

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

Thomaz Felipe de Freitas Anchieta

**OPERAÇÃO ÓTIMA DE SETORES DINÂMICOS VISANDO MÁXIMO  
DESEMPENHO HIDRÁULICO E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Belo Horizonte  
2026

Thomaz Felipe de Freitas Anchieta

**OPERAÇÃO ÓTIMA DE SETORES DINÂMICOS VISANDO MÁXIMO  
DESEMPENHO HIDRÁULICO E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

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

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos.

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica.

Orientador: Bruno Melo Brentan.

Coorientadora: Dídia Isabel Cameira Covas.

Belo Horizonte  
2026

<p>A539o</p>	<p>Anchieta, Thomaz Felipe de Freitas.          Operação ótima de setores dinâmicos visando máximo desempenho hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição de água [recurso eletrônico] / Thomaz Felipe de Freitas Anchieta. – 2026.          1 recurso online (173 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Bruno Melo Brentan.          Coorientadora: Dídia Isabel Cameira Covas.</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Recursos hídricos – Desenvolvimento – Teses. 3. Água – Distribuição – Teses. 4. Água – Controle de qualidade – Teses. I. Brentan, Bruno Melo. II. Covas, Dídia Isabel Cameira. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
--------------	--



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

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Operação Ótima de Setores Dinâmicos visando Máximo Desempenho Hidráulico e de Qualidade da Água em Redes de Distribuição de Água

**THOMAZ FELIPE DE FREITAS ANCHIETA**

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. BRUNO MELO BRENTAN - Orientador

Profa. DÍDIA ISABEL CAMEIRA COVAS - Coorientadora

Profa. HELENA MARGARIDA MACHADO DA SILVA RAMOS

Profa. LUBIENSKA CRISTINA LUCAS JAQUIÊ RIBEIRO

Prof. CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES

Prof. EDEVAR LUVIZOTTO JUNIOR

Versão Final aprovada por:

Coordenação do PPG-SMARH

BRUNO MELO BRENTAN (Orientador)

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Cristovao Vicente Scapulatempo Fernandes, Usuário Externo**, em 27/02/2026, às 15:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dídia Isabel Cameira Covas, Usuária Externa**, em 27/02/2026, às 19:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edevar Luvizotto Junior, Usuário Externo**, em 02/03/2026, às 13:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro, Usuário Externo**, em 02/03/2026, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Helena Margarida Machado da Silva Ramos, Usúria Externa**, em 05/03/2026, às 13:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Melo Brentan, Professor do Magistério Superior**, em 05/03/2026, às 23:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 11/03/2026, às 12:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4959172** e o código CRC **9CD798AA**.

---

*Dedico este trabalho aos meus maiores  
incentivadores: meus pais, Carlos Antonio  
Goulart de Anchieta (in memoriam) e  
Osmeia Maria de Freitas, e meus queridos  
orientadores, Bruno Melo Brentan e Dídya  
Isabel Cameira Covas.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me iluminar pelos caminhos da vida, me dando saúde, sabedoria, coragem e resiliência, em meio a tantos desafios.

Ao meu orientador, Bruno Melo Brentan, pela amizade, parceria e confiança ao longo desses seis anos de jornada acadêmica juntos, e pelas valiosas ideias que conduziram a elaboração deste trabalho.

À minha coorientadora, Dídya Isabel Cameira Covas, por todas as correções e sugestões que moldaram este trabalho, e por ter me dado a oportunidade de vivenciar o dia a dia de um jovem pesquisador no Instituto Superior Técnico (IST), em Lisboa.

Aos meus professores e colegas da HydroUAI, do IST, da Universidad de Guanajuato e da Newcastle University, pelo apoio, parceria em publicações de artigo e incríveis discussões técnicas.

À minha família, pelas orações e por sonharem comigo todos os meus sonhos.

À minha namorada, Bruna Araújo dos Santos, pelo carinho, companheirismo e por permanecer.

A todos os meus amigos que sempre torceram por mim e, em especial, ao Rogério de Oliveira Batista, pela amizade e companheirismo ao longo destes anos de Belo Horizonte.

Ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

*Uma vida e um sonho*

*Viver é sonhar*

*Sonhar é acreditar*

*Acreditar é buscar*

*Buscar é escolher*

*Escolher é ganhar e perder*

*Mas perder também é aprender*

*E aprender é crescer*

*Crescer é não desistir*

*Não desistir é perseverar*

*E, muitas vezes, perseverar é partir*

*Mas partir é também chegar*

*Chegar é realizar*

*Realizar é viver*

*E viver é sonhar...*

## RESUMO

A divisão das Redes de Distribuição de Água (RDA) em setores, conhecida por setorização, permite efetuar uma melhor gestão das pressões de operação, a avaliação e controle de vazamentos, a redução da idade da água e um menor decaimento do cloro residual. O desenho e estabelecimento dos setores é caracterizado basicamente por duas etapas principais: o particionamento topológico do sistema e a alocação de dispositivos de controle (i.e., válvulas e medidores de vazão). No entanto, a melhora no gerenciamento de redes de abastecimento, muitas vezes, somente é possível pela alocação e operação ótimas destes dispositivos nas tubulações. Além disso, trabalhos na literatura relatam que a resiliência hidráulica e a qualidade da água em RDA com setores estáticos podem ser reduzidas, devido ao aumento dos percursos da água nas tubulações. Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma nova metodologia para a criação e operação ótima de setores dinâmicos para formar e assegurar um abastecimento de água mais seguro e de maior qualidade para os consumidores. Estes setores dinâmicos correspondem a diferentes configurações de válvulas ao longo do dia para que as pressões possam ser mais controladas durante os períodos de menor demanda e a idade da água possa ser reduzida em horários de maior consumo. Para a elaboração do trabalho foram desenvolvidos algoritmos híbridos, formados pelos algoritmos de detecção de comunidades, já consagrados na literatura, *Fast-Greedy*, *Louvain* e *Leiden*, e pelo algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO). Os algoritmos híbridos foram implementados em linguagem de programação Python e Matlab. Como estudos de caso foram consideradas as redes de referência Modena e KL adaptada, e as setorizações foram realizadas com base em otimizações simples de objetivo único (mono-objetivo). Os parâmetros considerados nos processos de otimização foram a uniformidade de pressão, a idade média ponderada da água acima de limite estabelecido e os custos de alocação de válvulas. Os resultados obtidos foram comparados atendendo a critérios hidráulicos, de custo e de modularidade (conectividade). Os algoritmos híbridos, constituídos tanto pelo algoritmo Louvain, como pelo Leiden, quando aplicados à etapa de particionamento, geraram uma melhoria do desempenho hidráulico, ou seja, RDA setorizadas com menores pressões e idade da água. O algoritmo híbrido Leiden-PSO gerou mais cenários de RDA setorizadas com maior redução de vazamentos. A comparação dos resultados entre setorizações estática e dinâmica mostrou que reduções muito maiores de pressões, de idade da água, de vazamentos e de consumo de energia para a setorização dinâmica, evidenciam a importância deste modelo de setorização na qualidade do abastecimento de água ao consumidor.

Palavras-chave: algoritmos híbridos; otimização; redes de distribuição de água; setorização dinâmica; teoria de grafos.

## ABSTRACT

The division of Water Distribution Networks (WDNs) in District Metered Areas (DMAs) allows a better management of pressures, a reduction of leakage and a reduction of the water age. The creation and design of DMAs is composed of two main stages: topological partitioning of the system and the allocation of control devices (valves and flow meters). However, improvements in the management of water supply networks are often only achievable through the optimal allocation and operation of these devices within the pipelines. In addition, studies reported in the literature indicate that the hydraulic resilience and water quality of WDNs with static DMAs may be reduced due to the increase in water travel paths within the pipelines. In view of this context, the present work proposes the creation and optimal operation of dynamic DMAs, aiming to develop a safer and higher-quality water supply for consumers. In this sense, this study proposes the implementation of different DMAs configurations throughout the day so that pressures can be better controlled during low-demand periods and water age can be reduced during peak consumption hours. To carry out this work, hybrid algorithms were developed by combining community detection algorithms, well established in the literature - Fast-Greedy, Louvain, and Leiden - with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The hybrid algorithms were implemented using the Python and MATLAB programming languages. As case studies, the benchmark networks Modena and adapted KL were employed, and the creation of DMAs was carried out through single-objective optimizations. The minimized hydraulic parameters were pressure uniformity, weighted average water age above a predefined limit, and valve allocation costs, while the obtained results were evaluated on hydraulic performance, cost, and modularity (connectivity) criteria. Overall, the hybrid algorithms incorporating both the Louvain and Leiden algorithms in the partitioning stage resulted in an improvement in hydraulic performance after optimal creation of DMAs, leading to WDNs with lower pressures and reduced water age. However, the Leiden-PSO hybrid algorithm generated a greater number of scenarios with higher leakage reduction after the creation of optimal DMAs. Furthermore, when comparing static and dynamic DMAs results, significantly greater reductions in pressures, water age, leakages, and energy consumption were observed for dynamic DMAs, highlighting the importance of this DMAs approach in improving the quality of water supply to consumers.

Keywords: hybrid algorithms; optimization; water distribution networks; dynamic DMAs; graphs theory.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Percentual de acesso à água potável por país em 2024.....	25
Figura 2.2 – Representação de um grafo simples.....	29
Figura 2.3 – Grafo não direcionado e não ponderado.....	30
Figura 2.4 – Grafo não direcionado e ponderado.....	30
Figura 2.5 – Grafo direcionado e não ponderado.....	30
Figura 2.6 – Grafo direcionado e ponderado.....	30
Figura 2.7 – Detecção de comunidades em grafo.....	31
Figura 3.1 – Fluxograma ilustrando o processo metodológico.....	57
Figura 3.2 – Rede benchmark Modena.....	67
Figura 3.3 – Resultados relacionados ao número de comunidades e tubulações de fronteira para grafos com arestas não direcionadas e não ponderadas.....	68
Figura 3.4 – Resultados relacionados ao número de comunidades e tubulações de fronteira para grafos com arestas não direcionadas e ponderadas pela vazão.....	69
Figura 3.5 – Resultados relacionados ao número de comunidades e tubulações de fronteira obtidos pelo algoritmo Fast-Greedy para grafos com arestas direcionadas pela vazão.....	70
Figura 3.6 – Mapas da rede de Modena com a configuração ótima de válvulas alocadas após a minimização do $CV$ : (a) FGP-PSO e (b) LOUP-PSO).....	75
Figura 3.7 – Análise de frequência das tubulações com (a) $V_{CV}$ e (b) $VI$ alocadas, considerando as partições criadas pelo algoritmo Fast-Greedy.....	76
Figura 3.8 – Análise de frequência das tubulações com (a) $V_{CV}$ e (b) $VI$ alocadas, considerando as partições criadas pelo algoritmo Louvain.....	77
Figura 4.1 – Fluxograma ilustrando as etapas realizadas no desenvolvimento desta pesquisa.....	86
Figura 4.2 – Rede KL com dois reservatórios.....	96
Figura 4.3 – Setores desenvolvidos pelos algoritmos (a) Louvain e (b) Leiden.....	97
Figura 4.4 – Mapas de superfície de pressão mínima desenvolvidos após as setorizações feitas por (a) Louvain-PSO e (b) Leiden-PSO em C-1.....	99
Figura 4.5 – Mapas de superfície de pressão mínima desenvolvidos após as setorizações feitas por (a) Louvain-PSO e (b) Leiden-PSO em C-2 visando a minimização de $CV$ .....	102
Figura 4.6 – Mapas de superfície de pressão mínima desenvolvidos após as setorizações feitas por (a) Louvain-PSO e (b) Leiden-PSO em C-2 visando a minimização de $PU$ .....	103
Figura 4.7 – Mapas de superfície de pressão mínima desenvolvidos após as setorizações feitas por (a) Louvain-PSO e (b) Leiden-PSO em C-2 visando a minimização de $IWA$ .....	104
Figura 4.8 – Análise comparativa de pressões antes e após a otimização integrada de setores, $K$ e $D$ , obtidas pelos algoritmos Louvain-PSO e Leiden-PSO.....	107
Figura 4.9 – Redução de volume de vazamento para cada cenário de otimização considerando um período diário de abastecimento de água.....	110
Figura 5.1 – Etapas para elaboração do estudo.....	117

Figura 5.2 – Processo de detecção de comunidades realizado pelo algoritmo Leiden. .....	120
Figura 5.3 – Rede KL setorizada com elevações. ....	125
Figura 5.4 – Comportamento da idade da água dos nós de consumo da rede KL durante o período de simulação hidráulica de 24h. ....	126
Figura 5.5 – Mapas de superfície de pressão correspondentes ao horário de menor demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de <i>CV</i> . ....	128
Figura 5.6 – Mapas de superfície de idade da água correspondentes ao horário de maior demanda antes e após as setorizações da rede KL minimização de <i>CV</i> . ....	129
Figura 5.7 – Mapas de superfície de pressão correspondentes ao horário de menor demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de <i>PU</i> . ....	132
Figura 5.8 – Mapas de superfície idade da água correspondentes ao horário de maior demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de <i>PU</i> . .....	132
Figura 5.9 – Mapas de superfície de pressão correspondentes ao horário de menor demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de <i>IWA</i> . ....	135
Figura 5.10 – Mapas de superfície de idade da água correspondentes ao horário de maior demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de <i>IWA</i> . .....	136
Figura 5.11 – Análise comparativa de pressões horárias antes e após as otimizações realizadas para as setorizações estática e dinâmica. ....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Métodos elitistas e não-elitistas.....	41
Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens do algoritmo PSO. ....	42
Tabela 3.1 – Abreviaturas dos nomes dos algoritmos híbridos. ....	56
Tabela 3.2 – Resultados gerais da otimização de alocação de válvulas considerando <i>CV</i> , <i>PU</i> e <i>IWA</i> como função-objetivo em otimização mono-objetivo.....	73
Tabela 4.1 – Resultados obtidos antes e após a otimização de <i>K</i> para a setorização. ....	101
Tabela 4.2 – Resultados obtidos antes e após a otimização integrada de setores e <i>K</i> das válvulas.....	105
Tabela 4.3 – Resultados obtidos antes e após a setorização para os três cenários de otimização (C-1, C-2 e C-3).....	108
Tabela 5.1 – Demanda base total dos setores. ....	125
Tabela 5.2 – Resultados obtidos antes e após a otimização visando minimizar o custo total de alocação de válvulas ( <i>CV</i> ). ....	127
Tabela 5.3 – Resultados obtidos antes e após as otimizações visando minimizar a uniformidade de pressão ( <i>PU</i> ). ....	131
Tabela 5.4 – Resultados obtidos antes e após as otimizações visando minimizar <i>IWA</i> . ....	134
Tabela 5.5 – Resultados obtidos antes e após todas as otimizações realizadas para as setorizações dinâmica e estática. ....	137
Tabela 5.6 – Resultados de redução de vazamentos de todas as otimizações realizadas para as setorizações dinâmica e estática.....	140

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 ENQUADRAMENTO .....	16
1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS .....	18
1.3 JUSTIFICATIVA .....	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
1.5 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS DO TRABALHO .....	22
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>25</b>
2.1 CONTEXTO NACIONAL E INTERNACIONAL DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA .....	25
2.2 TEORIA DE GRAFOS .....	28
2.3 MÉTODOS DE PARTICIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA .....	31
2.4 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO E OPERAÇÃO DE VÁLVULAS .....	37
2.5 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO HIDRÁULICO E DE QUALIDADE DA ÁGUA .....	43
2.6 LACUNA DO CONHECIMENTO .....	47
<b>3 SETORIZAÇÃO ÓTIMA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: UMA ABORDAGEM EXPLORATÓRIA DA TEORIA DOS GRAFOS .....</b>	<b>50</b>
RESUMO .....	50
3.1 INTRODUÇÃO .....	50
3.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	56
3.2.1 <i>Metodologia proposta</i> .....	56
3.2.2 <i>Teoria de grafos aplicada às redes de distribuição de água</i> .....	58
3.2.3 <i>Particionamento da rede de distribuição de água</i> .....	58
3.2.3.1 <i>Algoritmo Fast-Greedy</i> .....	58
3.2.3.2 <i>Algoritmo Louvain</i> .....	59
3.2.4 <i>Otimização de alocação de válvulas</i> .....	61
3.2.5 <i>Otimização por Enxame de Partículas</i> .....	63
3.2.6 <i>Critérios de desempenho hidráulico</i> .....	64
3.3 ESTUDO DE CASO .....	66
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	67
3.4.1 <i>Particionamento da rede de distribuição de água</i> .....	67
3.4.2 <i>Otimizações mono-objetivo para alocação de válvulas</i> .....	72
3.4.3 <i>Análise de frequência de tubulações com válvulas alocadas</i> .....	76
3.5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS .....	78
<b>4 OTIMIZAÇÃO DE SETORES PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA .....</b>	<b>81</b>
RESUMO .....	81
4.1 INTRODUÇÃO .....	82
4.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	85
4.2.1 <i>Abordagem geral</i> .....	85
4.2.2 <i>Modelagem da rede de distribuição de água como grafo</i> .....	86
4.2.3 <i>Detecção de comunidades</i> .....	87

