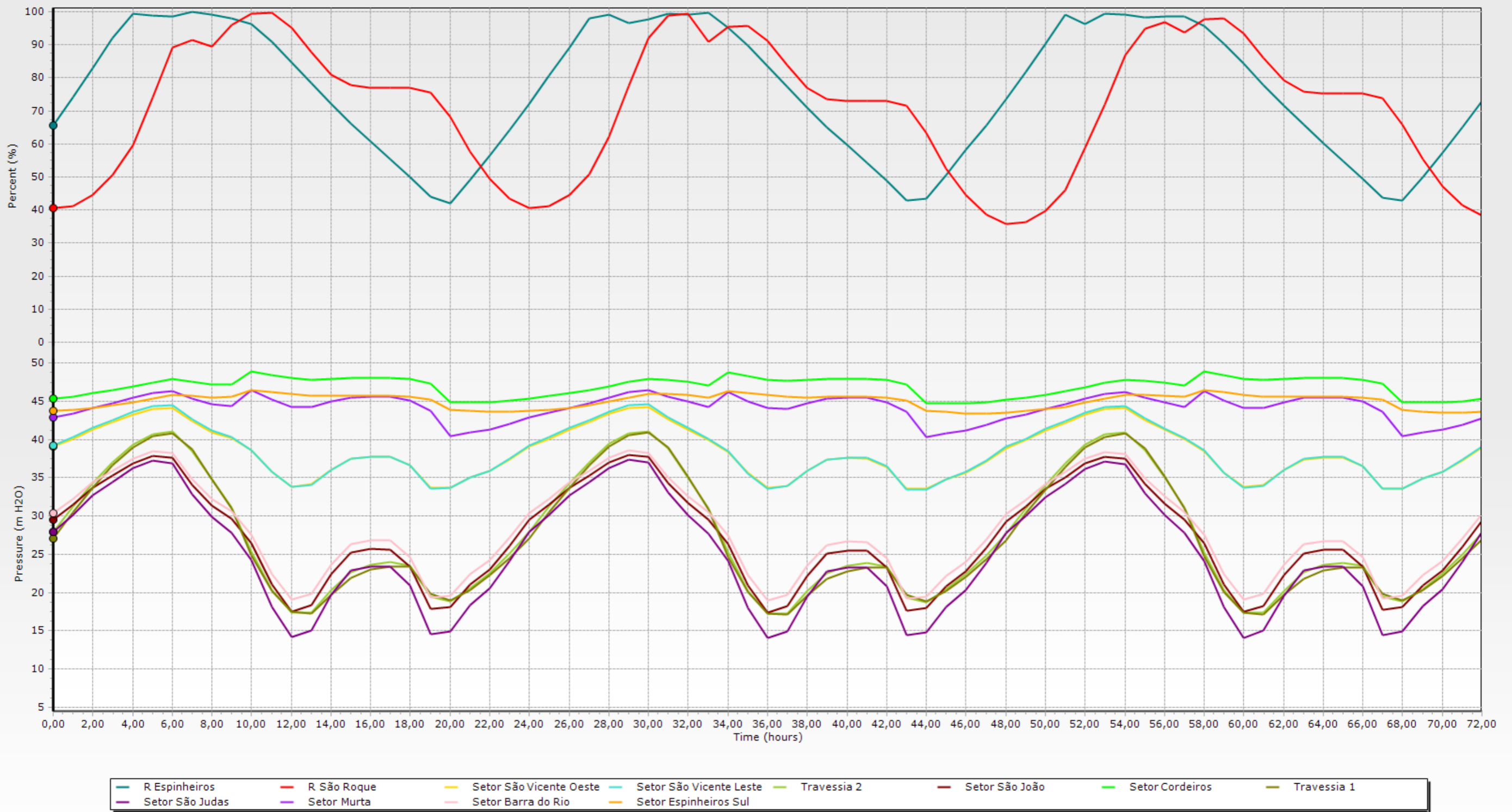
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE V – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E5 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T1



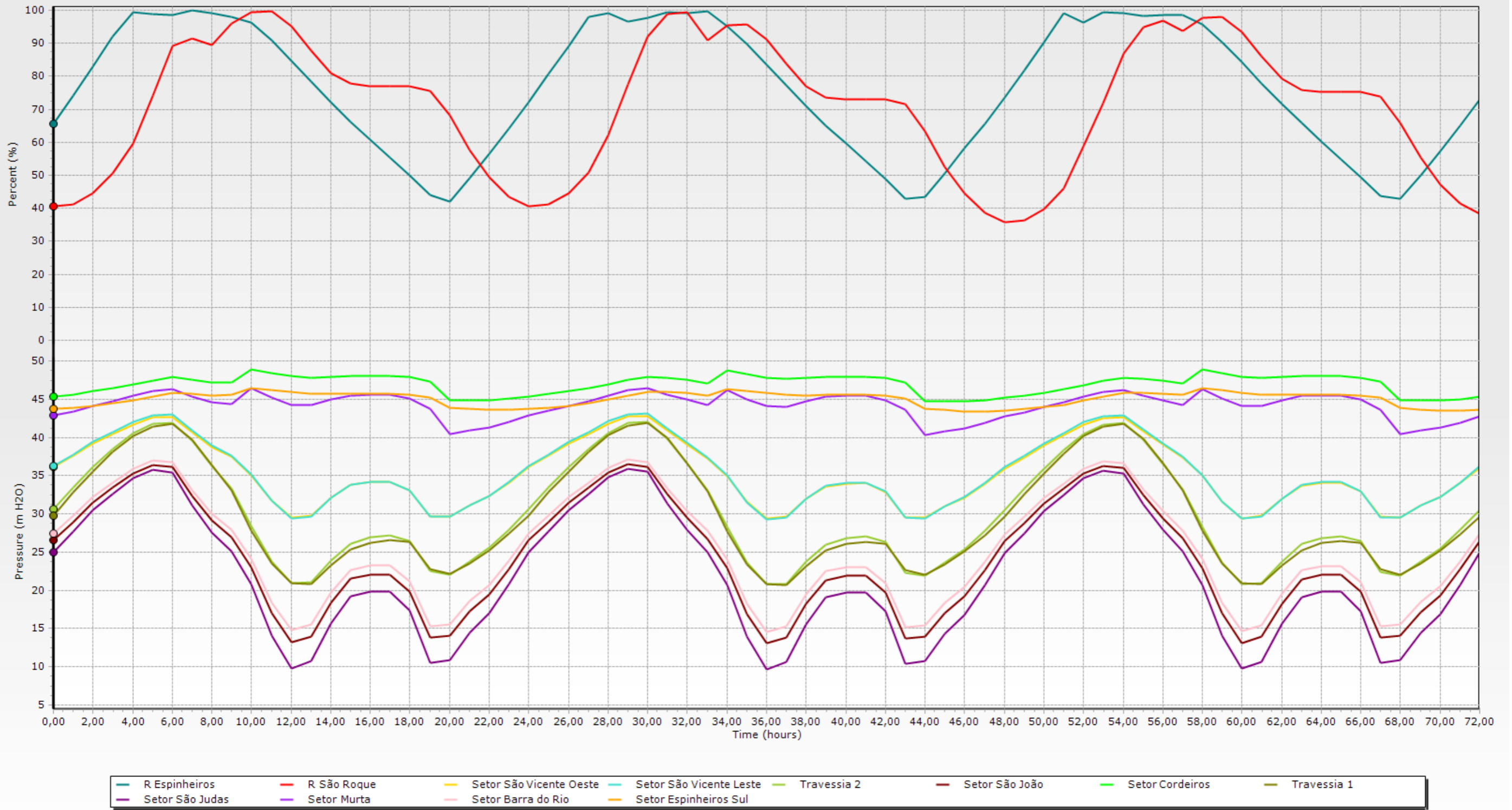
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE W – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E6 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 01 na A3-T1