4.2.3.1 Algoritmo Louvain.....	87
4.2.3.2 Algoritmo Leiden.....	88
4.2.4 Alocação e operação ótima de válvulas.....	89
4.2.4.1 Modelagem hidráulica do problema.....	89
4.2.4.2 Formulação matemática do problema .....	93
4.2.4.3 Otimização por enxame de partículas .....	94
4.2.4.4 Estimativas das emissões de carbono associadas aos vazamentos...95	
4.3 ESTUDO DE CASO .....	95
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	96
4.4.1 Algoritmos de detecção de comunidades .....	96
4.4.2 Otimização de setores visando a minimização de custos (C-1).....	99
4.4.3 Otimização integrada de setores e do coeficiente de perda de carga das válvulas (C-2).....	101
4.4.4 Otimização integrada de setores, do coeficiente de perda de carga e do diâmetro das válvulas (C-3).....	106
4.4.5 Estimação de vazamentos, impacto econômico e emissões de carbono dos cenários de setorização .....	109
4.5 CONCLUSÕES.....	112
<b>5 SETORIZAÇÃO DINÂMICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA .....</b>	<b>113</b>
RESUMO .....	113
5.1 INTRODUÇÃO .....	113
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	116
5.2.1 Rede de distribuição de água como grafo (Etapa 1).....	118
5.2.2 Detecção de comunidades pelo algoritmo Leiden (Etapa 2).....	119
5.2.3 Operação ótima de setores estáticos e dinâmicos (Etapa 3).....	120
5.2.3.1 Setores estáticos e dinâmico.....	120
5.2.3.2 Funções-objetivo .....	122
5.2.4 Análise de redução de vazamentos (Etapa 4) .....	124
5.3 ESTUDO DE CASO .....	124
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	124
5.4.1 Configuração ótima de setores pelo algoritmo Leiden .....	124
5.4.2 Avaliação de custo e desempenho hidráulico de cenários de otimização	125
5.4.2.1 Otimizações visando a minimização do custo total de alocação de válvulas .....	127
5.4.2.2 Otimizações visando a minimização de uniformidade de pressão ....	130
5.4.2.3 Otimizações visando a minimização do índice de idade média ponderada da água acima de limite estabelecido.....	134
5.4.2.4 Resultados gerais de otimização.....	137
5.4.2.5 Avaliação de vazamentos dos cenários de otimização.....	140
5.5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	141
<b>6 DISCUSSÃO GERAL.....</b>	<b>143</b>
6.1 DETECÇÃO DE COMUNIDADES .....	143
6.2 SETORIZAÇÃO .....	144

<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>147</b>
7.1 CONCLUSÕES.....	147
7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	149
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>150</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

As redes de distribuição de água (RDA) são sistemas suscetíveis a variações de pressão decorrentes de rupturas de tubulações, vazamentos, furtos de água e outras perturbações operacionais. Com intuito de melhorar o gerenciamento das malhas dos sistemas de abastecimento, nos anos de 1980, especialistas em recursos hídricos propuseram setorizar ou particionar as RDA em setores ou distritos de medição (em inglês, *District Metered Areas* - DMAs) com o objetivo de avaliar as perdas de água e reduzir vazamentos (SAVIC e FERRARI, 2014).

Os distritos de medição são subsistemas de uma RDA em que todas as entradas e saídas de água são monitoradas através de medidores de vazão. Para mitigar o número de medidores instalados, procede-se ao seccionamento total de tubulações de fronteira e que se encontram nos limites dos setores. O objetivo é permitir o cálculo do balanço hídrico em cada setor, tipicamente realizado para um período anual, atendendo aos volumes de água que entram e saem dos setores, aferidos pelos medidores de vazão e pelos contadores instalados nos consumidores, de forma a estimar as perdas de água de forma mais precisa (DI NARDO *et al.*, 2014).

Segundo Farley (2001), a principal vantagem da setorização de RDA é a melhoria do controle dos fluxos de água nas redes de abastecimento, o que permite avaliar os vazamentos e tomar medidas de mitigação, assim como, regular as pressões na rede quando associados a válvulas de controle (de vazão ou de pressão). Nesse sentido, conforme Araujo, Ramos e Coelho (2006) e Shafiee *et al.* (2016), além de melhorar o atendimento às demandas da população, o gerenciamento das RDA a partir de setores permite reduzir custos operacionais associados à redução do volume, tanto em termos de custos de produção de água como de energia elétrica consumida para o tratamento e bombeamento.

Em geral, o estabelecimento e desenho dos setores é constituído por duas etapas principais: o particionamento topológico do sistema, com a formação de comunidades (futuros setores) que incluem conjuntos de nós e tubulações; e a

alocação de dispositivos de controle (válvulas de controle e isolamento) nas tubulações de fronteira, isto é, tubulações que conectam e podem isolar as comunidades geradas por meio da abertura e fechamento de válvulas (BUI; JEONG; KANG, 2022).

Estes dispositivos de controle permitem um melhor gerenciamento de pressões e redução de vazamentos, facilitam a manutenção e aspectos operacionais na RDA (ARAUJO; RAMOS; COELHO, 2006), protegem a rede contra eventos de contaminação (LIFSHITZ e OSTFELD, 2018), possibilitam a recuperação de energia do sistema de abastecimento (GIUDICIANNI *et al.*, 2020a) e também permitem a otimização da qualidade da água para abastecimento via operação ótima de válvulas (CHATZIVASILIS; PAPADIMITRIOU; KANAKOUDIS, 2019).

Contudo, o estabelecimento de setores não é trivial devido à dinâmica hidráulica e complexidade topológica das RDA e, desta forma, pesquisas recentes, referentes à formação de setores em RDA, são fundamentadas na integração de novas ferramentas e recursos de modelagem hidráulica, monitoramento e otimização (SALDARRIAGA *et al.*, 2019).

Apesar de avanços em estudos de setorização de RDA, a maioria das abordagens ainda se baseiam em configurações estáticas de setores (setores com configurações de válvulas fixas), que podem comprometer o desempenho hidráulico e a qualidade da água ao longo do tempo.

Mesmo com a utilização da tecnologia, identificar a configuração mais adequada de setores é uma tarefa muito complexa para as concessionárias de água, uma vez que, quando uma RDA é dividida em setores estáticos, a resiliência hidráulica (TODINI, 2000) do sistema pode ser reduzida e a qualidade de água piorar, devido aos percursos mais longos da água para contornar setores (SHARMA *et al.*, 2022). Esses percursos mais longos de escoamento aumentam o tempo de permanência da água na rede, o que leva ao maior decaimento do cloro, colocando em risco o abastecimento de água seguro de acordo com os padrões mínimos de desinfetante. Acresce ainda que, no caso da existência de vazamentos e da

despressurização dos condutos por transientes hidráulicos ou por intervenções de reparação, existe o risco de haver contaminação da água e, conseqüentemente, pôr em risco a saúde pública.

À vista deste contexto apresentado, a setorização dinâmica das RDA surge como um possível modo de minimizar o aumento no tempo de residência da água (idade média da água) e a perda de desempenho hidráulico do sistema de abastecimento gerados pelos setores estáticos. Segundo Fu *et al.* (2022), os setores dinâmicos são caracterizados por operações flexíveis nas tubulações de fronteira, que tornam os sistemas mais resilientes a situações emergenciais e, neste sentido, ajudam a manutenção da operação normal do sistema de abastecimento.

Giudicianni *et al.* (2020a) afirmam que a formação de diferentes configurações de setores permite um controle dinâmico da RDA mais eficaz e um gerenciamento de água mais eficiente quando comparado com configurações estáticas de setores, principalmente, em situações anômalas de operação. Além disso, os autores corroboram que tal proposta oferece a possibilidade de definir particionamentos dinâmicos de RDA de acordo com a variabilidade espacial e temporal da demanda de água, garantindo assim, um gerenciamento mais sustentável, de menor custo e, ao mesmo tempo, que preserva o desempenho hidráulico do sistema de abastecimento de água.

Portanto, buscando-se obter melhores métodos que atendam aos requisitos e critérios de desempenho para operação segura e de qualidade em redes setorizadas, nesta pesquisa é proposta uma metodologia para desenvolver e operar setores de forma dinâmica. Tal proposta visa garantir que a água distribuída tenha melhor qualidade quando comparada com aquela distribuída em redes setorizadas de forma clássica, mas ao mesmo tempo possa garantir o objetivo primário da setorização de redes, isto é, a melhoria da eficiência hidráulica do sistema.

## **1.2 Objetivo geral e específicos**

O objetivo do presente trabalho é desenvolver e demonstrar a aplicação de uma metodologia para a criação e operação de setores dinâmicos em redes de

distribuição de água, visando maximizar a eficiência hidráulica e a qualidade da água, a custo mínimo.

Os objetivos específicos são:

- setorizar a RDA a partir de métodos baseados em teoria de grafos;
- identificar as localizações ótimas das válvulas de controle e seccionamento;
- definir os pontos de operação ótimos para as válvulas de controle em horizontes operacionais diários, a fim de minimizar vazamentos e maximizar a qualidade de água;
- analisar o *trade-off* entre as funções-objetivo associadas à eficiência hidráulica, à qualidade da água e aos custos de instalação das válvulas.

### 1.3 Justificativa

Considerando que nos processos de setorização estática de uma RDA há redução da qualidade do abastecimento devido aos caminhos mais longos que a água necessita percorrer dos reservatórios aos nós consumidores finais (BRENTAN *et al.*, 2021), este trabalho visa propor uma metodologia inovadora para a criação de setores dinâmicos, pouco explorados em literatura, com intuito de flexibilizar a configuração dos setores e melhorar a qualidade do abastecimento de água.

Diferentemente das abordagens existentes que avaliam apenas cenários pontuais de demanda, esta pesquisa propõe uma otimização dinâmica, com reconfiguração horária dos setores ao longo de todo o período de simulação hidráulica.

Esta proposta busca contribuir para a melhoria da operação de sistemas de abastecimento de água, uma vez que setorizações dinâmicas da rede com objetivos de otimizar pressões e idade média da água em períodos diários permitem que, durante o dia, a água seja distribuída com qualidade aos consumidores e; ao longo da noite, período em que as pressões tendem a ser mais elevadas e as perdas são agravadas pelo aumento de pressão da rede, os setores se modifiquem para minimizar as perdas por meio da redução de pressão.

Vale destacar que existem poucos estudos na literatura relacionando a qualidade de água como critério/objetivo dentro do processo de otimização da operação de RDA, devido à complexidade de implementar e analisar parâmetros de qualidade da água em âmbito de otimização (MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017).

Além disso, Kim *et al.* (2022) salientam também que o gerenciamento de setores em RDA, geralmente, possui o objetivo apenas de regular as pressões nas tubulações e manter a quantidade de água adequada para o abastecimento, dada a dificuldade de se avaliar a pressão com a qualidade de água, por serem parâmetros ou critérios de avaliação conflitantes. Deste modo, este estudo enriquece a literatura de RDA, pois emprega funções-objetivo referentes às pressões na rede e à qualidade da água de abastecimento, com o objetivo de reduzir perdas por vazamentos e melhorar a qualidade da água entregue aos consumidores em horários de maior demanda.

Outro fato relevante é que este estudo aplica, para efeito de comparação, algoritmos híbridos, acoplando algoritmos de detecção de comunidades consolidados na literatura a um algoritmo de otimização para a criação de setores e alocação e regulação ótima de válvulas. Assim, a comparação dos resultados da utilização de vários algoritmos híbridos permite avaliar as vantagens e desvantagens de cada método neste tipo de proposta de otimização, o que contribuirá para o avanço em análises de metodologias ótimas de setorização.

Em síntese, este trabalho contribui para a melhoria das estratégias de gestão e operação dos sistemas de abastecimento, pois, a partir da otimização simultânea de dispositivos de controle e de critérios de desempenho de RDA, em diferentes períodos do dia, este trabalho fornece métodos que estabelecem um abastecimento de água mais seguro e de qualidade ao consumidor.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é constituído por oito capítulos, os quais estão divididos em: introdução (Capítulo 1); revisão de literatura (Capítulo 2); o corpo da tese constituído por três capítulos, cada um correspondente a um artigo publicado ou submetido

(Capítulos 3 a 5); discussão dos resultados (Capítulo 6); conclusões e recomendações (Capítulo 7).

O presente capítulo (Capítulo 1), apresenta o enquadramento do tema, estabelece os objetivos geral e específicos da tese desenvolvida, e apresenta a motivação e a justificativa para a realização das pesquisas que contemplam a tese. Além disso, são evidenciadas as contribuições inéditas do estudo em âmbito acadêmico e prático.

No Capítulo 2, intitulado “revisão de literatura”, é contextualizada a eficiência da operação de RDA a nível nacional e internacional, e são apresentados os conceitos, discussões e estudos que abrangem os processos de modelagem matemática aplicados ao longo dos anos para a setorização das redes de abastecimento. Também são descritos os principais algoritmos de otimização utilizados para determinar a operação ótima de sistemas de abastecimento de água, e são evidenciados os critérios hidráulicos aplicados para estimar o desempenho das RDA após processos de reabilitação.

O Capítulo 3, intitulado “Setorização Ótima de Redes de Distribuição de Água: uma abordagem exploratória da teoria dos grafos” é referente ao estudo que gerou o primeiro artigo publicado ao decorrer do desenvolvimento da tese. Neste capítulo é explorada a aplicação da teoria de grafos na modelagem de uma RDA italiana, a partir da implementação de dois algoritmos de detecção de comunidades e um algoritmo para otimização do sistema. No estudo são avaliados cenários de setorização, os quais são classificados quanto ao custo de projeto e aos critérios hidráulicos, como pressão e idade da água.

O Capítulo 4, intitulado “Otimização de Setores para a Gestão Sustentável de Redes de Distribuição de Água”, está relacionado ao segundo artigo produzido ao longo da elaboração da tese. Neste capítulo são abordadas estratégias hidráulicas para a otimização não só da formação dos setores, mas da operação da RDA juntamente ao processo de setorização. No estudo são avaliados diferentes cenários de otimização que visam reduzir custos de alocação de válvulas, custos por volume de

água estimado em vazamentos, custos envolvendo o consumo excessivo de energia para a operação do sistema e custos relacionados às emissões desnecessárias de carbono.

O Capítulo 5, intitulado “Setorização Dinâmica de Rede de Distribuição de Água” 5 é referente ao terceiro artigo elaborado a partir do desenvolvimento da tese. Neste capítulo é evidenciada a importância da alocação e operação ótima de válvulas, dinamicamente, para otimização do desempenho hidráulico de uma RDA. Os resultados de otimizações estática e dinâmica de setores são comparados, a fim de mostrar a grande melhora na operação hidráulica de sistema de distribuição de água com a abordagem dinâmica, principalmente, em termos de redução de vazamentos, consumo de energia e idade da água.

No Capítulo 6 procede-se à discussão dos resultados obtidos ao longo dos estudos realizados para a conclusão da tese. Neste capítulo são avaliados os resultados obtidos nas etapas de detecção de comunidades e alocação ótima de válvulas. São discutidos os resultados obtidos por meio das otimizações caracterizadas tanto pela formação de setores estáticos, como dinâmicos, conforme os períodos de simulação hidráulica estabelecidos.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações após a obtenção e avaliação de todos os resultados produzidos com a elaboração da tese.

### **1.5 Contribuições inovadoras do trabalho**

O presente trabalho apresenta três contribuições inovadoras de caráter metodológico e técnico-científico que se apresentam em sequência.

A primeira contribuição é referente à aplicação e exploração de vários tipos de grafos (i.e., direcionados, não direcionados, ponderados, não ponderados, e combinações entre estes) para representação matemática de RDA em estudos de setorização. Neste contexto, as soluções obtidas para os diferentes cenários de modelagem da RDA como grafo são avaliadas, comparadas e discutidas tanto

hidraulicamente, como em termos de conectividade, redundância e resiliência topológica dos setores desenvolvidos.

A segunda contribuição corresponde à implementação e comparação de diferentes abordagens para a criação de setores estáticos, a partir da formulação de problemas de otimização mono-objetivo, os quais corresponderam aos cenários: (C-1) a minimização do custo de alocação de válvulas (otimização clássica) e, posteriormente, a otimização da abertura das válvulas visando a minimização da uniformidade de pressão ou da idade da água; (C-2) a minimização do custo, da uniformidade de pressão ou de idade da água considerando a otimização integrada dos setores e da abertura das válvulas; e (C-3) similar a C-2, mas considerando otimização integrada do diâmetro das válvulas junto à criação de setores também.

A terceira e mais importante contribuição deste estudo centra-se na otimização dinâmica dos setores em horizonte operacional reduzido, hora a hora, o que permite gerar uma maximização da eficiência do abastecimento de água em relação aos resultados obtidos a partir dos modelos clássicos de setorização, caracterizados pela criação de setores estáticos com configurações fixas de operação de válvulas durante o período de simulação hidráulica.

Este trabalho também teve outro contributo complementar para o avanço do conhecimento no âmbito dos estudos de setorização de RDA. Este estudo analisa e compara algoritmos híbridos constituídos por diferentes métodos de detecção de comunidades e um algoritmo de otimização consolidado na literatura. Desta forma, são discutidas vantagens e desvantagens de cada método para as diferentes propostas de otimização abordadas.

Em síntese, o presente trabalho propõe e aplica uma nova metodologia de setorização dinâmica que promove um abastecimento de água diário de maior qualidade ao consumidor e com menos perdas de água em comparação aos modelos clássicos de setorização, tornando a operação hidráulica do sistema mais eficiente e segura, ao menor custo.

Cada uma destas três contribuições deu origem a um artigo submetido ou publicado, como produto desta tese, a saber:

**1ª Contribuição (Capítulo 3 desta tese):** ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas; MEIRELLES, Gustavo; BRENTAN, Bruno Melo. Optimal District metered areas design of water distribution systems: A comparative analysis among hybrid algorithms. *Journal of Water Process Engineering*, v. 63, p. 105472, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105472>.

**2ª Contribuição (Capítulo 4 desta tese):** ANCHIETA, Thomaz; COVAS, Dídía; MEIRELLES, Gustavo; BRENTAN, Bruno. Optimizing District Metered Areas Design for Sustainable Water Supply Management. *Urban Water Journal*. Submetido em agosto de 2025.

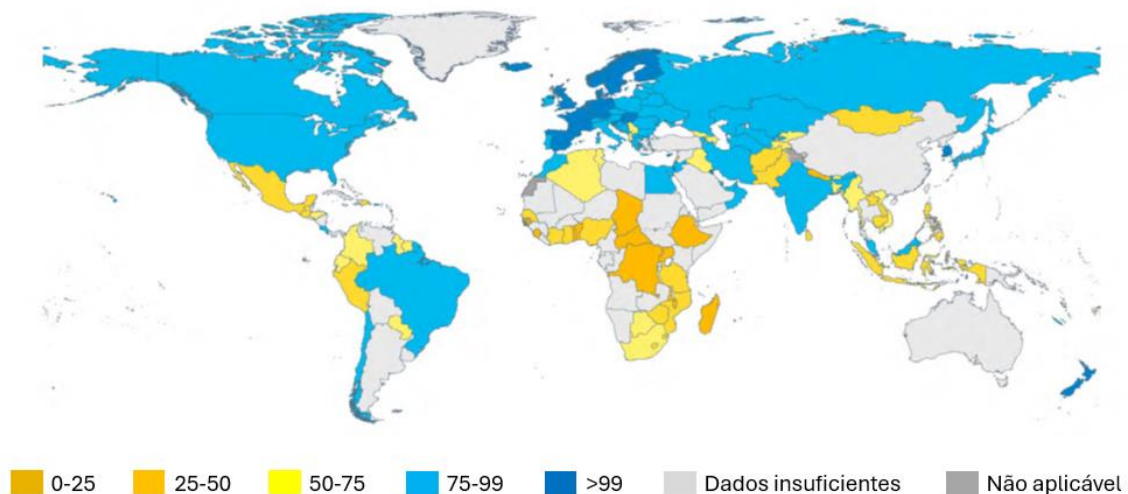
**3ª Contribuição (Capítulo 5 desta tese):** ANCHIETA, Thomaz; COVAS, Dídía, BRENTAN, Bruno. Dynamic District Metered Areas. *Journal of Water Process Engineering*. Submetido em fevereiro de 2026.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Contexto nacional e internacional de abastecimento de água

Entre 2015 e 2024, 961 milhões de pessoas passaram a ser abastecidas com água potável, totalizando um número de 7,4 bilhões de pessoas com acesso seguro à água em todo o mundo. Neste contexto, destaca-se a Nova Zelândia, que já alcançou o acesso total (100%) de serviços básicos de água para consumo humano, conforme a Organização Mundial da Saúde e Fundo das Nações Unidas para a Infância (em inglês, *World Health Organization – WHO* e *United Nations Children’s Fund – UNICEF*) (2025). Na Figura 2.1 é apresentado o mapa mundial com a distribuição percentual da população com acesso à água potável em cada país. Em 2024, cerca de 160 países apresentaram estimativas desta distribuição para serviços de abastecimento de água potável.

**Figura 2.1 – Percentual de acesso à água potável por país em 2024.**



Fonte: Adaptado de WHO e UNICEF (2025).

Observando-se o mapa da Figura 2.1, nota-se que, em 2024, os países mais desenvolvidos apresentavam maiores índices de abastecimento seguro de água, como é o caso dos países localizados no continente europeu.

No entanto, apesar de haver uma redução significativa da estimativa de pessoas que não possuem acesso à água potável desde 2015, a quantidade de pessoas no mundo que ainda sofrem com a ausência de abastecimento de água potável ainda é

de, aproximadamente, 700 milhões de pessoas (WHO e UNICEF, 2025). Este número expressivo é exemplificado, especialmente, por alguns países africanos, como mostrado no mapa da Figura 2.1. Além disso, neste contexto, é importante destacar que países mais pobres e localizados em regiões do planeta impactadas por períodos prolongados de secas durante o ano, possivelmente, são mais afetados pela falta de acesso ao abastecimento de água potável.

No Brasil, a situação também é alarmante, uma vez que, em 2023, cerca de 34 milhões de pessoas sofriam com a falta de acesso à água potável (16,9% da população brasileira em 2023), conforme dados extraídos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento e Infraestrutura Ambiental (SINISIA) e divulgados pelo Instituto Trata Brasil (2025).

No contexto brasileiro, conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de 2022 divulgados pelo Instituto Trata Brasil (2024), a ausência de abastecimento de água seguro e de qualidade à população é diagnosticada, principalmente, devido aos altos índices de perdas ao longo dos sistemas de distribuição de água. Estas perdas, basicamente, ocasionadas por vazamentos, erros de medição e consumos não autorizados, geram prejuízos ambientais e socioeconômicos, evidenciando infraestruturas, operações e manutenções falhas de abastecimento de água.

Em âmbito de literatura técnico-científica, para cálculo de perdas de água em sistemas de abastecimento, habitualmente, são utilizados os métodos propostos pela *International Water Association* (IWA), que são (SERAFEIM *et al.*, 2024):

- balanço hídrico (*top-down*): no qual, o volume de perdas é obtido subtraindo-se os volumes consumidos do volume total disponibilizado para distribuição;
- vazão mínima noturna (*bottom-up*): em que as perdas são quantificadas pela identificação da vazão mínima noturna, aferida por uma série de ensaios em campo;
- estimativa de vazamentos e consumo de fundo (em inglês, *Burst and Background Estimates* – BABE): em que as perdas aparentes (volumes de água consumidos e

não faturados), geradas por erro de medição como hidrômetros defeituosos, ligações clandestinas e fraudes, são obtidas a partir da diferença entre o volume total das perdas de água e o volume de perda real de água (vazamentos).

Todos os métodos são aplicados e geram dados de medição realistas, principalmente, em RDA subdivididas em setores ou distritos de medição. Tal contexto pode ser atribuído ao fato de o controle de perdas residir em gerenciamento de pressões, vazamentos e infraestrutura, e uma RDA subdividida em setores permitir simplificar e tornar essas tarefas mais pontuais.

Di Nardo *et al.* (2020) corroboram que a setorização de RDA é um processo que objetiva, em geral, facilitar o gerenciamento do sistema de abastecimento, de forma que a identificação e regulação de pressões, vazões e, até mesmo, minimização de perdas por vazamentos sejam simplificadas em cálculos e investigações que envolvam somente cada setor e não a rede como um todo, possibilitando manutenções e reabilitações mais rápidas no sistema.

Desse modo, a setorização de RDA possibilita vislumbrar projetos de melhores custo-benefício para as concessionárias de água, contribuindo para a melhoria da qualidade e segurança do abastecimento de água à população. Vale destacar que, em RDA, cada setor pode ser abastecido diretamente por uma derivação de adutora ou a partir de um reservatório setorial, e que a setorização é fundamentada no sentido de definir as zonas de influência das principais unidades que atendem cada setor (reservatórios e sistemas elevatórios) (MOTTA, 2010).

Uma vez que muitas concessionárias setorizam RDA a partir de modelos hidráulicos de simulação para definir a configuração de setores, compreende-se que o processo para setorizar adequadamente a RDA seja subdividido em duas etapas. A primeira é caracterizada pela modelagem da rede de modo que se torne possível particioná-la em regiões, partições ou comunidades.

A segunda etapa consiste na determinação da localização de dispositivos de controle e de seccionamento nas tubulações de fronteira entre essas comunidades,

para que, por fim, seja concluído o processo de setorização (SANTONASTASO; DINARDO; CREACO, 2019).

Na etapa de particionamento (subdivisão da rede), as RDA são modeladas como representações matemáticas denominadas grafos, que possibilitam criar partições considerando todos os componentes (tubulações, bombas, válvulas, reservatórios, tanques e nós de junção) que constituem uma rede de abastecimento de água (FANG *et al.*, 2023).

Na subseção seguinte é apresentada uma breve definição de grafos e dos conceitos associados, quanto à tipologia dessa modelagem, com representações matemáticas e aplicação em estudos de RDA.

## 2.2 Teoria de grafos

Como citado anteriormente, no processo de setorização, primeiramente, é necessário considerar a RDA como um grafo para particionar a RDA e somente após a alocação das válvulas, consolidar a setorização.

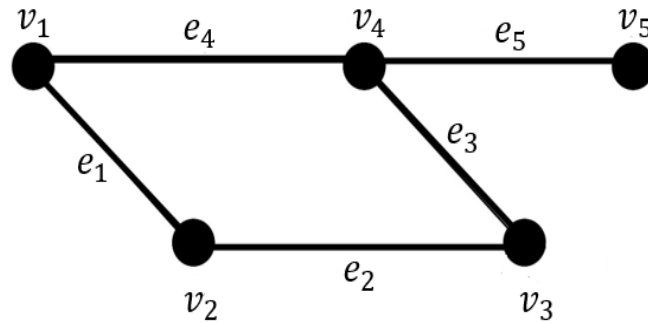
Deste modo, para entender melhor a modelagem da RDA como grafo, primeiramente é necessário conhecer a definição de grafo ( $G$ ), que matematicamente pode ser expressa pela seguinte equação (DEO, 1974):

$$G = (V, E), \quad (2.1)$$

em que  $v = \{v_1, v_2, \dots\}$  é um conjunto de objetos denominados vértices ou nós que são conectados por outro conjunto de objetos  $E = \{e_1, e_2, \dots\}$  chamados de arestas ou *links*, em que cada aresta  $e_n$  conecta um par  $(v_i, v_j)$  de vértices.

A representação mais comum de um grafo é caracterizada por um diagrama, no qual os vértices são representados como pontos e as arestas correspondem aos segmentos que os conectam. Em sequência, na Figura 2.2 apresenta-se um grafo simples.

**Figura 2.2 – Representação de um grafo simples.**



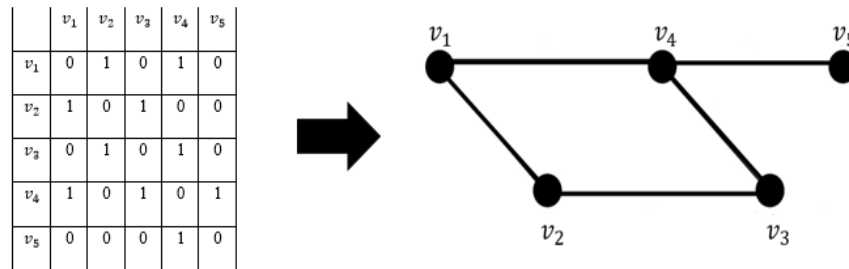
Fonte: Autor da tese (2025).

Fazendo uma analogia aos modelos matemático-computacionais de RDA, na abstração para teoria de grafos, os nós representam reservatórios, tanques e nós de demanda, enquanto as arestas são os tubos, válvulas e bombas (CASTRO-GAMA *et al.*, 2016). Segundo Perelman e Ostfeld (2013), os grafos podem ser classificados como:

- não direcionados: formados por arestas com direções desconhecidas ou não relevantes para análise;
- direcionados: com sentido de conexões entre os nós conhecido;
- não ponderados: grafos com arestas de pesos iguais;
- ponderados: constituídos por arestas ou nós de pesos diferentes conforme a informação atribuída para ponderação;
- estáticos: com valores de seus nós e arestas fixos ao longo do tempo;
- dinâmicos: com os valores de nós e arestas variando no tempo, a depender das informações disponíveis.

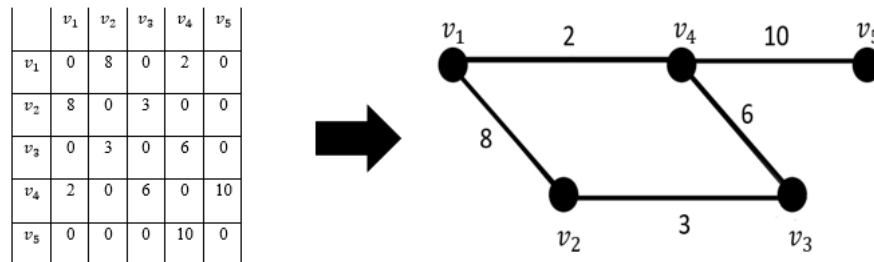
Além disso, de acordo com Xu (2021), os grafos podem ser representados por matrizes de adjacência ou ponderação  $X = [x_{ij}]$  em que cada nó  $i$  e  $j$  contém os atributos de aresta que os conectam. Em sequência, nas Figuras 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 são mostrados os tipos de grafos e suas respectivas matrizes de adjacência ou ponderação.

**Figura 2.3 – Grafo não direcionado e não ponderado.**



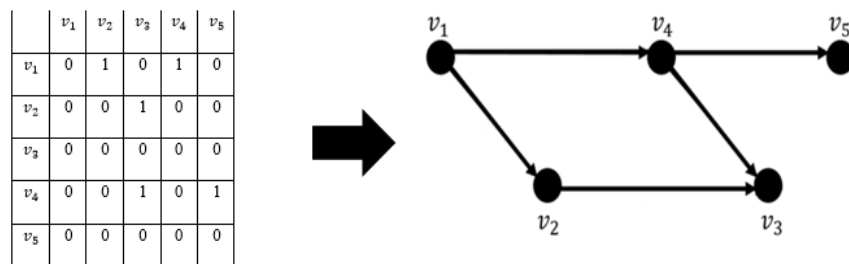
Fonte: Autor da tese (2025).

**Figura 2.4 – Grafo não direcionado e ponderado.**



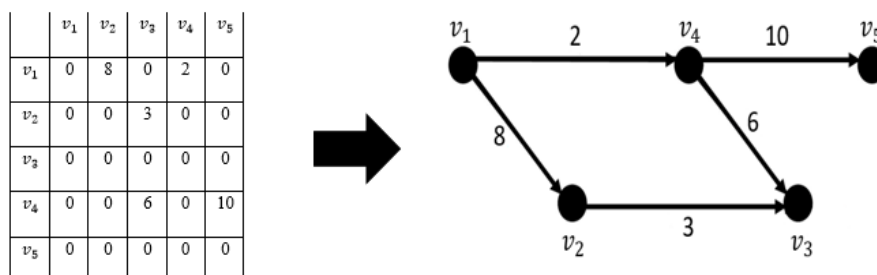
Fonte: Autor da tese (2025).

**Figura 2.5 – Grafo direcionado e não ponderado.**



Fonte: Autor da tese (2025).

**Figura 2.6 – Grafo direcionado e ponderado.**



Fonte: Autor da tese (2025).

Todos esses tipos de grafos são empregados em pesquisas sobre RDA para diversos objetivos de estudo e como alguns exemplos mais vistos em literatura, têm-se: setorização, análise topológica de rede e aplicação de indicadores de

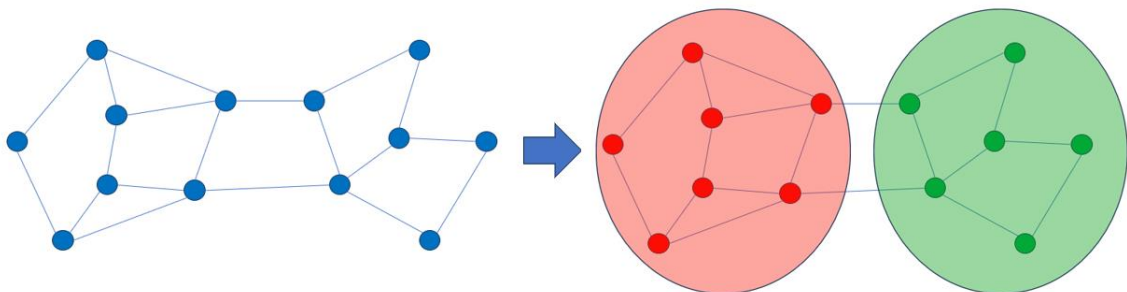
vulnerabilidade de RDA. No entanto, é importante observar que, em geral, os grafos não direcionados são considerados em pesquisas relacionadas à estrutura das RDA (YAZDANI; OTOO; JEFFREY, 2011), enquanto os grafos direcionados pela vazão podem auxiliar na obtenção de mais informações hidráulicas sobre o sistema de abastecimento (YAZDANI e JEFFREY, 2012).

Para o caso dos grafos ponderados, conforme Giudicianni *et al.* (2018), a ponderação das arestas dos grafos pode ser definida por parâmetros hidráulicos (e.g., vazão e velocidade) ou por características topológicas das tubulações (e.g., comprimento, diâmetro, rugosidade), por forma a atribuírem mais peso às tubulações mais relevantes na análise efetuada. Na próxima subseção são apresentados, de forma geral, os métodos de particionamento mais utilizados na bibliografia referentes aos estudos de otimização de formação de setores em RDA.