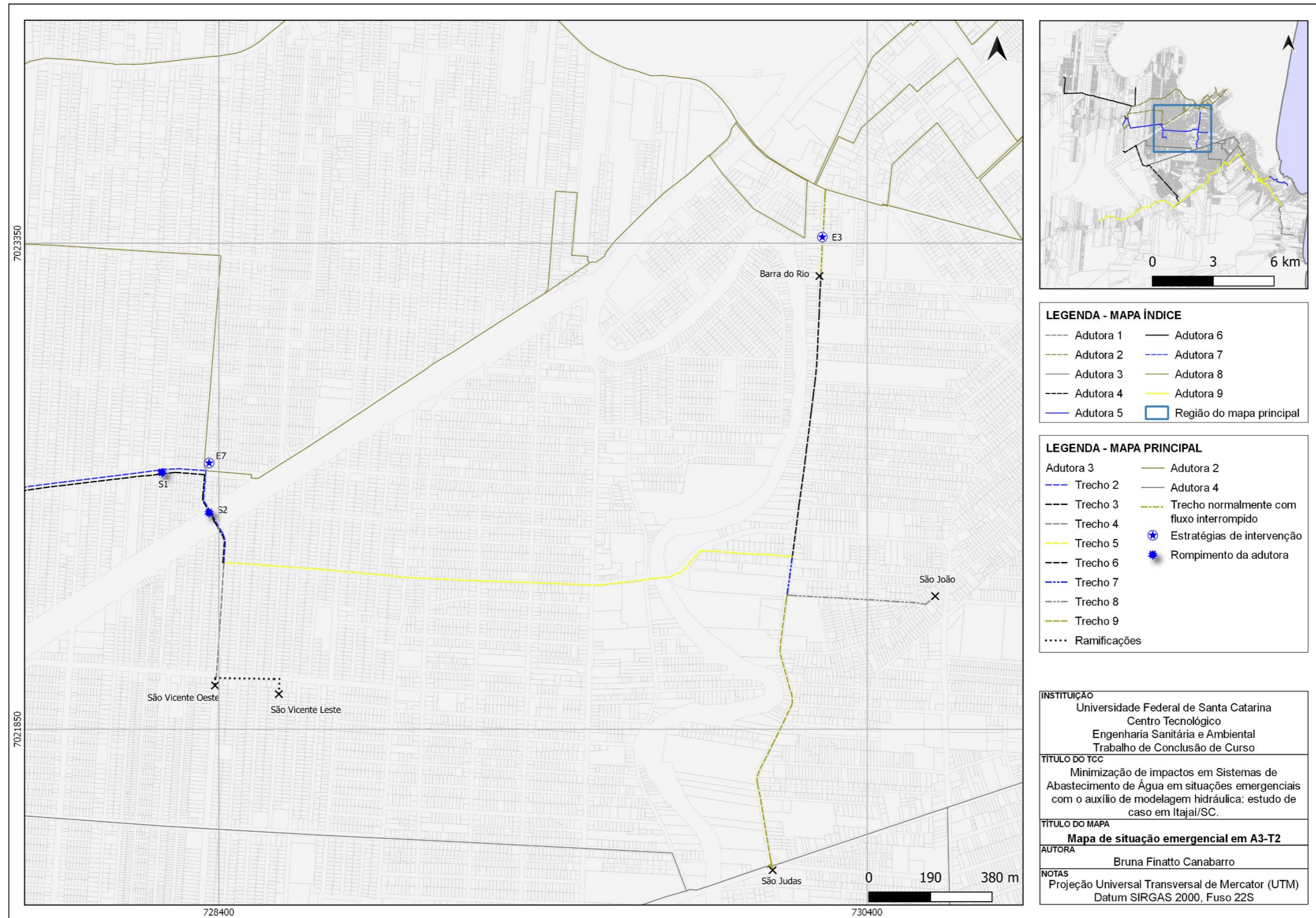
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE X – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E6 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A3-T1