### 2.3 Métodos de particionamento de redes de distribuição de água

Antes de setorizar uma RDA com a alocação de dispositivos de controle, é necessário particionar ou subdividir a rede em comunidades ou partições, para que sejam identificadas as possíveis tubulações de fronteira onde, posteriormente, serão alocados os dispositivos que irão controlar a entrada ou saída de água nos setores. De acordo com Newman e Girvan (2004), as comunidades são formadas por divisões de grafos de redes em subconjuntos de nós com alta densidade de arestas conectados por subconjuntos menos densos de arestas. Na Figura 2.7 é apresentado um exemplo da formação de comunidades em um grafo.

Figura 2.7 – Detecção de comunidades em grafo.



Fonte: Autor da tese (2025).

Para identificar as comunidades em um grafo, ao longo dos anos, foram desenvolvidos muitos métodos (algoritmos) de detecção de comunidades que contribuíram para atingir objetivos em diferentes campos de pesquisa, porém ainda não há uma definição quantitativa de comunidade universalmente aceita e não é claro quais são os algoritmos mais confiáveis (LANCICHINETTI e FORTUNATO, 2009; ZHAO *et al.*, 2018).

Dao, Bothorel e Lenca (2020) defendem que não há uma forma padrão de avaliar a qualidade e o desempenho de métodos de detecção de comunidades. Deste modo, não há métodos ou algoritmos que sejam melhores ou piores do que os demais, contudo, compreende-se que para cada campo de conhecimento e linha de pesquisa seja necessária a análise comparativa dos resultados obtidos através de diferentes técnicas, para determinação das vantagens e desvantagens de uma e, conseqüentemente, de eventuais avanços dos estudos científicos.

Alguns dos algoritmos mais antigos e empregados em estudos de RDA são os algoritmos de busca *Breadth First Search* (BFS) (POHL, 1969) e *Depth First Search* (DFS) (TARJAN, 1972). Estes algoritmos permitem particionar as RDA por meio de análises dos níveis de conectividade dos nós e dos seus componentes, isto é, se os conjuntos de nós (subgrafos) possuem conexões fracas (são subgrafos acíclicos) ou fortes (são subgrafos cíclicos direcionados). Perelman e Osfteld (2012) empregaram os métodos BFS e DFS com objetivo de simplificar o processo de detecção de comunidades de RDA. No estudo, as conexões de cada nó foram estabelecidas pelo direcionamento das arestas do grafo de RDA dado pelo sentido das vazões nas tubulações do sistema e pelas comunidades (componentes), fortemente ou fracamente conectadas, que foram criadas a partir da análise de matrizes de conectividade dos subgrafos da rede de abastecimento. Os autores determinaram que o método pode ser aplicado tanto para particionamento da RDA em processo de setorização, como também em estudos de alocação de sensores e detecção de fontes de contaminação.

Nos anos 2000, Clauset, Newman e Moore (2004) e Blondel *et al.* (2008), propuseram os algoritmos Fast-Greedy e Louvain para a detecção de comunidades,

ambos fundamentados em ganho de modularidade (conectividade das comunidades) e atualmente bastante empregados na literatura de RDA. Ambos os algoritmos utilizam o conceito de modularidade, isto é, uma medida que quantifica a qualidade da conectividade das comunidades por meio da comparação entre as arestas conectadas em conjuntos densos de nós e as arestas que conectam esses conjuntos (NEWMAN e GIRVAN, 2004; NEWMAN, 2004). Quanto mais próximo de 1 (valor máximo) é o valor da modularidade, maior a conectividade dos nós dentro das comunidades, isto é, existem mais conexões (caminhos alternativos) entre os nós que estão dentro de cada comunidade. Vale destacar que os métodos que se baseiam nesses cálculos de modularidade também são denominados em literatura como métodos de estrutura comunitária (NOVÁK; NEUMANN; MACAS, 2010).

Nos últimos anos, Creaco, Cunha e Franchini (2019) exploraram a utilização do algoritmo Fast-Greedy no particionamento de RDA por meio da combinação de duas técnicas heurísticas com o algoritmo de detecção de comunidades, onde determinaram a efetividade da utilização do algoritmo na criação de setores em redes de abastecimento, observando vantagens com os métodos implementados, como: a redução no número de tubos de fronteira e a maior uniformidade de demanda entre os setores.

Creaco e Haidar (2019) empregaram o algoritmo Fast-Greedy para particionar uma RDA em setores, juntamente com outros dois algoritmos de otimização, com o objetivo de setorizar a rede visando a redução de custos, vazamentos e uniformidade de demanda. Recentemente, Shekofteh, Yousefi-Khoshqalb e Piratla (2023) utilizaram o algoritmo Fast-Greedy e o compararam a outros dois algoritmos de particionamento para detectar as comunidades no processo de setorização de uma RDA.

Para o algoritmo Louvain, destaca-se o trabalho de Zhang *et al.* (2017), no qual os autores implementaram o algoritmo para o particionamento de RDA, juntamente com a aplicação de um algoritmo de otimização para minimizar parâmetros hidráulicos como uniformidade de pressão e idade da água ao longo dos setores.

Bianchotti *et al.* (2021) também empregaram o algoritmo Louvain para particionamento de duas RDA reais para formar setores com objetivos de reduzir desigualdades de demandas entre os setores, quantificar a dispersão de demandas e minimizar perdas de resiliência hidráulica.

Traag, Waltman e van Eck (2019) propuseram um algoritmo de detecção de comunidades chamado Leiden, parcialmente baseado em um algoritmo de movimentação local inteligente (WALTMAN e VAN ECK, 2013). O algoritmo Leiden é considerado uma versão aprimorada do algoritmo Louvain, apesar de ser mais complexo e apresentar três etapas de processamento, enquanto o Louvain tem somente duas.

Contudo, além dos algoritmos de estrutura comunitária, alguns estudos de particionamento de RDA também empregam métodos que envolvem teoria espectral de grafos (CHUNG, 1997), isto é, métodos caracterizados por operações envolvendo matrizes Laplacianas e análises de autovalores, autovetores e propriedades algébricas. Neste contexto, Herrera *et al.* (2010) propuseram um método de aprendizagem de máquina semi-supervisionado para particionamento de uma RDA envolvendo a teoria de grafo espectral e a implementação de matrizes de entrada com ponderações dos nós e tubos dadas, respectivamente, pela demanda e pelo diâmetro das tubulações.

Além disso, Di Nardo *et al.* (2017a) exploraram métodos de agrupamento espectral de nós no processo de particionamento de uma RDA italiana considerando cinco ponderações (adjacência, diâmetro, comprimento, condutância e vazão) aplicadas às arestas de grafos não direcionados da rede.

Mais recentemente, Belloum, Houichi e Kherouf (2022) avaliaram o desempenho de diversos algoritmos de agrupamento espectral, como *Clustering Large Applications* (CLARA), *Partitioning Around Medoids* (PAM), *Agglomerative, Divisive Analysis* (DIANA), e *K-Means*, empregados para particionamento de RDA. Para avaliá-los, os autores utilizaram redes de abastecimento de dimensões pequena, média e grande como estudos de caso, e aplicaram métricas de desempenho referentes à

modularidade, conectividade e estabilidade dos componentes dos respectivos grafos das redes.

Um dos métodos de detecção de comunidades mais antigos e empregado em estudos de RDA é o método *K-Means* (LLOYD, 1982), que é caracterizado pelo agrupamento dos nós em 'K' grupos (a escolha do operador) e pelo cálculo das distâncias entre pontos médios desses grupos, chamados centróides, com todos os outros nós da rede analisada. Os centróides são aleatoriamente posicionados inicialmente e as distâncias entre suas posições e os nós da rede são reparadas a cada iteração de modo que, por fim, as comunidades geradas sejam separadas por uma distância máxima e os centróides estejam o mais próximo possível de seus respectivos nós agrupados (BRENTAN *et al.*, 2018).

O algoritmo *K-Means* é utilizado em estudos de RDA com diversas finalidades. Kakoudakis *et al.* (2017), por exemplo, implementaram o método *K-Means* para particionar dados de treinamento para modelos de regressão polinomial evolutiva individuais, com objetivo final de estimar tempo para ocorrência de falhas das tubulações, conforme as características dos tubos como comprimento, diâmetro e idade.

Han e Liu (2017) empregaram o método *K-Means* para particionar uma RDA em processo de setorização, onde juntamente com um algoritmo genético, foram utilizados para minimizar os erros quadrados entre as distâncias dos nós e seus respectivos centróides no espaço Euclidiano, isto é, para ajuste dos respectivos setores. Novarini *et al.* (2017) também implementaram o método *K-Means* e um modelo híbrido (Self Organization Map (SOM) + *K-Means*) para particionar uma RDA em setores com base em critérios matemáticos e topológicos.

Outro método de particionamento de RDA é a estratégia multinível de detecção de comunidades, cujo objetivo é diminuir custos de algoritmos aplicando-os sobre redes reduzidas associadas à uma rede original  $R_0$  a partir das seguintes etapas (KARYPIS e KUMAR, 1998; VALEJO, 2014):

- Contração: em que são criadas  $N$  aproximações  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_N$ , cada vez mais reduzidas da rede original  $R$ , de tal forma que em cada nível, o número de arestas diminui, como  $|A_0| > \dots > |A_N|$ ;
- Particionamento: na qual, as redes reduzidas são particionadas em  $c$ -comunidades diferentes a partir da implementação de um algoritmo de detecção de comunidades;
- Projeção: em que todas as redes reduzidas são reprojetaadas formando a rede original novamente, isto é,  $R_{N-1}, R_{N-2}, R_{N-3}, \dots, R_N$ , até  $R_0$ .

Di Nardo *et al.* (2013) aplicaram o método multinível para particionar uma RDA visando a minimização de perdas de carga ao longo das tubulações e considerando grafos com nós ponderados pelas demandas e arestas ponderadas por diâmetro, energia dissipada e vazão, para obtenção de melhores resultados hidráulicos.

Alvisi (2015) empregou o método multinível em seu estudo para particionamento de uma RDA em setores considerando um número de  $n$  setores com tamanho ou número de nós pré-definidos. No estudo, o autor posiciona os medidores de vazão simultaneamente com a etapa de refinamento do particionamento multinível, garantindo uma configuração de setores ajustada ao número de tubos de fronteira (tubos abertos e fechados entre os setores).

Santonastaso *et al.* (2020) também consideraram o método multinível para particionamento de uma RDA localizada na Cidade do México, agrupando os nós com cotas de elevação semelhantes, com o objetivo de minimizar a diferença entre as elevações mínima e máxima de nós correspondentes aos mesmos setores para se obter um melhor controle de pressões na rede.

Além dos métodos já citados para particionamento de RDA, vale destacar também o método implementado por Izquierdo *et al.* (2011), denominado como multiagente. Nessa metodologia, as comunidades foram detectadas a partir da consideração de componentes (reservatórios, tubos, nós de demanda) da rede como agentes e após uma série de testes envolvendo os respectivos agentes. Os testes foram feitos por meio de observações que verificaram: se a demanda total de cada setor estava

entre os limites pré-fixados, se os reservatórios eram capazes de atender à essa demanda, se o comprimento total de cada setor estava entre os limites mínimo e máximo calculados conforme o comprimento total do conjunto de seus membros e, outras restrições.

Segundo Siqueira (2019), dentre todos esses métodos de particionamento de RDA, os mais vistos em literatura são os de estrutura comunitária e de partição multinível. Conforme o autor, os métodos de estrutura comunitária otimizam diretamente o índice de modularidade, produzindo comunidades conectadas por menores números de arestas e gerando projetos de menor custo de implantação; enquanto o método de particionamento multinível desenvolve comunidades de tamanhos mais homogêneos, facilitando o gerenciamento da RDA como um todo.

Posteriormente à etapa de particionamento é necessário alocar válvulas nas tubulações para que, finalmente, os setores sejam formados. Desse modo, na subseção seguinte é apresentado um breve histórico sobre os algoritmos que são utilizados para otimizar esse processo de alocação de dispositivos de controle e também possuem a possibilidade de otimizar duas ou mais funções-objetivo, para obtenção de um projeto ótimo de setorização.

#### **2.4 Algoritmos de otimização para alocação e operação de válvulas**

Projetos de otimização de RDA devem considerar múltiplos objetivos que permitam obter não só as soluções de menor custos para as concessionárias de água, mas também maximizar benefícios para a rede de abastecimento (WALSKI, 2001).

Nesse sentido, em um processo de setorização é importante que concomitantemente à alocação de válvulas, a RDA seja analisada e otimizada em termos de parâmetros como a pressão, a qualidade da água e os custos, para que se alcance o projeto com a melhor relação custo-benefício para as concessionárias de água e, ao mesmo tempo, abasteça os consumidores com a maior qualidade e segurança possível (ZHANG *et al.*, 2019).

Dessa forma, é importante que o processo de alocação de válvulas vise simultaneamente melhoras no desempenho hidráulico da rede a partir de algoritmos de otimização que possibilitem a minimização ou maximização de dois ou mais parâmetros, chamados mais comumente de algoritmos multiobjetivos.

No entanto, quando se considera mais do que um objetivo em processos de otimização, há a possibilidade de não haver uma única solução melhor do que todas as outras em relação a todos os objetivos propostos (PRASAD; HONG; PARK, 2003). Além disso, projetos de RDA que buscam soluções ótimas, com melhores custos-benefícios, geralmente, possuem objetivos conflitantes, o que torna a busca de soluções para o problema de otimização ainda mais complexa (FARMANI; WALTERS; SAVIC, 2006).

Desale *et al.* (2015) propõem que os problemas de otimização sejam classificados em dois tipos: problemas de soluções exatas, e problemas de soluções aproximadas. As soluções aproximadas podem ser obtidas por algoritmos de aproximação classificados em duas categorias: algoritmos heurísticos e metaheurísticos.

Conforme Kokash (2005), os algoritmos heurísticos foram desenvolvidos para resolver problemas de maior complexidade no espaço de busca e de maior tempo computacional, que não podem ser solucionados em tempo polinomial (razoável) pelos demais algoritmos não-heurísticos. Assim, os algoritmos heurísticos buscam soluções aproximadas em problemas envolvendo grandes e complexos conjuntos de dados, que podem ser ótimas ou não (YANG, 2010). Neste contexto, as técnicas metaheurísticas foram desenvolvidas para aumentar a eficiência dos processos heurísticos (BEHESHTI e SHAMSUDDIN, 2013).

Conforme Kumar e Yadav (2022), nos últimos anos, as técnicas metaheurísticas têm sido muito empregadas para facilitar e tornar mais rápida a solução de problemas multiobjetivos na área de recursos hídricos, como por exemplo, para calibração de modelos, gerenciamento e operação de sistemas ou redes de água.

Blum e Roli (2003) determinam que a base do mecanismo robusto de busca dos algoritmos metaheurísticos é a harmonização entre dois esquemas de busca que são: exploração e intensificação. No caso, para obtenção da melhor solução possível, a exploração busca soluções próximas da solução ótima em escala local, enquanto a intensificação busca soluções, fora da região da melhor solução candidata, em um espaço de escala global (GANDOMI *et al.*, 2013).

Os algoritmos metaheurísticos operam de tal forma que começam gerando um conjunto de respostas aleatórias chamado de população e, com base em seus operadores e por meio de iterações sucessivas, vão alterando as respectivas respostas aleatórias até que determinado critério de parada seja atendido (MOSHTAGHI; ESHLAGY; MOTADEL, 2021).

Segundo Baghel, Agrawal e Silakari (2012), os algoritmos metaheurísticos podem ser classificados como:

- Métodos de Trajetória: caracterizados por operar a partir de trajetórias no espaço de busca, procurando a obtenção de uma única solução e como alguns exemplos, têm-se: *Simulated Annealing* (SA) (KIRKPATRIK; GELATT; VECCHI, 1983), *Tabu Search* (GLOVER, 1986), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (FEO e RESENDE, 1995) e *Variable Neighborhood Search* (MLADENOVIC e HANSEN, 1997);
- Métodos de População: que são algoritmos caracterizados por trabalharem segundo o seu tipo de população e buscando conjuntos de soluções, podendo ser: *Genetic Algorithms* (GA) (HOLLAND, 1975), *Ant Colony Optimization* (ACO) (DORIGO; MANIEZZO; COLORNI, 1991) e *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY e EBERHART, 1995);
- Métodos Híbridos: que são algoritmos metaheurísticos acoplados com outros algoritmos de otimização para a obtenção de comportamentos inter-relacionados a diferentes estratégias de otimização e como alguns exemplos têm-se: *Hybridizing Metaheuristics With (Meta-) Heuristics* (WALSHAW, 2004), *Hybridizing Metaheuristic With Constraint Programming* (SHAW, 1998), *Hybridizing Metaheuristic With Tree Search Technique* (NAGAR; HERAGU; HADDOCK,

1995), *Hybridizing Metaheuristics With Problem Relaxation* (TAMURA *et al.*, 1994) e *Hybridization Metaheuristic With Dynamic Programming* (CONGRAM; POTTS; VAN DE VELDE, 2002).

Ressalta-se que estes algoritmos citados anteriormente são apenas alguns exemplos conforme as classificações dadas. Os algoritmos metaheurísticos também podem ser classificados quanto à sua natureza de origem (inspirados na natureza e não inspirados na natureza), ao uso de suas funções objetivo, ao número de estruturas de vizinhança e à utilização de memória (ABDEL-BASSET; ABDEL-FATAH; SANGAIAH, 2018).

Devido à maior complexidade e ao elevado número de objetivos em projetos ótimos de RDA, os algoritmos de otimização que têm sido mais utilizados nas últimas duas décadas na literatura referente à operação ótima de redes de abastecimento de água são os denominados algoritmos evolutivos (JOHNS; KEEDWELL; SAVIC, 2020; ZHENG; ZECCHIN; SIMPSON, 2015).

Segundo Sörensen e Glover (2013), os algoritmos evolutivos são os membros mais importantes da classe de algoritmos baseados em métodos de população, pois buscam a solução de problemas fundamentando-se em princípios de evolução natural. No caso, os algoritmos evolutivos operam em uma determinada população de soluções e usam dois mecanismos principais para a obtenção das melhores soluções: a seleção das melhores soluções e a recombinação dessas soluções em novas a partir de operadores (operação aleatória) que combinam atributos de duas ou mais soluções, reinserindo-as à população novamente por meio de condições ou exigências de qualidade mínimas.

Segundo Deb (2009), os algoritmos multiobjetivos evolutivos ainda podem ser subdivididos em: elitistas, caracterizados por apresentarem operadores que optam por manter as melhores soluções de populações combinadas; e algoritmos evolutivos não-elitistas, que não possuem nenhuma forma de elitismo em suas iterações. Na Tabela 2.1 são apresentados os métodos elitistas e não-elitistas mais comuns (FARMANI; WALTERS; SAVIC, 2006; TANABE e ISHIBUCHI, 2019). Para

analisar comparativamente alguns desses algoritmos evolutivos apresentados na Tabela 2.1, Farmani, Savic e Walters (2005) aplicaram os algoritmos NSGA-II e SPEA2 a três RDA. Os resultados do trabalho determinaram um desempenho um pouco melhor do SPEA2 em relação ao NSGA-II para os problemas analisados, gerando melhores soluções de *pay-off* (custo versus máxima eficiência de carga) para o SPEA2.

**Tabela 2.1 – Métodos elitistas e não-elitistas.**

TIPO	SIGLA	MODELO	AUTORES	ANO
ELITISTA	VEJA	Vector Evaluated Genetic Algorithm	Schaffer	1985
	NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	Srinivas e Deb	1994
	MOGA	Multiobjective Genetic Algorithm	Murata e Ishibuchi	1995
NÃO ELITISTA	SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm	Zitzler e Thiele	1998
	PAES	Pareto Archived Evolution Strategy	Knowles e Corne	2000
	NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II	Deb et al.	2000
	SPEA2	Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2	Zitzler, Laumanns e Thiele	2001

Fonte: Autor da tese (2025).

Raad, Sinskey e Van Vuuren (2011) compararam 23 algoritmos de otimização, incluindo NSGA-II e SPEA2, aplicados a nove RDA, com objetivo de minimizar custos e maximizar a confiabilidade do sistema a partir da avaliação de um índice de resiliência. No trabalho foram realizados testes de tempo de convergência e de tempo de otimização total, para comparar, respectivamente, o desempenho algorítmico e qualidade de solução.

A tentativa dos autores de incluírem algoritmos novos (hiperheurísticos) na pesquisa para superar consistentemente algoritmos evolutivos clássicos, como NSGA-II e SPEA2, não foram bem-sucedidas, uma vez que os algoritmos NSGA-II e SPEA2

estiveram entre os melhores algoritmos em termos de tempo de otimização total. El-Ghandour e Elbeltagi (2018) fizeram a comparação entre cinco algoritmos metaheurísticos, GA, PSO, ACO, o adaptado *Shuffled Frog Leaping Algorithm* (SFLA) (EUSUFF e LANSEY, 2003) e o *Memetic Algorithm* (MA) (DAWKINS, 1976), para uma otimização de objetivo único em duas RDA. O algoritmo PSO demonstrou ser o mais eficiente e de melhor recurso computacional.

O algoritmo PSO foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart (1995), com intuito de simular o comportamento de partículas em um enxame, no qual por meio das experiências de cada partícula, o algoritmo as movimenta de tal modo a obter posições ótimas que facilitem o alcance do alvo, ou seja, aprimorem a obtenção de soluções ótimas em processos iterativos considerando uma população pré-determinada. Em sequência, na Tabela 2.2 são apresentadas as vantagens e desvantagens da implementação do algoritmo PSO para solução de problemas de otimização conforme Poli, Kennedy e Blackwell (2007), e Juneja e Nagar (2016).

**Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens do algoritmo PSO.**

<b>VANTAGENS</b>		<b>DESVANTAGENS</b>	
I.	O algoritmo PSO não possui operações de seleção e mutação e, portanto, as buscas por soluções são feitas somente pela variação de velocidade de partículas	I.	O algoritmo PSO sofre um aumento considerável de complexidade por obtenção de soluções com o aumento do espaço de busca.
II.	Ao aprender com as experiências em grupo, as partículas voam somente para áreas boas, isto é, buscam somente soluções ainda melhores	II.	O método possui dificuldade relacionada ao ajuste de parâmetros de velocidade e direção dos movimentos de partículas.
III.	O algoritmo PSO é fundamentado em inteligência artificial e, desse modo, pode ser empregado em pesquisas científicas e, em aplicações práticas da engenharia	III.	Devido à falta de dimensionalidade, o algoritmo PSO não pode ser usado para solução de problemas com sistemas não coordenados (como por exemplo, campos de energia).
IV.	Os cálculos que contemplam o funcionamento do algoritmo são simples.		

Fonte: Autor da tese (2025).

Em relação à aplicação do algoritmo PSO em estudos de setorização ótima, pode-se destacar o estudo de Brentan *et al.* (2017a), no qual os autores utilizaram o algoritmo PSO para otimizar o processo de alocação e operação de válvulas na criação de setores de uma RDA, nos quais os resultados de setorização foram avaliados por custos e diversos parâmetros hidráulicos (índice de resiliência, uniformidade de pressão, similaridade de demanda, idade da água, energia e custos) para diferentes critérios de demanda, elevação e soma de comprimentos das tubulações dos respectivos setores.

Novarini *et al.* (2019) empregaram o PSO para a criação ótima de setores em uma rede de abastecimento a partir da alocação de válvulas nas tubulações visando a melhora de custos e do gerenciamento de pressões no sistema. Mais recentemente, Brentan *et al.* (2022) também aplicaram o PSO para o processo de alocação ótima de dispositivos de controle nas tubulações visando a criação de setores com a minimização das funções-objetivo de idade da água, uniformidade de pressão e custos, e a maximização de índice de resiliência. No trabalho, o processo de particionamento da rede foi feito pelo método *K-Means* e a avaliação das soluções foi realizada por métodos hierárquico e de análise multicritério.

No entanto, compreendendo-se a importância da seleção dos parâmetros e critérios hidráulicos que podem ser considerados como funções-objetivo, na subseção em sequência são apresentados alguns critérios envolvendo qualidade da água e desempenho hidráulico, que são muito utilizados em estudos de setorização e foram empregados neste trabalho visando a operação ótima das redes de abastecimento.

## **2.5 Critérios de desempenho hidráulico e de qualidade da água**

Os critérios utilizados para avaliar o desempenho hidráulico e de qualidade da água numa RDA podem variar conforme os objetivos de estudo. No âmbito da operação ótima de redes de distribuição que envolvem a otimização de bombas e alocação de válvulas, os critérios ou parâmetros mais utilizados são, em geral, referentes a custos e a pressões (MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017). Estudos de otimização envolvendo qualidade da água, geralmente, são mais escassos, dada à

dificuldade de modelação e avaliação dos parâmetros de qualidade da água (SHOKOOHI *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, têm sido realizados alguns estudos envolvendo parâmetros de qualidade de água como função objetivo em processo de otimização de setores em RDA, uma vez que a setorização estática aumenta a idade da água, o que pode reduzir a qualidade da água que chega à população, criando-se a necessidade de se otimizar parâmetros relacionados à qualidade da água (Brentan *et al.*, 2021).

Portanto, visando-se obter um processo de setorização dinâmica que desenvolva um abastecimento de água com menores perdas no período noturno e uma melhor qualidade de abastecimento de água durante os horários de maior demanda, esta pesquisa é constituída por parâmetros hidráulicos tanto de pressão, como de qualidade da água.

Como critério de qualidade de água, Marchi *et al.* (2014) propuseram a utilização do índice de idade média ponderada da água acima de limite estabelecido ( $I_{WA}$ , do inglês, *Weighted Average Water Age above Established Limit*), definido por:

$$I_{WA} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^M k_i^{(t)} q_i^{(t)} \cdot (WA_i^{(t)} - WA_{lim})}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^M q_i^{(t)}}, \quad (2.2)$$

em que  $I_{WA}$  é dado em horas;  $M$  é o tempo total de simulação;  $N$  é o número total de nós de demanda;  $WA_i^{(t)}$  é a idade da água no nó junção  $i$  no passo de tempo  $t$  (excluindo-se tanques e reservatórios);  $q_i^{(t)}$  é a demanda na junção  $i$  no passo de tempo  $t$ ;  $WA_{lim}$  é o limite de idade da água (em horas) determinado; e  $k_i^{(t)}$  representa uma variável binária, definida como 1 se a idade da água for maior ou igual ao limite, ou 0 se for menor que o limite definido.

O índice de idade média proposto trata-se de uma métrica que permite, com base na idade da água acima de um determinado limite estabelecido, estimar o tempo que a água distribuída nas tubulações da RDA demora para abastecer os nós de demanda. Salienta-se que uma das possíveis formas de definir o limite de idade da água para simplificação do cálculo do indicador hidráulico é a partir de estudos de

decaimento de cloro (BRENTAN *et al.*, 2021) ou, como realizado nesta pesquisa, por meio da obtenção da média das idades da água nas tubulações da RDA. Quanto maior o valor do índice da idade da água, pior é a qualidade da água que está abastecendo o sistema, pois, tempos de abastecimento mais longos propiciam o decaimento de cloro da água nas tubulações e eventuais contaminações através dos orifícios das fugas existentes.

Como critério hidráulico de pressão, Alhimiary e Alsuhaily (2007) apresentaram a uniformidade de pressão (*PU*, do inglês *Pressure Uniformity*) com o objetivo de caracterizar as pressões em um processo de redução de perdas de água em sistema de abastecimento via operação ótima de válvulas, a partir da equação:

$$PU = \sum_{t=1}^M \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_{i,t} - P_{min}}{P_{min}} \right) + \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{i,t} - \bar{P}_t)^2}{N}}}{\bar{P}_t} \right] \quad (2.3)$$

em que  $M$  é o tempo total de simulação;  $N$  é o número total de nós de demanda;  $P_{i,t}$  é a pressão na junção  $i$  no passo de tempo  $t$ ;  $P_{min}$  é a pressão mínima necessária para o funcionamento da rede; e  $\bar{P}_t$  é a pressão média na rede no passo de tempo  $t$ .

A *PU* tem o objetivo de padronizar a distribuição da pressão ao longo de toda a malha de distribuição de água, por meio de um indicador que determina, em geral, as diferenças entre as pressões nos nós da rede e as pressões médias e mínimas no sistema, para um determinado período de simulação hidráulica.

Portanto, quanto maior o valor de *PU*, maior é a variação de pressão nos nós de demanda da rede em relação às pressões média e mínima calculadas para o sistema. Neste contexto, ainda cabe salientar que pressões muito elevadas podem gerar uma sobrecarga de energia no sistema e permitir o rompimento de tubulações, enquanto pressões abaixo da pressão mínima operacional da rede podem limitar o abastecimento de água aos consumidores residentes em locais mais distantes dos reservatórios e em regiões de cotas mais elevadas.

Como exemplos de alguns estudos mais recentes que consideraram estas métricas em processo de setorização, salientam-se Saldarriaga *et al.* (2019) e Brentan *et al.* (2021), em que  $PU$  e  $I_{WA}$  foram empregadas como funções-objetivo a serem minimizadas após a implementação de algoritmos para otimizar operacionalmente um sistema de abastecimento de água, de modo a melhorar a qualidade da água, por meio de fechamento e abertura de válvulas, e mudanças operacionais.

Outro critério hidráulico muito utilizado para análise do desempenho hidráulico da rede após a setorização é o índice de resiliência hidráulica ( $R$ , do inglês *Resilience Index*) proposto originalmente por Todini (2000), que tem o objetivo de determinar a capacidade de uma RDA em suportar falhas e condições de sobrecarga ao sistema, mantendo o respectivo e adequado funcionamento de uma rede de abastecimento, a partir da equação:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N q_i(h_i - h_i^*)}{\sum_{R=1}^{n_r} Q_R H_R + \sum_{j=1}^{n_p} P_j / \gamma - \sum_{i=1}^N q_i h_i^*}, \quad (2.4)$$

em que  $N$  é o número total de nós de demanda,  $n_r$  é o número de reservatórios;  $n_p$  é o número de bombas da rede;  $q_i$  e  $h_i$  são a demanda e a carga hidráulica dos nós de demanda  $i$ ;  $Q_R$  e  $H_R$  são, respectivamente, a vazão e o nível do reservatório/tanque  $R$ ;  $P_j$  é a potência da bomba  $j$  no sistema;  $\gamma$  é o peso específico da água; e  $h^*$  é a carga hidráulica mínima necessária para abastecer o sistema.

Todini (2000) propôs a maximização de  $R$  e a minimização de custos de tubulações em uma rede malhada de distribuição de água, a fim de se obter um sistema de abastecimento de água eficiente hidraulicamente a partir de manutenções com menor custo possível.

Nos últimos anos, como um dos trabalhos que utilizaram  $R$  para quantificar a capacidade de RDA em suportar condições de estresse é o estudo de Qiu e Ostfeld (2020), em que  $R$  é empregado para comparar o desempenho hidráulico de uma RDA sem intervenções, após formações de setores estáticos e dinâmicos. Bianchotti *et al.* (2021) e Spizzo *et al.* (2023) empregaram  $R$  como função-objetivo para,

respectivamente, reduzir perdas de  $R$  e maximizar a robustez dos setores da rede no processo de setorização.

Vale destacar que  $R$  é um indicador importante no processo de setorização, pois traduz a potência disponível numa rede que permite o escoamento da água nas tubulações atingir caminhos alternativos quando a rede é particionada, uma vez que quando a rede é reconfigurada em novas partições, há uma redução de  $R$  (BIANCHOTTI *et al.*, 2021).

## **2.6 Lacuna do conhecimento**

Com base na revisão bibliográfica, foram identificadas três lacunas principais no conhecimento a seguir apresentadas.

### **1ª Lacuna - Exploração da teoria de grafos na criação de setores**

Em literatura há muitos estudos envolvendo a modelagem de RDA como grafos para a setorização (FANG *et al.*, 2023; LIU e LANSEY, 2020; RYAHY *et al.*, 2024) e outras finalidades, como avaliação da conectividade rede a partir do aumento de demanda (ANCHIETA *et al.*, 2023; YAZDANI; OTTO; JEFFREY, 2011), de capacidade hidráulica das tubulações (YAZDANI e JEFFREY, 2012), da análise de nós e tubulações críticas do sistema de distribuição (ALAGGIO *et al.*, 2025; MEIJER *et al.*, 2021), da vulnerabilidade da RDA à ataques cibernéticos (CHOWDHURY e BISWAS, 2022), entre outros.

Contudo, em âmbito de setorização, os trabalhos envolvem apenas a modelação recorrendo apenas a um tipo de grafo, por exemplo, o grafo ponderado, o grafo direcionado ou o grafo sem ponderações e sem direcionamentos. Deste modo, visando aplicar e explorar a representação da RDA para uma variedade de grafos em processo de setorização, neste estudo são desenvolvidos setores abordando grafos sem direcionamento e sem ponderação, grafos com arestas ponderadas pela vazão, grafos com arestas direcionadas pela vazão, e grafos com arestas ponderadas e direcionadas pela vazão.

Além das diferentes representações de uma RDA como grafo, são implementados algoritmos de detecção de comunidades consolidados em literatura, como Fast-Greedy e Louvain, para a criação de setores, o que permite a comparação do número de setores, tubulações de fronteira e conectividade dos setores para cada tipo de grafo e algoritmo utilizados.

Portanto, este trabalho explora a modelagem da RDA e a criação de setores para diferentes tipos de grafo e métodos de detecção de comunidades, evidenciando os resultados obtidos para cada proposta e, principalmente, a relevância da ponderação dos grafos por parâmetros hidráulicos, como a vazão.

## **2ª Lacuna - Abordagem e exploração de estratégias para otimização integrada de setores, operação e diâmetro de válvulas**

Até o presente momento há diversos trabalhos relacionados a metodologias de otimização de setores, como apresentados nos últimos anos em estudos de Giudicianni *et al.* (2020), Bui, Marlim e Kang (2021), Brentan *et al.* (2022) e Yu *et al.* (2022).

Entretanto, apesar de todas estas metodologias apresentadas desenvolverem setorizações com resultados ótimos em termos de custos e desempenho hidráulico, a maioria destes estudos centra-se somente na alocação dos dispositivos de controle para otimização do desempenho da RDA, não integrando a operação ótima das válvulas no processo de setorização.