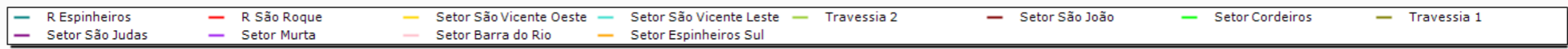
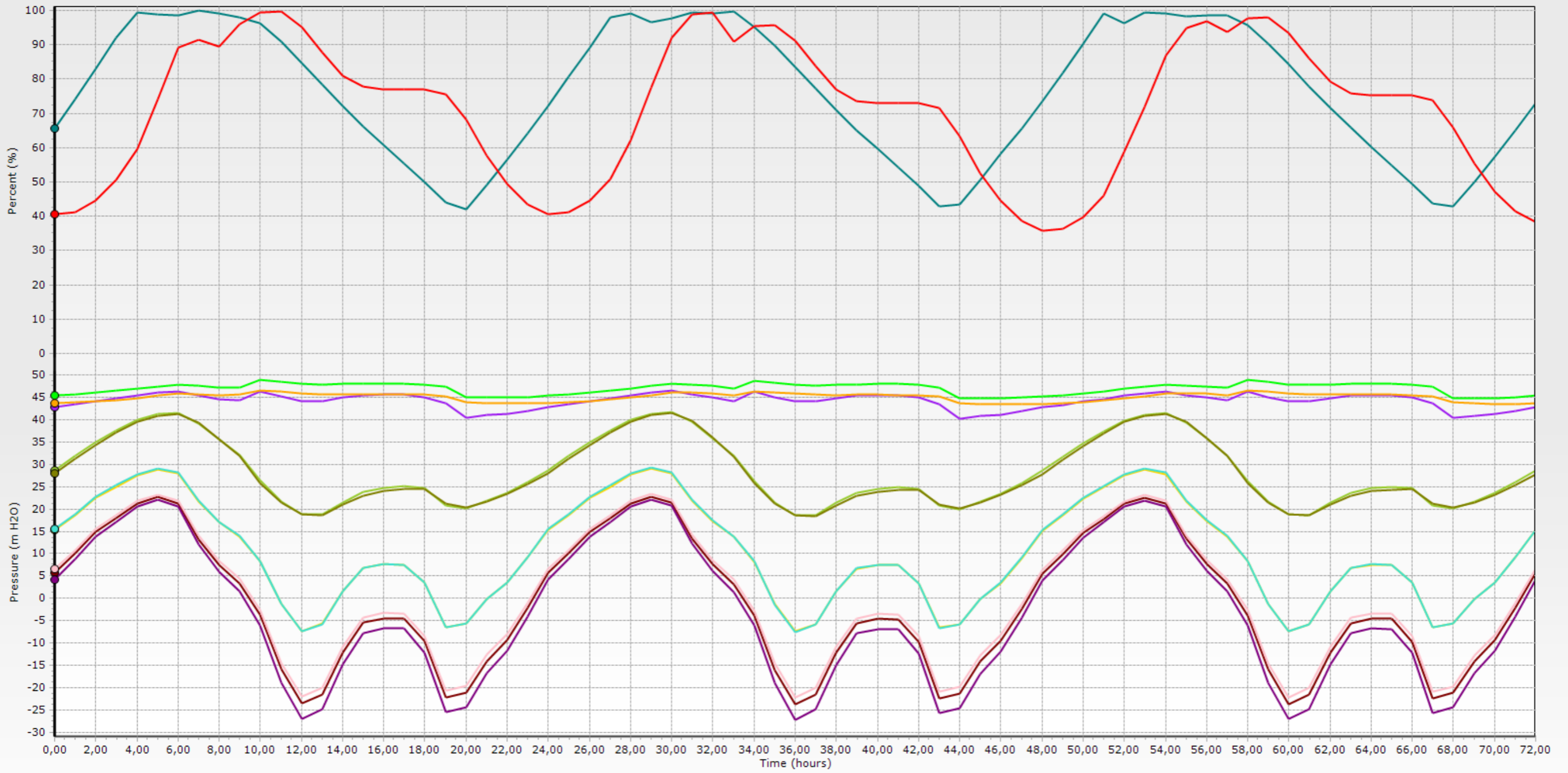
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE Y – Mapa das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T2 e proposição das estratégias 03 e 07 para minimização dos impactos (Figura 18)



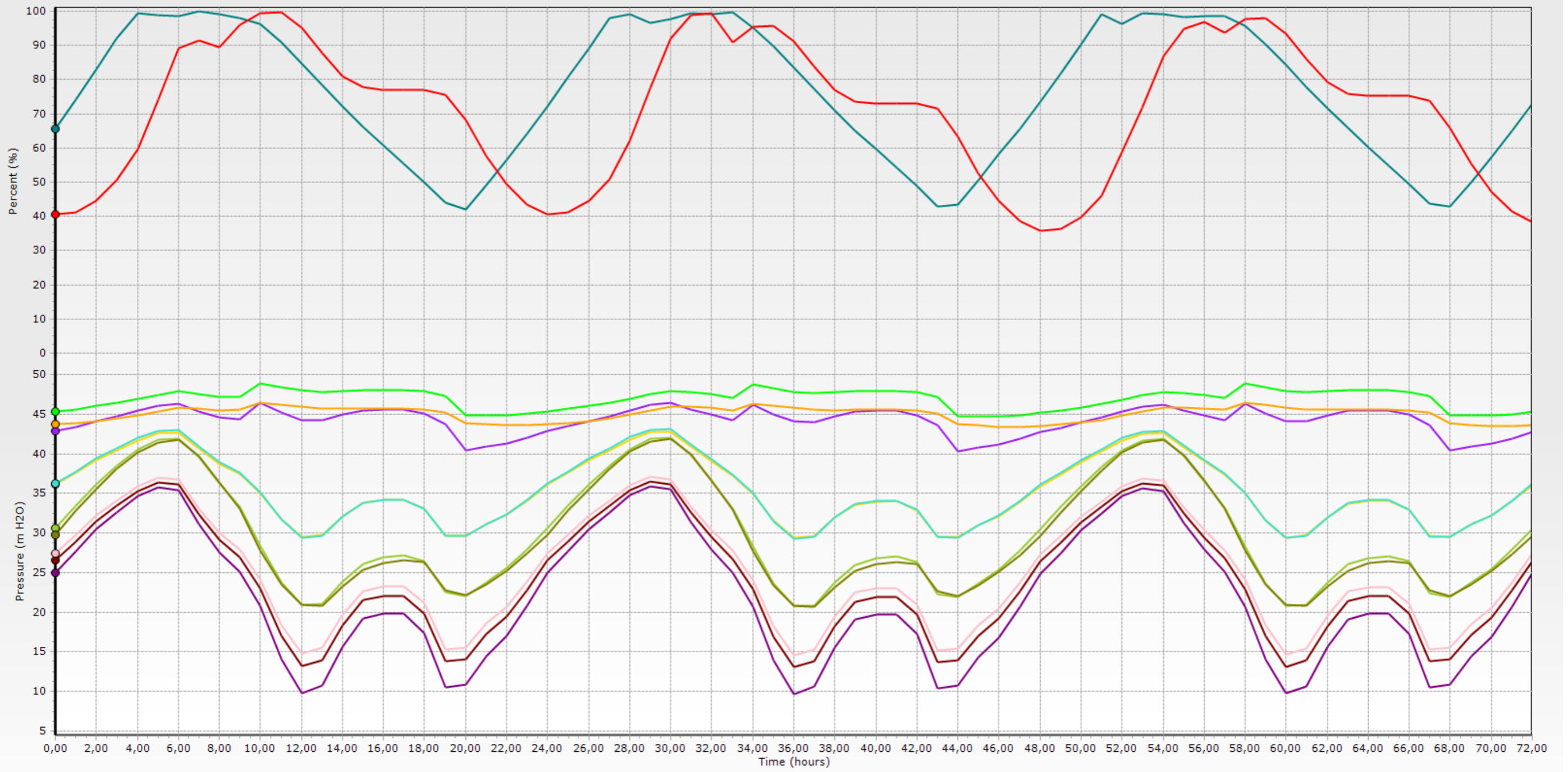
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE Z – Resultados da simulação sem estratégia para minimização dos impactos decorrentes das situações emergenciais 01 e 02 na A3-T2 (Figura 19)