Este contexto pode ser atribuído à complexidade de se integrar a otimização dos dispositivos de controle à criação de setores, haja vista as dificuldades e limitações já encontradas pelos pesquisadores em adaptar as modelagens matemático-computacionais às etapas de particionamento e otimização de setores de uma RDA.

Portanto, com intuito de propor novas estratégias que abordem a operação ótima de uma RDA junto ao processo de criação de setores, neste trabalho são desenvolvidos cenários que integram a otimização da etapa de alocação das válvulas junto à otimização da operação e do diâmetro destes dispositivos, buscando a melhoria do

desempenho hidráulico da rede. Estes cenários integrados de otimização são comparados com o cenário clássico envolvendo a otimização de setores e de operação das válvulas separadamente.

### **3ª Lacuna - Ausência de setorização dinâmica horária**

Atualmente, há uma ampla variedade de estudos relacionados à otimização de setores em RDA, no entanto, a maioria destes trabalhos consideram apenas a setorização estática durante todo o período de análise (tipicamente, 24 h). Este processo de criação de setores com configurações de válvulas estáticas durante todo o tempo pode aumentar a idade da água (BRENTAN *et al.*, 2021; GRAYMAN; MURRY; SAVIC, 2009) e gerar falhas de abastecimento de maior magnitude em casos de eventos emergenciais e anômalos, como liberações de vazões para combate a incêndio, variações inesperadas de demanda e rupturas de tubulações (KHOA BUI; MARLIM; KANG, 2020).

Apesar de existirem estudos de setorização dinâmica, como sejam Wright *et al.* (2014), Giudicianni *et al.* (2020a) e (2020b), Fu *et al.* (2022) e Shekofteh, Yousefi-Khoshqalb e Piratla (2023), todos estes trabalhos otimizaram a abertura e fechamento de válvulas somente para a solução de cenários específicos, como sejam períodos de demandas mínima, máxima e de emergência, obtendo apenas uma configuração ótima de válvulas para cada cenário.

Não existem, até à data, estudos que efetuem uma setorização dinâmica que otimize a configuração e operação de válvulas a cada passo de tempo de simulação, hora a hora, visando maximizar a eficiência do abastecimento de água. Portanto, neste trabalho tal processo é realizado a partir da otimização da redução de sobrecargas de pressão, idade da água e custos de projeto, conforme as atualizações horárias de demanda.

### 3 SETORIZAÇÃO ÓTIMA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: UMA ABORDAGEM EXPLORATÓRIA DA TEORIA DOS GRAFOS

Este capítulo é uma versão adaptada de uma publicação científica em revista internacional: ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas; MEIRELLES, Gustavo; BRENTAN, Bruno Melo. Optimal district metered areas design of water distribution systems: A comparative analysis among hybrid algorithms. **Journal of Water Process Engineering**, v. 63, p. 105472, 2024.

#### RESUMO

Ao subdividir as RDA em setores é possível regular as pressões, reduzir o tempo necessário para o abastecimento de água aos consumidores, mitigar vazamentos e alcançar uma distribuição uniforme das demandas. Esse processo de criação de setores é caracterizado por duas etapas: o particionamento do sistema e a alocação de dispositivos de controle. No entanto, a melhoria da gestão das redes de abastecimento muitas vezes só é possível por meio da alocação e operação ótimas dos dispositivos de controle nas tubulações. Nesse sentido, este estudo propõe a implementação de diferentes configurações de setores com o objetivo de minimizar custos, pressões e idade da água. Para este trabalho, foram desenvolvidos algoritmos híbridos, consistindo nos algoritmos de particionamento já estabelecidos na literatura, Fast-Greedy e Louvain, e no algoritmo de otimização PSO. Os algoritmos híbridos foram implementados nas linguagens de programação Python e Matlab. A rede *benchmark* Modena é utilizada como estudo de caso e a definição dos setores é feita a partir de otimizações mono-objetivo. Os resultados obtidos são comparados por meio de análise de critérios hidráulicos, custo, modularidade (conectividade) e frequência de válvulas alocadas às tubulações. Os algoritmos híbridos com o algoritmo Louvain conduzindo aos melhores resultados.

Palavras-chave: algoritmos híbridos; otimizações mono-objetivo; setorização; sistema de abastecimento de água; teoria de grafos.

#### 3.1 Introdução

Um dos principais problemas globais que aflige a população mundial é a falta de abastecimento de água seguro e de qualidade, agravada pela escassez hídrica. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) (2023), em 2022, 2,2 bilhões de

pessoas ainda não tinham água potável em suas casas, fornecida por uma rede de abastecimento segura. Essa realidade ainda é pior em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde mais de 30 milhões de pessoas não têm acesso a um fornecimento seguro de água potável, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (2023).

Um dos principais fatores que contribuem para a ineficiência no fornecimento seguro de água é o volume de perdas e a consequente água não faturada para os consumidores (NEGM; MA; AGGIDIS, 2023). As perdas reais (vazamentos) ou aparentes (erros de medição e consumo não autorizado) evidenciam falhas de planejamento, operação e manutenção nas RDA. A ruptura das tubulações gera perdas econômicas, físicas e ambientais, além de afetar diretamente a qualidade da água que chega aos consumidores, aumentando os riscos de doenças para a população (TAIWO; SHABAN; ZAYED, 2023).

Neste sentido, a precificação adequada da água potável sob um sistema dinâmico de oferta e demanda (POLHILL *et al.*, 2016) e a setorização da RDA podem ser considerados métodos eficazes para o controle e a detecção de perdas em um sistema de distribuição de água (DI NARDO e DI NATALE, 2011).

A criação de setores na rede de abastecimento auxilia na determinação das áreas críticas para a detecção de vazamentos e na estimativa das perdas em cada setor (ZHANG *et al.*, 2019). Além disso, uma RDA setorizada permite um gerenciamento mais eficiente das pressões nas tubulações, com a modelagem *Bottom-Up* (vazão mínima noturno) quando tem-se conhecimento direto do volume de perdas reais, e calibração do modelo pelo método *Top-Down* (balanço hídrico) (XIN *et al.*, 2014).

Di Nardo *et al.* (2020) enfatizam que a setorização em RDA é um processo que visa melhorar a gestão do sistema de abastecimento, por meio da regulação das pressões e vazões, e da minimização das perdas por vazamentos, uma vez que o gerenciamento da rede por setor é menos complexo.

De modo geral, a setorização em RDA é composta por dois processos: o particionamento da rede, com a criação de comunidades que incluem conjuntos de

nós e tubulações; e, posteriormente, a alocação de dispositivos de controle (válvulas, medidores de vazão) nas tubulações de fronteira, ou seja, tubulações que conectam e podem isolar as comunidades (DI NARDO *et al.*, 2013).

Nos últimos anos, o particionamento das RDA tem sido realizado por métodos (algoritmos) que modelam a rede a partir de representações matemáticas chamadas grafos, permitindo criar partições considerando todos os componentes que constituem o sistema de abastecimento de água (MAMBRETTI; RAIMONDI; STROPPA, 2021; SHEKOFTEH; YOUSEFI-KHOSHQALB; PIRATLA, 2023; ZHANG *et al.*, 2017). Na etapa de alocação ótima de válvulas, predominam algoritmos heurísticos de otimização, que visam minimizar ou maximizar critérios, como custos e parâmetros hidráulicos, por meio de funções-objetivo (BRENTAN *et al.*, 2021).

Os algoritmos utilizados em ambas as etapas da setorização pertencem ao campo da inteligência artificial. Atualmente, métodos avançados baseados em inteligência artificial são empregados em estudos para a modelagem de recursos em geral e, sobretudo, para garantir a equidade social, como pode ser observado em pesquisas envolvendo energia (SOVACOOOL e DWORKIN, 2015), água (OYEBODE *et al.*, 2019), educação (LENART *et al.*, 2023), espaço habitacional (FAGHIHINEJAD *et al.*, 2023) e justiça de percepção ambiental (NAEINI; MAHDIPOUR; DORRI, 2023).

Nos estudos de particionamento de RDA é possível observar algoritmos de busca que dividem os sistemas de abastecimento de acordo com a conectividade dos nós, como o *Breadth First Search* (BFS) (POHL, 1969) e o *Depth First Search* (DFS) (TARJAN, 1972), encontrados no trabalho de Perelman e Ostfeld (2012).

Existem também algoritmos baseados em técnicas espectrais de grafos (CHUNG, 1997), como no estudo de Herrera *et al.* (2010). Além disso, há algoritmos de detecção de comunidades baseados no cálculo de modularidade, como os algoritmos Fast-Greedy (CLAUSET; NEWMAN; MOORE, 2004) e Louvain (BLONDEL *et al.*, 2008), implementados por Creaco, Cunha e Franchini (2019) e Bianchotti *et al.* (2021), respectivamente. Outro exemplo é o algoritmo implementado por Bui, Marlim e Kang (2021) no qual os autores aplicaram um algoritmo de

estrutura comunitária para refinar os agrupamentos em RDA criados pelo algoritmo *Self-Organizing Map* (SOM), a partir das pressões e cotas dos nós.

Outro algoritmo de agrupamento utilizado no particionamento de RDA é o *K-Means* (LLOYD, 1982), com exemplos nos estudos de Han e Liu (2017) e Brentan *et al.* (2018). Além disso, algoritmos multiníveis (KARYPIS e KUMAR, 1998) também são encontrados na literatura de RDA, como na pesquisa de Alvisi (2015), em que o particionamento da rede foi realizado com o objetivo de criar setores de tamanhos iguais, ajustados ao número de tubulações de fronteira; e no estudo de Santonastaso *et al.* (2020), em que os autores utilizaram um particionamento multinível para agrupar nós com cotas semelhantes e, conseqüentemente, minimizar as diferenças de cotas para maior controle das pressões nas tubulações.

Entre os métodos de particionamento descritos, Siqueira (2019) afirma que os métodos de estrutura comunitária são os mais frequentemente encontrados na literatura sobre RDA, por gerarem comunidades interconectadas por menos arestas e permitirem projetos com menores custos de implementação.

Neste trabalho, são implementados os algoritmos Fast-Greedy e Louvain para o particionamento do grafo da RDA. O algoritmo Fast-Greedy foi selecionado por ser eficiente no particionamento de RDA modeladas como grafos com arestas ponderadas (LIU *et al.*, 2018). O algoritmo Louvain foi utilizado por ser reconhecido como uma versão aprimorada do Fast-Greedy, gerando comunidades com conectividade ainda maior.

Nesta pesquisa, são comparados os particionamentos realizados pelos algoritmos Fast-Greedy e Louvain em relação ao número de comunidades formadas, tubulações de fronteira e valores de modularidade. Adicionalmente, devido à escassez de estudos que exploram a modelagem de RDA como diferentes tipos de grafos, neste trabalho considera-se a modelagem do sistema de abastecimento como grafos: não direcionados e não ponderados, não direcionados e ponderados, direcionados e não ponderados, e direcionados e ponderados. Os algoritmos de detecção de comunidades são avaliados de acordo com cada tipo de grafo.

Após o particionamento, o estudo centra-se na alocação ótima de válvulas, considerando a otimização de parâmetros hidráulicos e dos custos. Nessa etapa, geralmente são implementados algoritmos de otimização multiobjetivo, para buscar as melhores soluções para os problemas. Segundo Kumar e Yadav (2022), nos últimos anos as técnicas metaheurísticas têm sido amplamente aplicadas na resolução de problemas multiobjetivo relacionados aos recursos hídricos, contribuindo para estudos de calibração de modelos, operação e gestão de redes de abastecimento.

Além disso, é importante destacar que algoritmos baseados em redes neurais convolucionais (MEHRBAN e AHADIAN, 2023) e *Q-Learning* (HASANBEIG e PAVEL, 2017) também têm sido empregados em estudos relacionados à detecção múltipla de vazamentos (FANG *et al.*, 2019) e à operação ótima de RDA (GENG *et al.*, 2023), respectivamente.

No entanto, devido à maior complexidade e ao alto número de objetivos em projetos ótimos de RDA, os algoritmos de otimização mais utilizados nas últimas duas décadas na literatura sobre operação ótima de sistemas de abastecimento de água são os chamados algoritmos evolucionários (JOHNS; KEEDWELL; SAVIC, 2020). Segundo Sörensen e Glover (2013), os algoritmos evolucionários são os membros mais importantes da classe de algoritmos baseados em métodos populacionais, pois buscam resolver problemas a partir dos princípios da evolução natural.

Algoritmos evolucionários, como os algoritmos genéticos e os algoritmos de evolução diferencial, juntamente com a aplicação de redes neurais artificiais, têm sido amplamente implementados em estudos relacionados com a previsão e gestão da demanda de água (OYEBODE *et al.*, 2019). Para o processo de setorização, alguns exemplos de trabalhos recentes são os de Kourbasis *et al.* (2020) e Zeidan, Li e Ostfeld (2021), que consideraram algoritmos genéticos para resolver problemas de otimização na etapa de alocação de válvulas, com foco na minimização da idade da água e na melhoria do gerenciamento de pressões na rede. Mais recentemente, Sharma, Dongre e Gupta (2023) também implementaram algoritmos genéticos para otimizar custo operacional, pressão média, idade da água, índice de resiliência,

desvio de pressão, custo de projeto e déficit de demanda no processo de setorização.

Além dos algoritmos genéticos, um dos algoritmos de otimização mais populares na etapa de alocação de válvulas e utilizado neste trabalho, é o algoritmo PSO (KENNEDY e EBERHART, 1995). O PSO é amplamente aplicado em estudos sobre a criação e operação ótima de setores em RDA. Em estudo recente, Brentan *et al.* (2022) utilizaram o PSO para otimizar o processo de alocação e operação de válvulas, buscando parâmetros como resiliência, uniformidade de pressão e idade da água. Da mesma forma, Novarini *et al.* (2019) aplicaram o PSO para criar setores ideais em uma rede de abastecimento, alocando válvulas em tubulações para minimizar custos e melhorar o gerenciamento das pressões no sistema.

Entretanto, apesar dos inúmeros estudos sobre a implementação de algoritmos de otimização na etapa de alocação de válvulas, ainda são poucos os trabalhos que consideram a análise da qualidade da água juntamente com outros parâmetros hidráulicos, devido ao caráter conflitante desses parâmetros e à complexidade da otimização relacionada à qualidade da água (MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017). Além disso, a literatura sobre RDA também apresenta poucos estudos comparativos entre os algoritmos de estrutura comunitária Fast-Greedy e Louvain.

Neste estudo são desenvolvidos dois algoritmos híbridos, Fast-Greedy-PSO e Louvain-PSO, com o objetivo de compará-los, determinando suas respectivas vantagens e desvantagens no processo de setorização de uma RDA. Nesta pesquisa, os setores são criados por meio de um processo de otimização que busca, separadamente, minimizar os custos totais de alocação de válvulas ( $CV$ ), a uniformidade de pressão ( $PU$ , do inglês *Pressure Uniformity*) (ALHIMIARY e ALSUHAILY, 2007) e o índice de idade média ponderada da água acima de limite estabelecido ( $I_{WA}$ , do inglês *Weighted Average Water Age above Established Limit*) (MARCHI *et al.*, 2014). Além disso, esses critérios hidráulicos também são avaliados em conjunto com a resiliência hidráulica ( $R$ ) (TODINI, 2000), para avaliar o desempenho hidráulico da rede de abastecimento.

## 3.2 Material e métodos

### 3.2.1 Metodologia proposta

A metodologia apresentada neste trabalho é composta por duas etapas, a setorização da RDA em comunidades (setores) e a determinação da localização ótima das válvulas de controle (entradas) dos setores. A etapa de setorização é desenvolvida utilizando os algoritmos Fast-Greedy e Louvain. O algoritmo PSO é aplicado para a alocação ótima de válvulas nos tubos de fronteira identificados.

No caso do algoritmo Fast-Greedy, a RDA é modelada como: um grafo simples, ou seja, com arestas não ponderadas e não direcionadas; um grafo com arestas não direcionadas, mas ponderadas pela vazão; um grafo com arestas direcionadas pela vazão e não ponderadas; e um grafo com arestas direcionadas e ponderadas pela vazão.