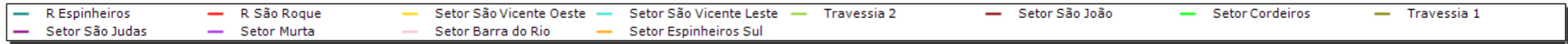
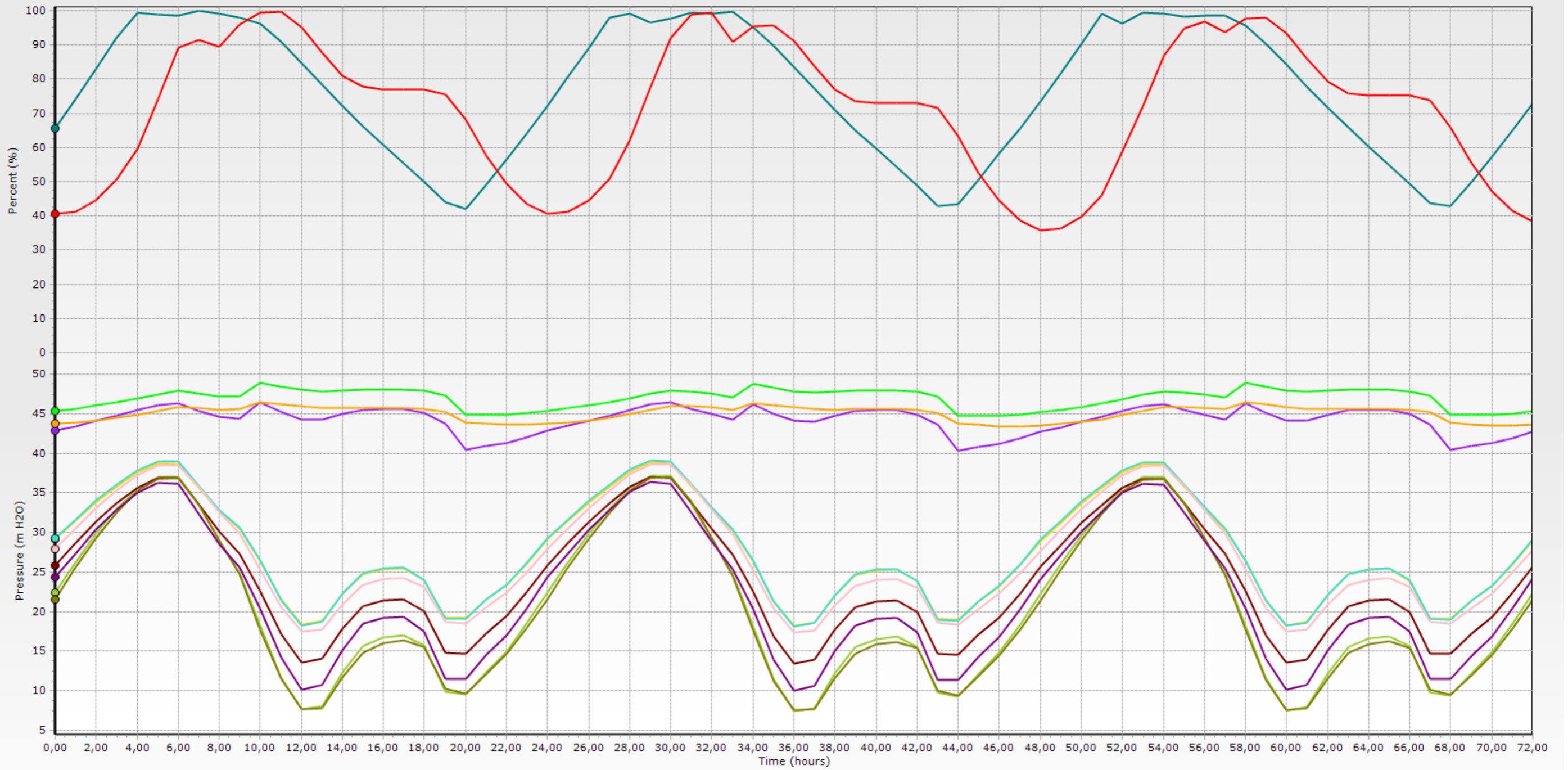
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE AA – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E7 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A3-T2