Enquanto isso, para a setorização realizada pelo algoritmo Louvain, a RDA é modelada apenas como grafo simples e como grafo não direcionado e ponderado pela vazão. Não foi possível particionar os grafos direcionados com o algoritmo Louvain porque a biblioteca NetworkX (HAGBERG; SWART; CHULT, 2008), na linguagem de programação Python, não possibilita essa operação. As abreviaturas correspondentes aos algoritmos híbridos implementados estão apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Abreviaturas dos nomes dos algoritmos híbridos.**

<b>Abreviatura</b>	<b>Algoritmo Híbrido</b>
FGDP-PSO	Fast-Greedy-PSO para grafo direcionado e ponderado pela vazão
FGD-PSO	Fast-Greedy-PSO para grafo somente direcionado pela vazão (sem ponderação das arestas)
FGP-PSO	Fast-Greedy-PSO para grafo somente ponderado pela vazão (sem direcionamento das arestas)
FGS-PSO	Fast-Greedy-PSO para grafo não-direcionado e não-ponderado
LOUP-PSO	Louvain-PSO para grafo somente ponderado pela vazão (sem direcionamento das arestas)
LOUS-PSO	Louvain-PSO para grafo não-direcionado e não-ponderado

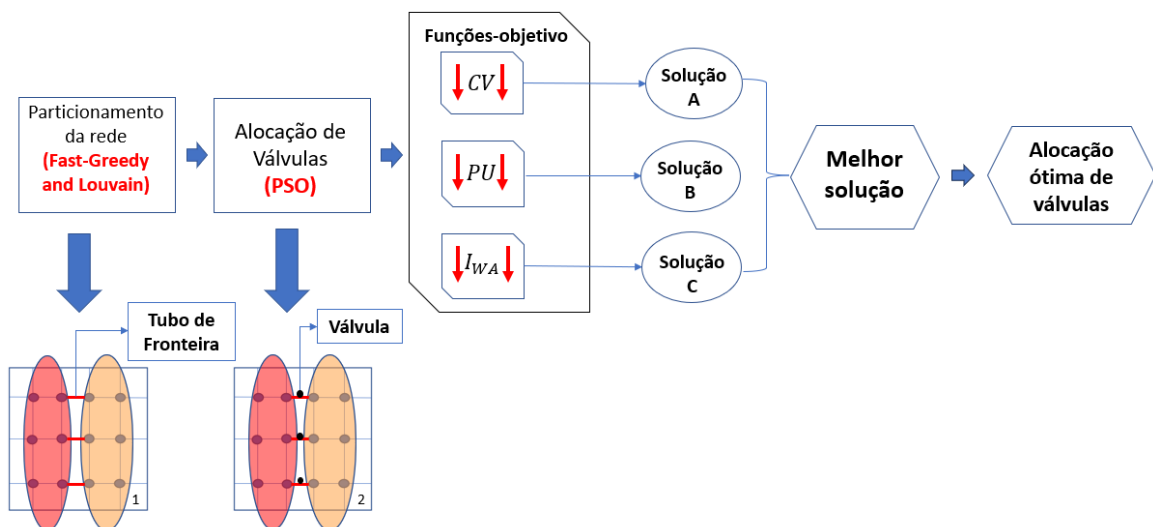
Fonte: Autor da tese (2025).

Com base no desenvolvimento dos algoritmos híbridos (Fast-Greedy-PSO e Louvain-PSO) apresentados na Tabela 3.1, os melhores conjuntos de soluções foram determinados por meio dos diferentes processos de otimização empregados para adaptar a criação de setores na RDA.

No caso, foram realizadas três otimizações mono-objetivo visando à minimização dos parâmetros  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$  em que as melhores soluções foram analisadas de acordo com a modelagem (tipo de grafo) realizada e com o algoritmo híbrido utilizado.

São determinadas as melhores soluções que atendem a um único objetivo: a maximização do desempenho hidráulico do abastecimento e a minimização dos custos de instalação de válvulas. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma geral da metodologia utilizada nesta pesquisa.

**Figura 3.1 – Fluxograma ilustrando o processo metodológico.**



Fonte: Autor da tese (2025).

Conforme mostrado no fluxograma da Figura 3.1,  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$  são as funções-objetivo a serem minimizadas ao longo do processo de otimização. Ao realizar as otimizações mono-objetivo,  $CV$ ,  $PU$ ,  $I_{WA}$  e  $R$  são calculados como critérios hidráulicos a fim de avaliar o impacto da otimização na qualidade do abastecimento de água.

Nas próximas subseções, são apresentados os algoritmos de setorização e de alocação de válvulas utilizados nesta pesquisa. Os algoritmos são desenvolvidos a partir da interface do software EPANET 2.2 (ROSSMAN *et al.*, 2020) com as bibliotecas Python: *NetworkX* e *Water Network Tool for Resilience (WNTR)* (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018), versão 0.3.0, para a setorização do grafo da rede; e com o software MATLAB, para a alocação ótima de válvulas (ELIADES, 2016).

### 3.2.2 Teoria de grafos aplicada às redes de distribuição de água

Um grafo ( $G$ ) é definido como um conjunto de objetos  $V = \{v_1, v_2, \dots\}$ , chamados de vértices ou nós, conectados por outro conjunto de objetos  $E = \{e_1, e_2, \dots\}$  chamados de arestas ou ligações, que matematicamente pode ser expresso pela Eq. (2.1).

Nesta pesquisa, foram considerados quatro tipos de grafos (grafo simples com arestas não ponderadas e não direcionadas; grafos com arestas não direcionadas, mas ponderadas pela vazão; grafos com arestas direcionadas pela vazão e não ponderadas; e grafos com arestas direcionadas e ponderadas pela vazão).

Vale ressaltar que os grafos ponderados e direcionados pela vazão são representados por matrizes de ponderação ( $W = [w_{ij}]$ ) com  $V$  vértices distribuídos igualmente nas linhas ( $i$ ) e colunas ( $j$ ), onde  $w_{ij} > 0$  para vértices conectados pelo fluxo de água e, caso contrário,  $w_{ij} = 0$ . É importante destacar que, no caso dos grafos das RDA, os vértices correspondem aos nós de demanda, reservatórios e tanques, enquanto as tubulações, bombas e válvulas são representadas pelas arestas (PERELMAN e OSTFELD, 2012).

### 3.2.3 Particionamento da rede de distribuição de água

#### 3.2.3.1 Algoritmo *Fast-Greedy*

O algoritmo de detecção de comunidades *Fast-Greedy* é utilizado para realizar a partição do grafo com base em uma análise topológica de modularidade ( $M$ ), ou seja, por meio de uma medida que quantifica a conectividade do grafo da rede (CLAUSET; NEWMAN; MORRE, 2004). A  $M$  é definida pela Eq. (3.1) (NEWMAN e GIRVAN, 2004; NEWMAN, 2004; REICHARDT e BORNHOLDT, 2006):

$$M = \frac{1}{2n_e} \sum_{i=1}^{n_n} \sum_{j=1}^{n_n} \left( a_{ij} - \gamma \frac{k_i k_j}{2n_e} \right) \delta(c_i, c_j), \quad (3.1)$$

onde  $n_e$  e  $n_n$  são, respectivamente, o número total de arestas e de nós na rede;  $a_{ij}$  representa a ponderação da aresta que conecta os nós  $i$  e  $j$ ;  $\gamma$  é o parâmetro de resolução que, quando maior que 1, tende a favorecer a criação de comunidades menores, enquanto valores de resolução inferiores a 1 tendem a desenvolver comunidades maiores;  $\frac{k_i k_j}{2n_e}$  é a probabilidade de uma aresta conectar os nós  $i$  e  $j$ ;  $c_i$  e  $c_j$  são as comunidades ou partições às quais os nós  $i$  e  $j$  pertencem, sendo que  $\delta(c_i, c_j) = 1$  se ambos os nós pertencem à mesma comunidade, caso contrário  $\delta(c_i, c_j) = 0$ .

Ao aumentar a modularidade, a conexão entre os nós pertencentes à mesma comunidade também aumenta, enquanto a conexão entre diferentes comunidades é reduzida (LIU *et al.*, 2018). O valor máximo da modularidade é 1, e quanto maior o valor da modularidade, melhor é o particionamento da rede (NEWMAN, 2004). De maneira geral, quanto maior a modularidade, maiores são as conexões entre os nós das comunidades.

### 3.2.3.2 Algoritmo Louvain

De acordo com Blondel *et al.* (2008), o algoritmo de detecção de comunidades Louvain também utiliza o conceito de modularidade, mas é desenvolvido por meio de um processo iterativo em duas etapas. Dado um grafo com  $n_n$  nós, o algoritmo começa assumindo que cada nó é uma comunidade, onde, através da conexão do nó  $i$  com cada nó vizinho  $j$ , é calculado um aumento máximo e positivo da modularidade ( $\Delta M$ ).

Portanto, também se assume que o nó vizinho  $j$  maximiza o ganho de modularidade proveniente do particionamento da rede, pois ao unir os nós, formam-se comunidades com maior número de nós e, conseqüentemente, maior conectividade. Se a variação de  $\Delta M$  não for positiva, o nó  $i$  deve permanecer em sua comunidade de origem.

Esta primeira parte do processo iterativo termina apenas quando não for mais possível aumentar a modularidade. Esse aumento de modularidade,  $\Delta M$ , é dado pela Eq. (3.2):

$$\Delta M = \left\{ \left[ \frac{\sum_{k_{i,C}} + 2k_{i,C}}{2n_w} - \left( \frac{\sum_{ent,C} + k_i}{2n_w} \right)^2 \right] - \left[ \frac{\sum_{k_{i,C}}}{2n_w} - \left( \frac{\sum_{ent,C}}{2n_w} \right)^2 - \left( \frac{k_i}{2n_w} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3.2)$$

em que  $\sum_{k_{i,C}}$  é a soma dos pesos das arestas pertencentes à comunidade C;  $\sum_{ent,C}$  é a soma dos pesos das arestas incidentes aos nós da comunidade C;  $k_{i,C}$  é a soma dos pesos das arestas que conectam o nó  $i$  aos nós localizados na comunidade C;  $k_i$  é a soma dos pesos das arestas conectadas ao nó  $i$ ; e  $n_w$  é a soma dos pesos de todas as arestas do grafo.

Subsequentemente, a segunda etapa da iteração é caracterizada pela construção de um novo grafo, no qual as comunidades formadas na etapa anterior se tornam novos nós que são novamente agregados. O processo iterativo é encerrado quando não há mais ganho positivo de modularidade ( $\Delta M > 0$ ), caracterizando a convergência do algoritmo

No entanto, como o parâmetro de resolução ( $\gamma$ ) é utilizado na implementação do algoritmo Louvain durante a etapa de particionamento, a seguir é apresentada a equação simplificada da modularidade envolvendo esse parâmetro (REICHARDT e BORNHOLDT, 2006; TRAAG; WALTMAN; VAN ECK, 2019):

$$M_s = \frac{1}{2n_w} \sum_C \left( e_C - \frac{\gamma K_C^2}{2n_w} \right), \quad (3.3)$$

em que  $e_C$  é a soma dos pesos das arestas localizadas na comunidade C; e  $K_C$  é a soma dos graus dos nós na comunidade C. Ao rederivar a expressão do ganho de modularidade (Eq. 3.2) a partir da definição generalizada de modularidade com parâmetro de resolução (Eq. 3.3), obtém-se:

$$\Delta M = \frac{k_{i,C}}{2n_w} - \gamma \frac{k_i \sum_{ent,C}}{(2n_w)^2}. \quad (3.4)$$

### 3.2.4 Otimização de alocação de válvulas

Após a implementação dos algoritmos de particionamento, a pesquisa centra-se nas otimizações mono-objetivo para a alocação de válvulas realizada utilizando o algoritmo PSO. O objetivo é determinar qual a localização ótima as Válvulas de Controle de Vazão (*VCV*) e as Válvulas de Isolamento (*VI*) nos tubos de fronteira, por forma a minimizar, única e separadamente, os custos, a idade da água e as variações de pressão nas tubulações da RDA.

A idade da idade da água nas tubulações é uma métrica importante porque está diretamente relacionada com a qualidade da água para os consumidores, uma vez que menores tempos da água nas tubulações estão associados a menores velocidades e, conseqüentemente, menores decaimento do cloro residual nas tubulações (BRENTAN *et al.*, 2021).

As variações de pressão nos nós permitem avaliar se um sistema de distribuição de água está sujeito a pressões muito elevadas e a pressões abaixo dos valores mínimos regulamentares para assegurar o abastecimento. Neste contexto, é importante destacar que as *VCV* são responsáveis por limitar as vazões dos reservatórios e tanques à demanda, regular o sistema e facilitar a detecção de vazamentos.

Neste estudo, quando o algoritmo PSO é processado, as *VCV* e *VI* são instaladas e ajustadas de acordo com a minimização, separadamente, das seguintes três funções-objetivo:

a)  $F0_1$  = custo total de alocação de válvulas (*CV*):

$$F0_1 = \text{Min } CV = \text{Min} \left( \sum_{i=1}^{n_{VCV}} CV_{VCV,i} + \sum_{i=1}^{n_{VI}} CV_{VI,i} \right), \quad (3.5)$$

em que  $n_{VCV}$  e  $n_{VI}$  são, respectivamente, o número total de *VCV* e *VI* instaladas,  $CV_{VCV,i}$  é o custo da *VCV* instalada no tubo  $i$ , e  $CV_{VI,i}$  é o custo de *VI* alocada no tubo  $i$ . Além disso, se o tubo  $i$  tem somente *VCV*,  $CV_{VI,i} = 0$ ; ao contrário,  $CV_{VCV,i} = 0$ . Os custos das *VCV* e *VI* são baseados nos cálculos disponíveis no manual de

instruções referente à *Battle of Intermittent Water Supply* (BIWS) (WDSA/CCWI Committee, 2022):

$$CV_{VCV} = 275000 \left( \frac{D}{1000} \right)^{2.1}, \quad (3.6)$$

$$CV_{VI} = 99000 \left( \frac{D}{1000} \right)^{2.16}, \quad (3.7)$$

em que,  $D$  é o diâmetro (mm) da tubulação de fronteira onde os dispositivos de controle são instalados e os custos das novas válvulas estão em €/unidade.

b)  $FO_2$  = uniformidade de pressão adaptada ( $PU$ ) (ALHIMIARY e ALSUHAILY, 2007):

$$FO_2 = \text{Min } PU = \text{Min} \sum_{t=1}^M \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_{i,t} - P_{min}}{P_{min}} \right) + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{i,t} - \bar{P}_t)^2}{N \bar{P}_t}} \right] \quad (3.8)$$

em que  $M$  é o tempo total de simulação;  $N$  é o número total de nós de demanda;  $P_{i,t}$  é a pressão na junção  $i$  no passo de tempo  $t$ ;  $P_{min}$  é a pressão mínima necessária para o funcionamento da rede; e  $\bar{P}_t$  é a pressão média na rede no passo de tempo  $t$ .

c)  $FO_3$  = índice de idade média ponderada da água acima de limite estabelecido ( $I_{WA}$ ) (MARCHI *et al.*, 2014):

$$FO_3 = \text{Min } I_{WA} = \text{Min} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^M k_i^{(t)} q_i^{(t)} (WA_i^{(t)} - WA_{lim})}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^M q_i^{(t)}}, \quad (3.9)$$

em que  $I_{WA}$  é dado em horas;  $M$  é o tempo total de simulação;  $N$  é o número total de nós de demanda;  $WA_i^{(t)}$  é a idade da água no nó junção  $i$  no passo de tempo  $t$  (excluindo-se tanques e reservatórios);  $q_i^{(t)}$  é a demanda na junção  $i$  no passo de tempo  $t$ ;  $WA_{lim}$  é o limite de idade da água (em horas) determinado; e  $k_i^{(t)}$  representa uma variável binária, definida como 1 se a idade da água for maior ou igual ao limite, ou 0 se for menor que o limite definido.

Além das funções-objetivo, no processo de alocação ótima de válvulas, devem ser consideradas restrições operacionais e, neste trabalho, a pressão operacional mínima nos nós de demanda é considerada como uma restrição. Assim, como este é um problema de otimização e um algoritmo heurístico é utilizado para encontrar soluções, a restrição referente à pressão mínima da rede é tratada por uma função de penalidade (*PEN*):

$$PEN = \delta |P_{i,t} - P_{min,i}|, \quad (3.10)$$

em que  $P_{min,i}$  é a pressão mínima operacional se o nó  $i$  possui demanda (se não possui demanda,  $P_{i,t} = 0$ ), e  $\delta$  é o coeficiente de penalização, responsável por elevar o valor *fitness* de uma solução que viola a pressão mínima operacional da rede.

### 3.2.5 Otimização por Enxame de Partículas

Jain *et al.* (2022) descrevem o algoritmo PSO como uma técnica meta-heurística (estratégia de busca dentro de um espaço com população conhecida) para resolver problemas de otimização, baseada na simulação do comportamento social das abelhas em um enxame para alcançar o alvo alimentar.

Esse comportamento é caracterizado pela mudança contínua e atualização das posições entre os membros do enxame, que buscam a melhor posição para si mesmos e para o enxame, para atingir o objetivo final. Assim, assumindo que o problema a ser otimizado possui  $D$  dimensões e analisando uma partícula  $i$ , a posição dessa partícula  $x_i$  é determinada por um vetor com  $D$  coordenadas, onde  $x_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, \dots, x_{i,D})$  e a velocidade dessa partícula também pode ser definida por um vetor de  $D$  posições, em que cada componente do vetor  $v_i$  representa a velocidade da partícula  $i$  na coordenada  $D$ , de modo que  $v_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, v_{i,3}, \dots, v_{i,D})$ .