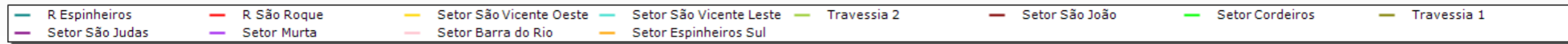
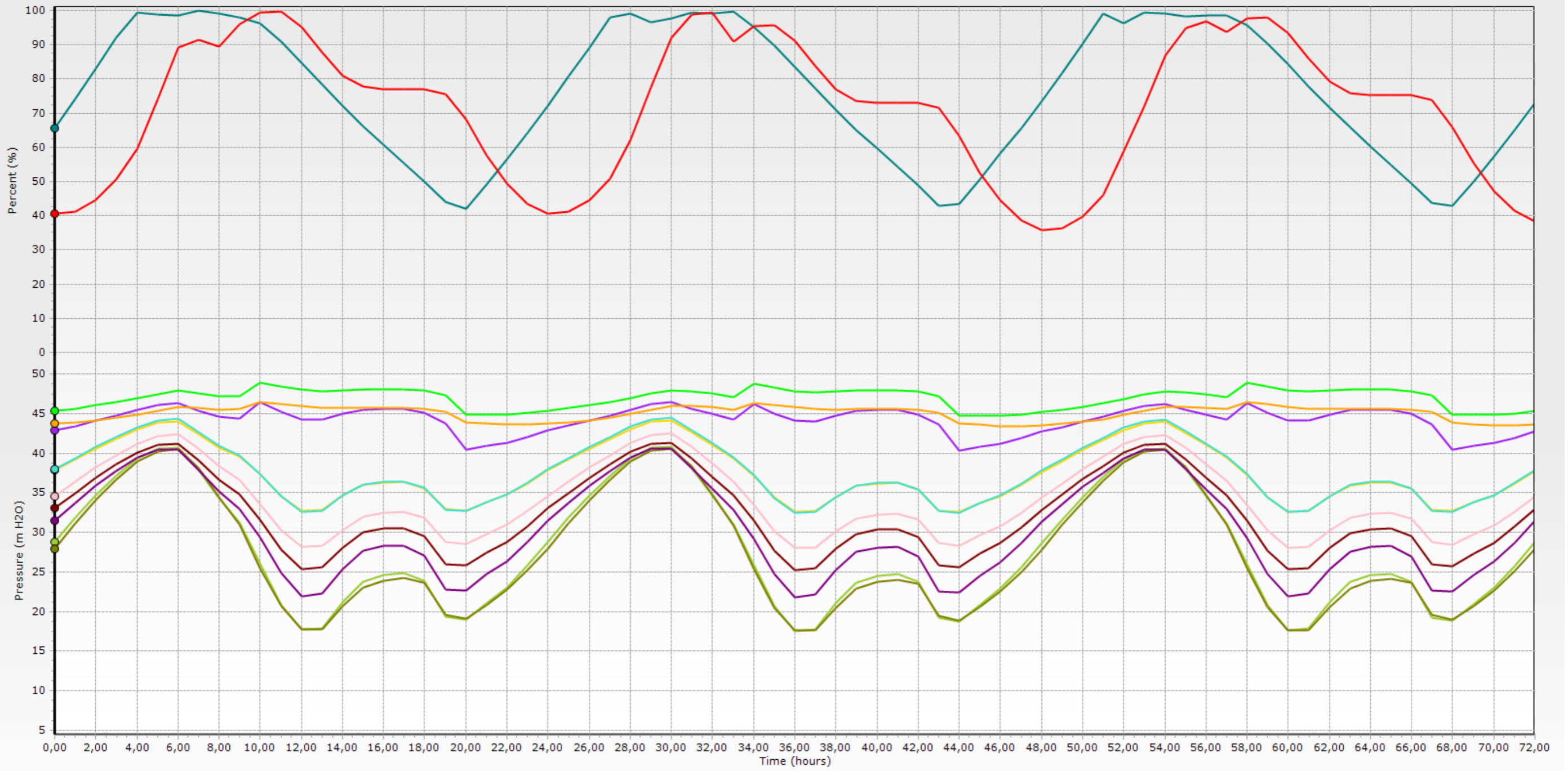
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE BB – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E3 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A3-T2



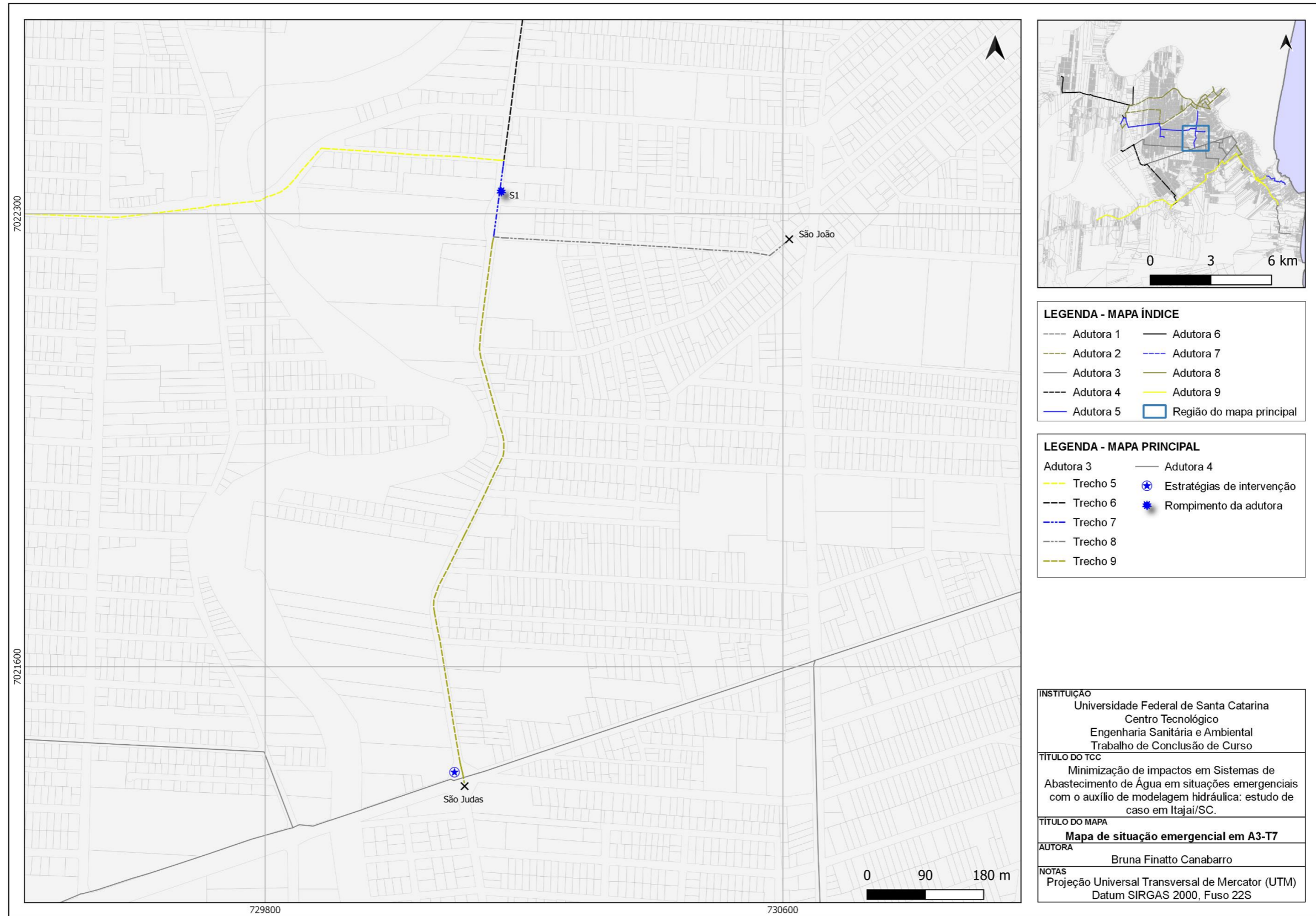
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE CC – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E8 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 02 na A3-T2



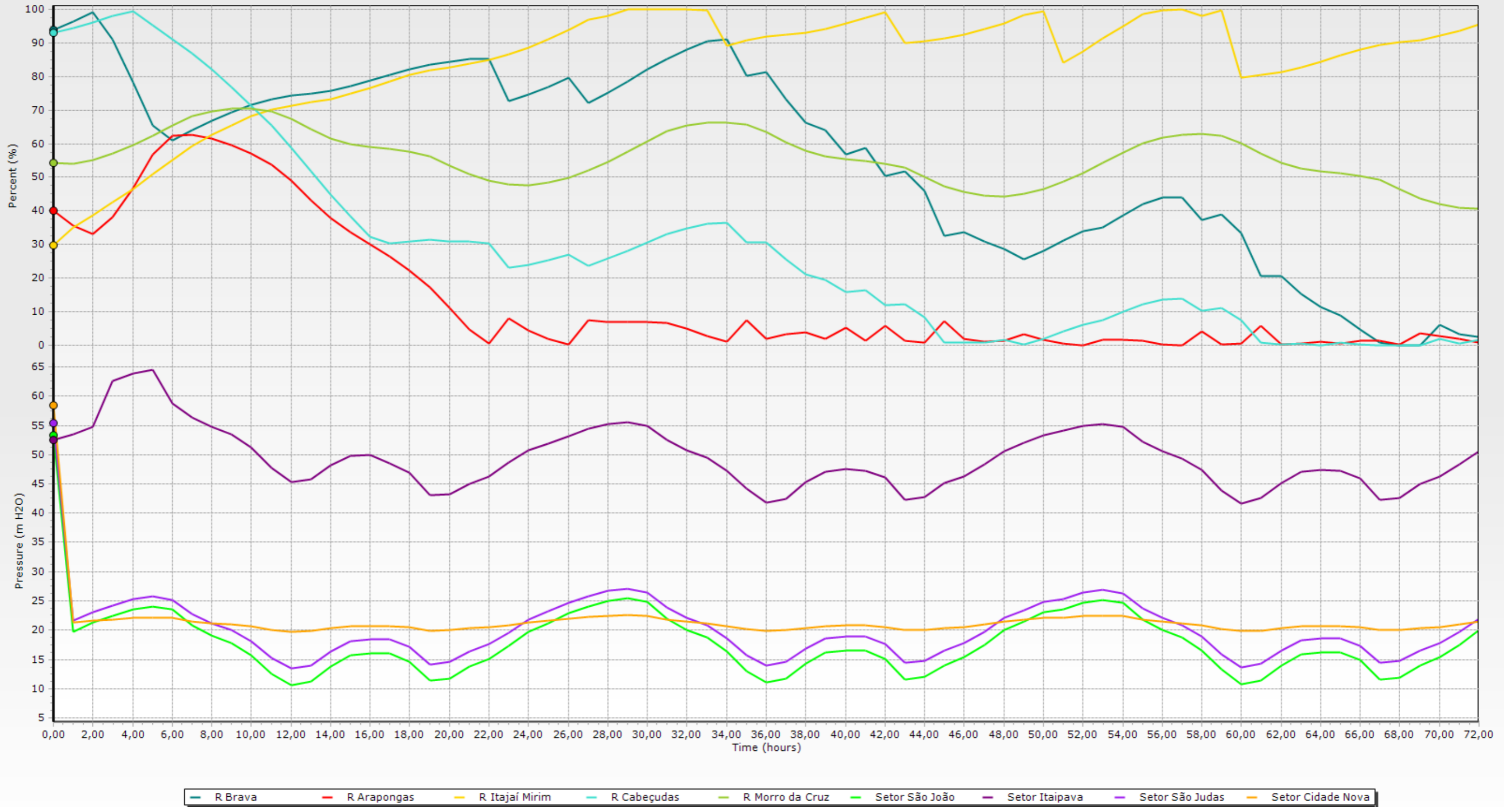
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE DD – Mapa da situação emergencial na A3-T7 e proposição de estratégia 04 para minimização dos impactos



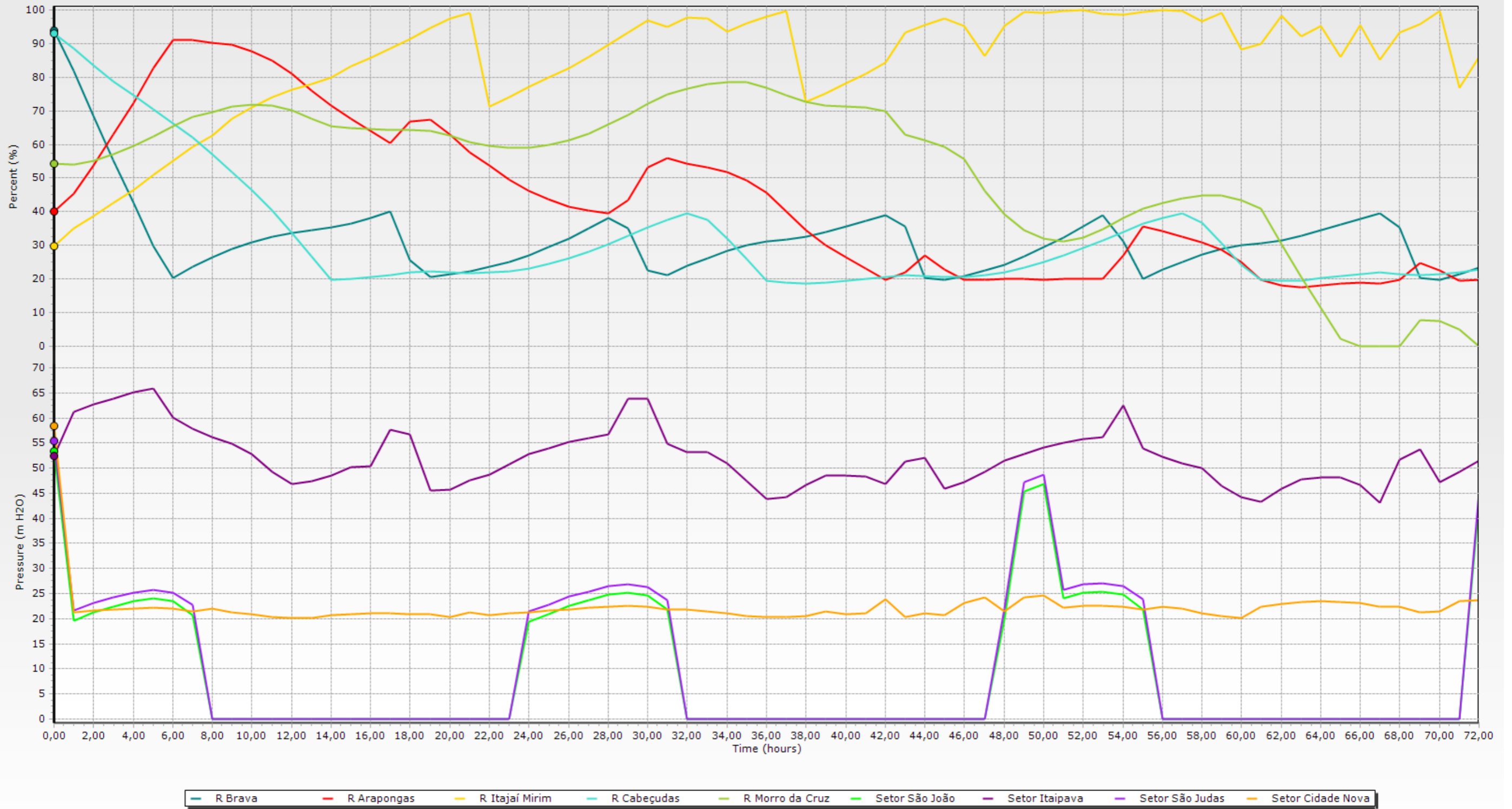
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE EE – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E4 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T7 – sem ajustes de controle



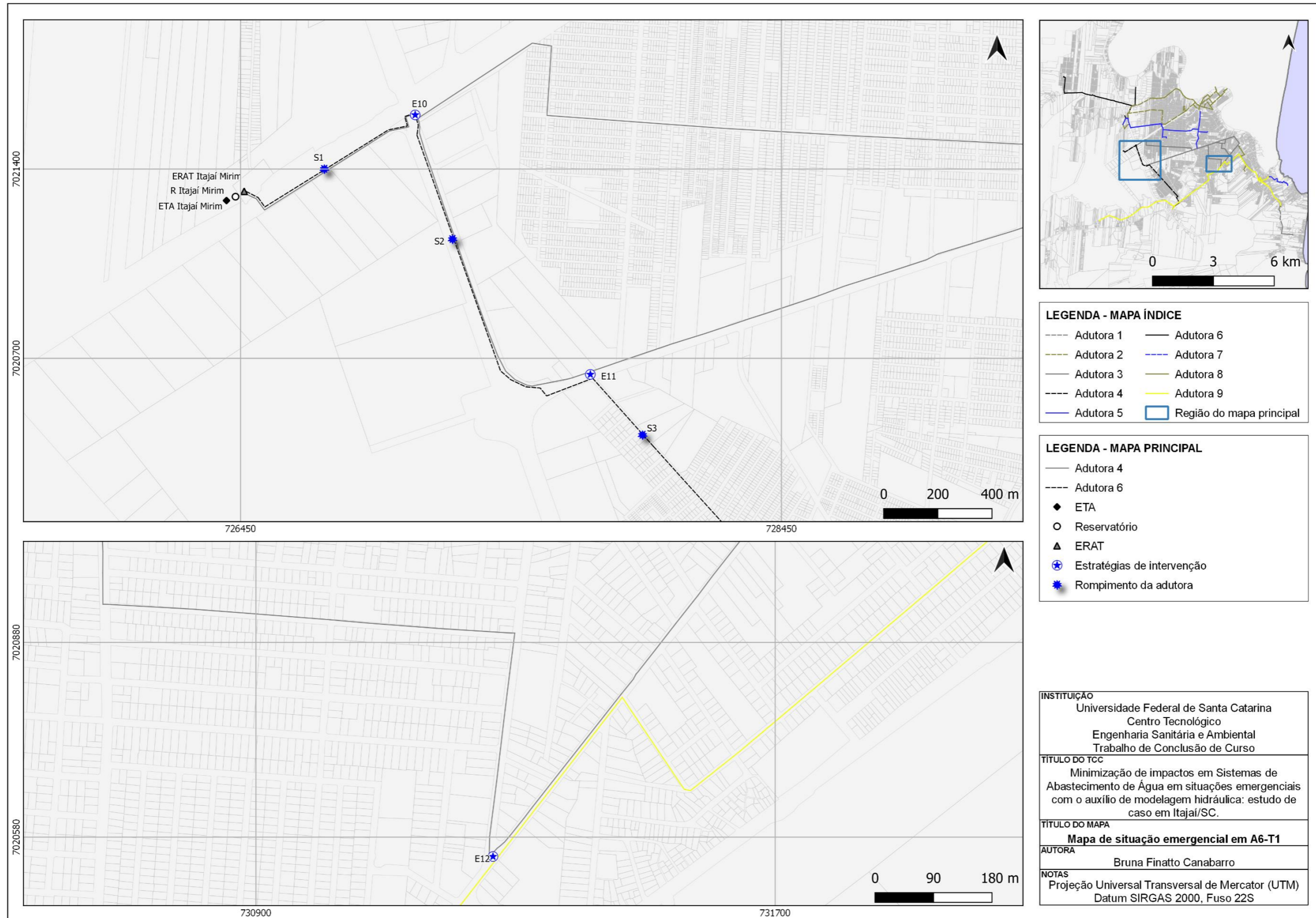
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE FF – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E4 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial na A3-T7 – com ajustes de controle



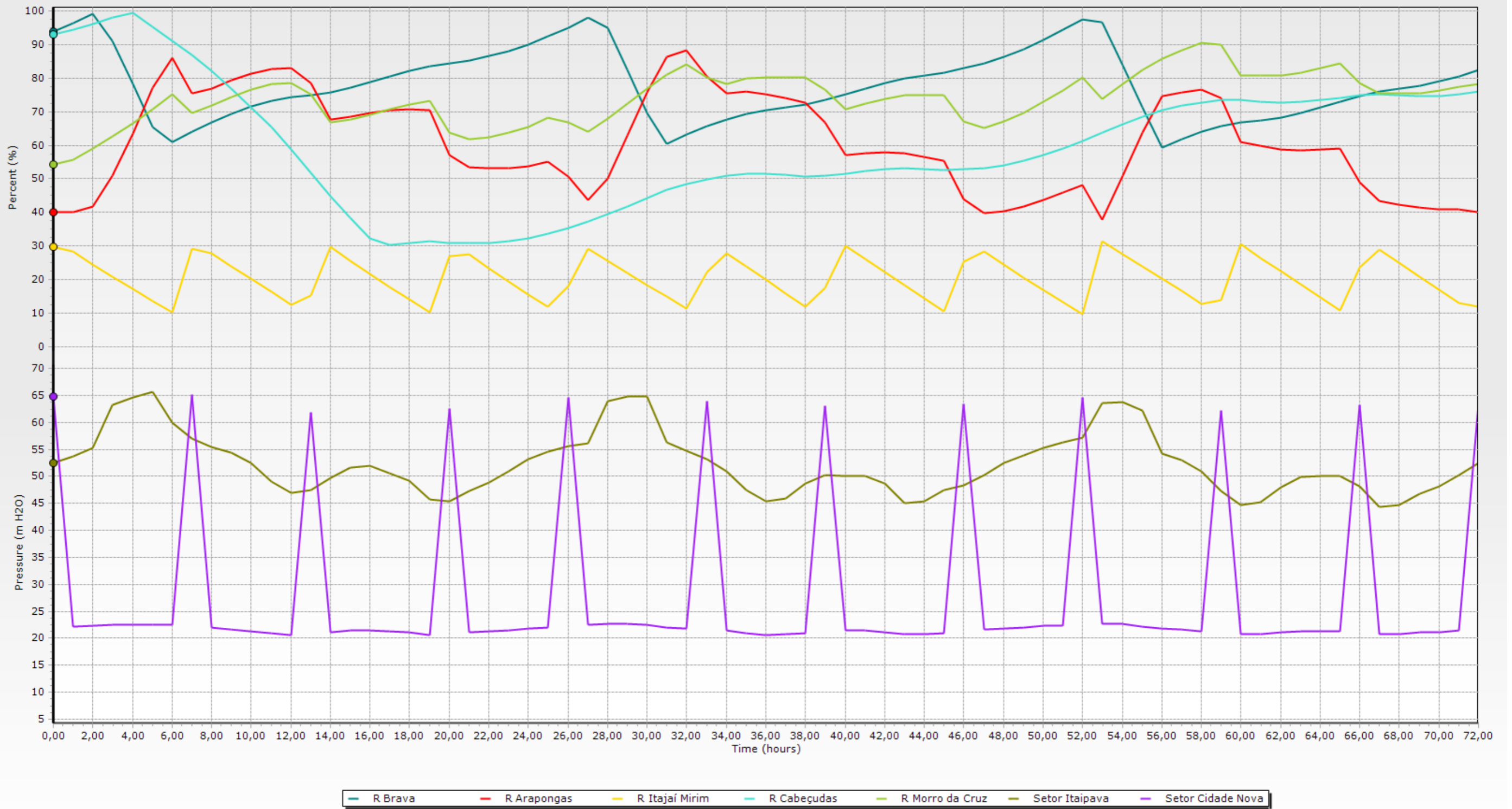
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE GG – Mapa das situações emergenciais 1, 2 e 3 na A6-T1 e proposição das estratégias 10, 11 e 12 para minimização dos impactos (Figura 26)



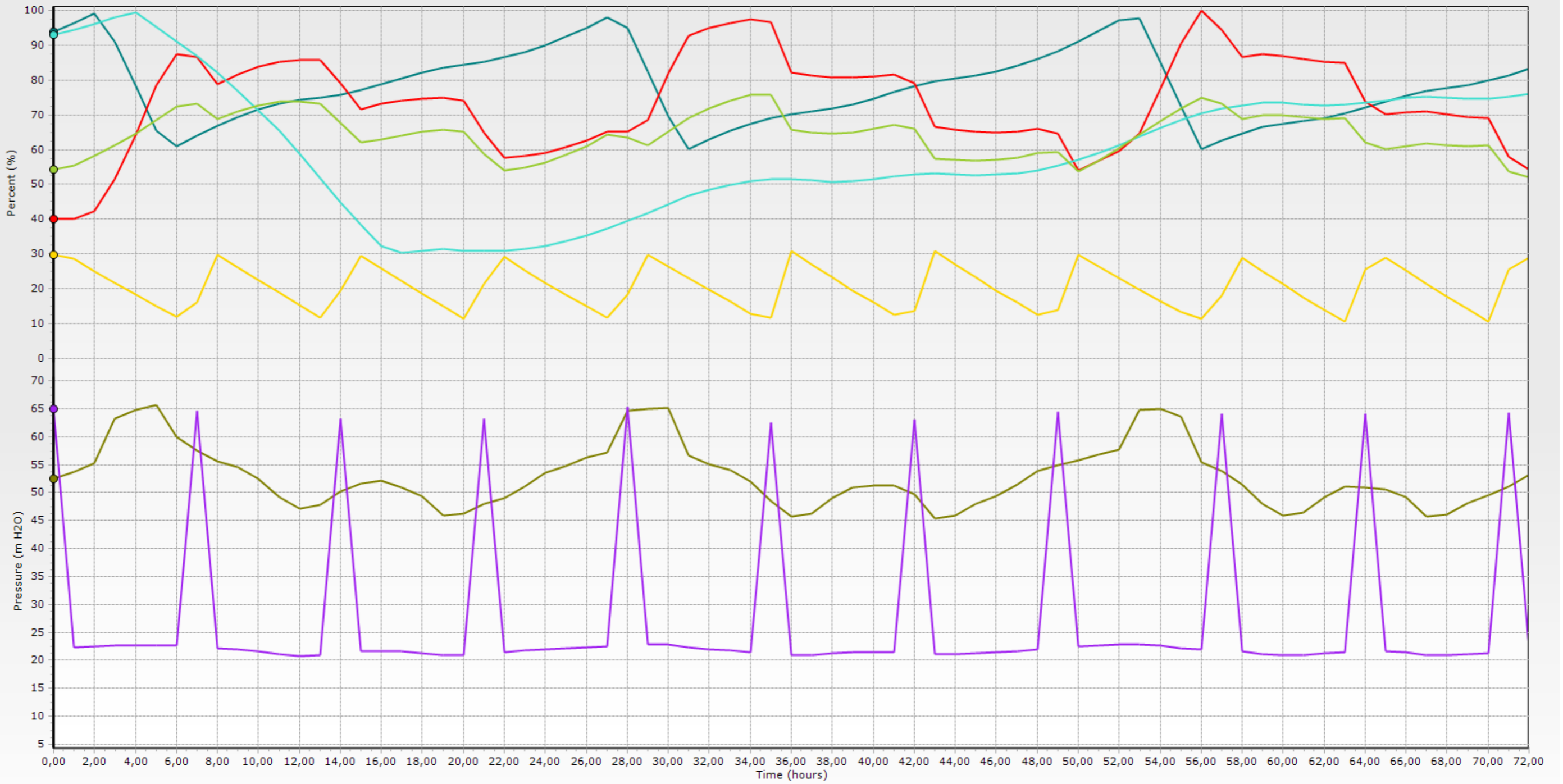
Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE HH – Resultados da simulação onde foi proposta estratégia E10 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 1 na A6-T1



Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE II – Resultados da simulação onde foram propostas estratégias E10 e E11 para minimização dos impactos decorrentes da situação emergencial 2 na A6-T1



R Brava R Arapongas R Itajaí Mirim R Cabeçadas R Morro da Cruz Setor Itaipava Setor Cidade Nova

Fonte: Autoria própria (2021)