As posições de cada partícula ( $x_{i,1}$ ) são inicialmente aleatorizadas e fornecem a solução da iteração inicial. Em seguida, cada partícula da população se move com base na comparação das posições que já alcançou ("memória") e na sua respectiva experiência coletiva. Portanto, o algoritmo funciona de modo que partículas distantes

da melhor solução se aproximam e, durante a comparação, a melhor posição  $i$  é armazenada em um vetor chamado  $lbest$ , que representa a melhor solução local, expressa como  $l_i^t = (l_{i,1}, l_{i,2}, l_{i,3}, \dots, l_{i,Z})$  e as melhores soluções do enxame  $gbest$  são armazenadas em um vetor  $g^t = (g_1, g_2, g_3, \dots, g_Z)$ . O processo de busca pelas melhores soluções que caracteriza o comportamento do enxame de partículas é definido pelas Eq. (3.11) e (3.12):

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 \frac{(x_i^t - l_i^t)}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{(x_i^t - g^t)}{\Delta t}, \quad (3.11)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \Delta t, \quad (3.12)$$

em que  $i = 1, 2, 3, \dots, Z$  e  $Z$  representa o número total de partículas no enxame;  $r_1$  e  $r_2$  representam valores aleatórios distribuídos em  $[0,1]$ , que têm como objetivo aumentar a diversidade de opções de solução e, simultaneamente, tentar cobrir uma maior porção do espaço de busca, evitando assim mínimos locais;  $c_1$  é o coeficiente cognitivo da partícula, que contém informações sobre as melhores posições já experimentadas pela partícula  $i$ ;  $c_2$  é o coeficiente social da partícula, que contém informações sobre as melhores posições já experimentadas pelo grupo de partículas; e  $\omega$  é o coeficiente de inércia, responsável por ponderar as velocidades das partículas.

Neste estudo, a setorização da RDA com base na implementação do algoritmo PSO é realizada de tal forma que os dispositivos de controle atuam como partículas, buscando a melhor posição nas tubulações de fronteira entre os setores.

### 3.2.6 Critérios de desempenho hidráulico

Os critérios hidráulicos selecionados para caracterizar a eficiência, qualidade do abastecimento e resiliência da RDA são o índice de idade da água,  $I_{WA}$  (Eq. 3.9), a uniformidade de pressão  $PU$  adaptada (Eq. 3.8) e a resiliência hidráulica,  $R$  (Eq. 2.4). O índice  $R$  determina a capacidade da RDA de resistir a falhas e condições de sobrecarga nas tubulações, mantendo o correto funcionamento do abastecimento de água (TODINI, 2000).

Considerando que  $PU$  e  $R$  são parâmetros relacionados com as pressões na rede, é de salientar que o índice  $R$  não foi considerado como função-objetivo, pois, quando a  $PU$  é minimizada, simultaneamente o  $R$  também é reduzido. Esse contexto ocorre devido à minimização da  $PU$  gerar maiores perdas de carga nas RDA, o que reduz o valor de  $R$ .

As variações nos resultados relacionadas aos critérios de desempenho hidráulico foram analisadas a partir da média ( $\bar{x}$ ) e do desvio padrão ( $STD$ ) do conjunto de dados obtido para cada parâmetro.

### 3.2.7 Análise de frequência de tubulações com válvulas alocadas

A análise de frequência de tubulações com válvulas alocadas é importante porque permite determinar as tubulações mais selecionadas pelos algoritmos de particionamento como tubulações de fronteira e caracterizar os resultados relacionados aos custos de projeto para a criação de setores otimizados.

As frequências das tubulações com válvulas alocadas foram calculadas pela relação entre a quantidade de válvulas alocadas na tubulação avaliada e o número de soluções ótimas, considerando toda a modelagem implementada, de acordo com o tipo de válvula e cada algoritmo de detecção de comunidades. Em sequência, são apresentadas as equações utilizadas para calcular as frequências das tubulações com válvulas:

- $VCV$  e  $VI$  alocadas pelo algoritmo híbrido Fast-Greedy-PSO:

$$f_{X,Y_{FG}} = \frac{TS_{X,Y_{FG}}}{S_{Y,FGDP-PSO} + S_{Y,FGD-PSO} + S_{Y,FGP-PSO} + S_{Y,FGS-PSO}} \times 100, \quad (3.13)$$

em que  $X$  é o ID da tubulação,  $Y$  é o tipo de válvula alocada ( $VCV$  ou  $IV$ ),  $S_{Y,FGDP-PSO}$  é a soma de soluções ótimas com  $Y$  alocadas no grafo de arestas direcionadas e ponderadas pela vazão,  $S_{Y,FGD-PSO}$  é a soma de soluções ótimas com  $Y$  alocadas no grafo de arestas não ponderadas e direcionadas pela vazão,  $S_{Y,FGP-PSO}$  é a soma de soluções ótimas com  $Y$  alocadas no grafo de arestas não direcionadas e ponderadas

pela vazão,  $S_{Y,FGS-PSO}$  é a soma de soluções ótimas com  $Y$  alocadas no grafo de arestas não direcionadas e não ponderadas pela vazão,  $TS_{X,Y_{FG}}$  é o total de soluções ótimas em que a tubulação  $X$  possui  $Y$  alocada e, finalmente,  $f_{X,Y_{FG}}$  é a frequência (%) em que a tubulação  $X$  tem o tipo de válvula  $Y$  alocada para o algoritmo de detecção de comunidades Fast-Greedy.

- $VCV$  e  $VI$  alocadas pelo algoritmo híbrido Louvain-PSO:

$$f_{X,Y_{LOU}} = \frac{TS_{X,Y_{LOU}}}{(S_{Y,LOUP-PSO} + S_{Y,LOUS-PSO})} \times 100, \quad (3.14)$$

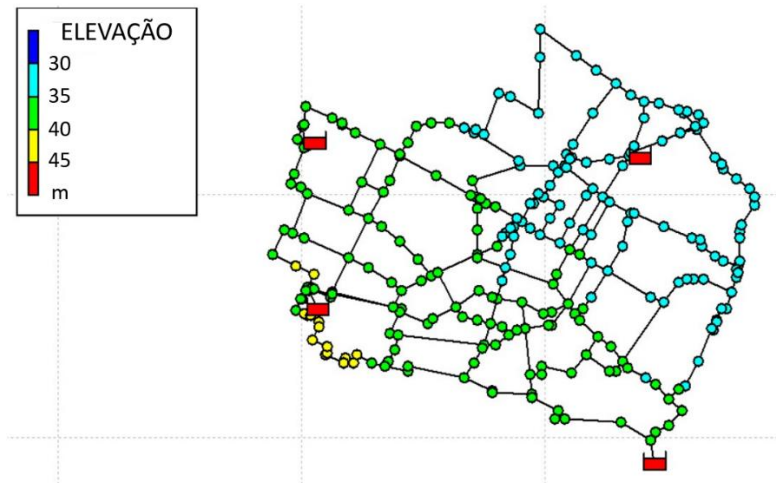
em que  $S_{Y,LOUP-PSO}$  é a soma de soluções ótimas com  $Y$  alocadas no grafo de arestas não direcionadas e ponderadas pela vazão,  $S_{Y,LOUS-PSO}$  é a soma de soluções ótimas com  $Y$  alocadas no grafo de arestas não direcionadas e não ponderadas pela vazão,  $TS_{X,Y_{LOU}}$  é o total de soluções ótimas em que a tubulação  $X$  possui  $Y$  alocada e,  $f_{X,Y_{LOU}}$  é a frequência (%) em que a tubulação  $X$  tem o tipo de válvula  $Y$  alocada para o algoritmo de detecção de comunidades Louvain.

### 3.3 Estudo de caso

Neste trabalho, a metodologia proposta é aplicada à rede Modena, uma rede de *benchmark* extraída de uma cidade de médio porte na região da Emilia-Romagna, no norte da Itália (BRAGALLI *et al*, 2012). A rede Modena tem quatro reservatórios, 268 nós de demanda e 317 tubulações, cobrindo uma área de 183,2 km<sup>2</sup> e com demanda média diária de água em de 406,94 L/s.

A rede Modena é utilizada para facilitar o desenvolvimento desta pesquisa e a validação da metodologia adotada, pois é uma rede com poucos nós e tubulações em comparação com outras redes da bibliografia, não exigindo alto desempenho computacional para executar múltiplas simulações e otimizações. Apresenta-se na Figura 3.2 a rede Modena com indicação dos patamares de cotas topográficas dos nós.

**Figura 3.2 – Rede benchmark Modena.**



Fonte: Autor da tese (2025).

### 3.4 Resultados e discussões

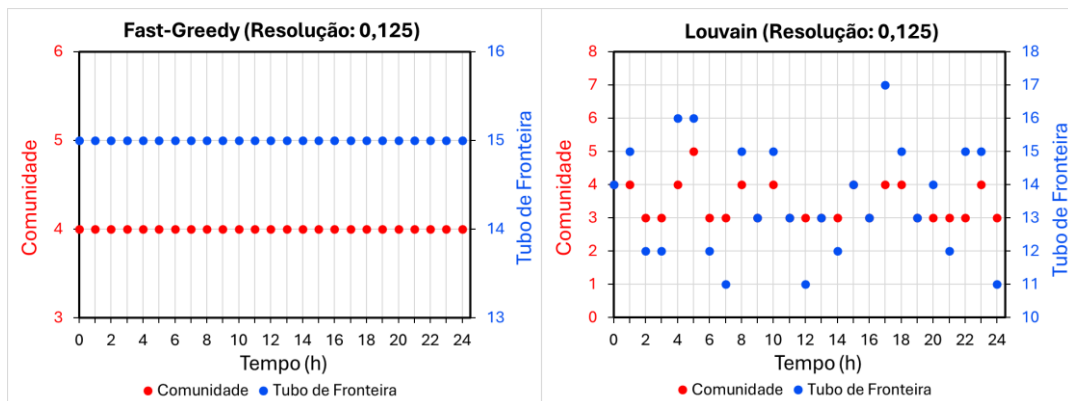
Esta seção está organizada em três seções, que correspondem aos resultados de particionamento, alocação ótima de válvulas e análise de frequência das tubulações com válvulas alocadas. Destaca-se que os resultados obtidos são específicos para a rede Modena e não podem ser generalizados para redes maiores ou que incluam outros componentes como sejam sistemas elevatórios.

#### 3.4.1 Particionamento da rede de distribuição de água

Os resultados de particionamento foram obtidos a partir da simulação hidráulica num período de 24 horas. Para cada hora, foi gerada uma configuração de comunidades e tubulações de fronteira e, conseqüentemente, o valor da modularidade correspondente a cada configuração foi avaliado. Neste sentido, é importante destacar que os grafos com arestas ponderadas ou direcionadas pela vazão, extraídos da RDA, foram obtidos de acordo com os fluxos nas tubulações para cada hora de simulação.

Na Figura 3.3 apresenta-se a comparação dos resultados obtidos através dos grafos com arestas não ponderadas e não direcionadas para os algoritmos Fast-Greedy e Louvain, em relação ao número de comunidades resultantes e ao número de tubulações de fronteira. Os dados são analisados ao longo de um período de 24 horas.

**Figura 3.3 – Resultados relacionados ao número de comunidades e tubulações de fronteira para grafos com arestas não direcionadas e não ponderadas.**



Fonte: Autor da tese (2025).

Comparando os resultados dos algoritmos Fast-Greedy e Louvain, é possível observar que os resultados gerados pelo Fast-Greedy são compatíveis com a teoria dos grafos, uma vez que nenhuma informação é atribuída às arestas, o que determina valores constantes para as tubulações de fronteira e para as comunidades.

No entanto, no caso do algoritmo Louvain, os valores dos parâmetros avaliados apresentaram variações, caracterizando uma sensibilidade do algoritmo às variações do grafo e ao parâmetro de resolução ( $\gamma$ ).

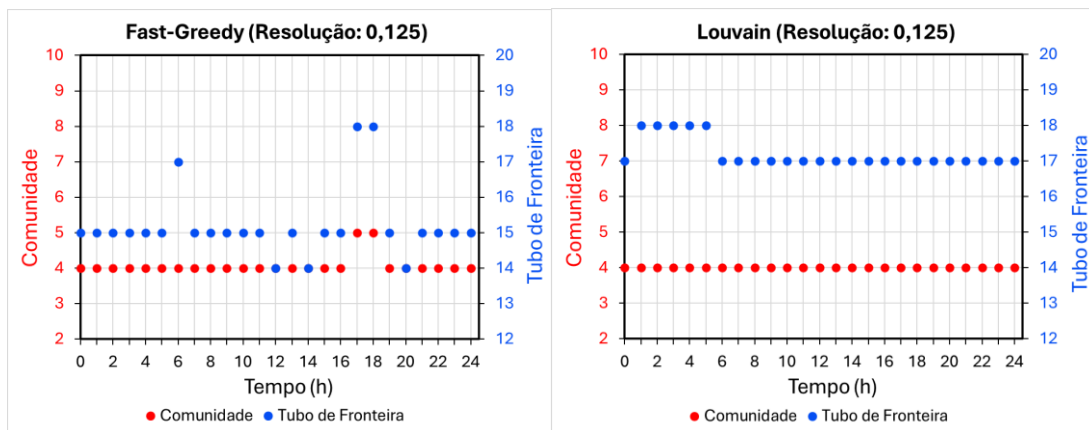
É importante notar que o mesmo valor ( $\gamma = 0,125$ ) desse parâmetro de resolução é atribuído a ambos os algoritmos de particionamento em todos os casos. O parâmetro de resolução é importante na criação de comunidades, pois quanto maior o seu valor, mais comunidades com menor número de nós existem e, ao contrário, menos comunidades com maior quantidade de nós são desenvolvidas.

Deste modo, analogamente aos projetos ótimos de setorização de RDA, o valor atribuído ao parâmetro de resolução influencia também nos custos de projeto, pois um menor número de comunidades (setores) tende a gerar um menor número de tubulações de fronteira, o que possivelmente reduz o custo do projeto.

Na Figura 3.4 comparam-se os resultados obtidos por grafos com arestas não direcionadas e ponderadas pela vazão para os algoritmos Fast-Greedy e Louvain, em relação ao número de comunidades resultantes e às tubulações de fronteira.

Vale destacar que quatro comunidades são obtidas pelo algoritmo Fast-Greedy às 12h, 14h e 20h e, portanto, os pontos no gráfico estão apenas sobrepostos ao número de 14 tubulações de fronteira encontrado nestes passos de tempo pelo algoritmo.

**Figura 3.4 – Resultados relacionados ao número de comunidades e tubulações de fronteira para grafos com arestas não direcionadas e ponderadas pela vazão.**



Fonte: Autor da tese (2025).

Observando os resultados apresentados para grafos com arestas ponderadas pela vazão para o algoritmo Fast-Greedy, pode-se notar que o número de comunidades e de tubulações de fronteira apresentam pouca variação. Além disso, a implementação do Louvain gera um número constante de comunidades, variando apenas as tubulações de fronteira. Tais fatos podem ser atribuídos à homogeneidade dos valores vazões ao longo da rede Modena e também pelos grafos extraídos da rede não considerar o direcionamento das arestas.

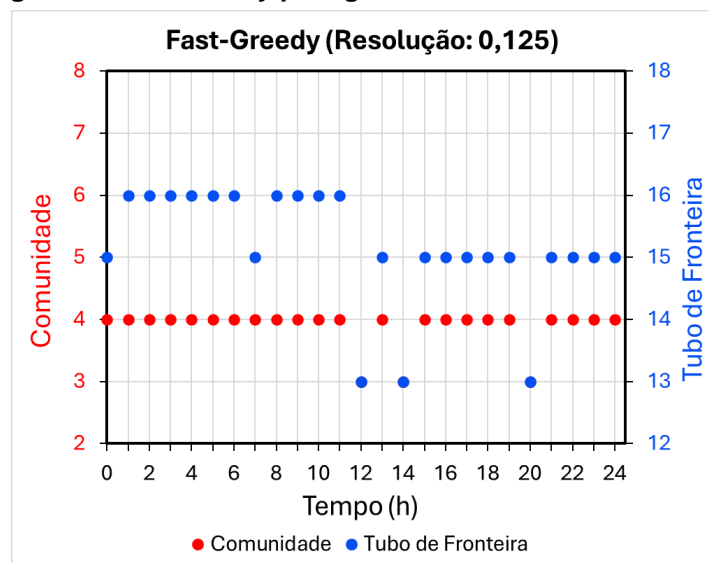
As variações entre o número de comunidades e as tubulações de fronteira ao longo do período de simulação podem ser atribuídas aos diferentes processos matemáticos de maximização da modularidade estabelecidos por cada algoritmo e devido ao algoritmo Louvain consistir em duas etapas de iteração para a criação das

comunidades, enquanto o algoritmo Fast-Greedy contempla apenas um processo de iteração.

No caso de grafos direcionados e não ponderados, e de grafos com arestas direcionadas e ponderadas pela vazão, apenas resultados relacionados ao algoritmo Fast-Greedy foram obtidos. Não foi possível particionar os grafos com arestas direcionadas pelo algoritmo Louvain, devido à impossibilidade de implementar o Louvain considerando grafos direcionados na biblioteca NetworkX.

Na Figura 3.5 apresenta-se o gráfico relacionando o número de comunidades e tubulações de fronteira obtidos ao longo de um período de 24 horas pelo Fast-Greedy para grafos direcionados.

**Figura 3.5 – Resultados relacionados ao número de comunidades e tubulações de fronteira obtidos pelo algoritmo Fast-Greedy para grafos com arestas direcionadas pela vazão.**



Fonte: Autor da tese (2025).

Observando os resultados apresentados na Figura 3.5, vale notar que o número de comunidades e de tubulações de fronteira variam um pouco mais do que os valores obtidos para grafos com arestas não direcionadas, mas ponderadas pela vazão. Este fato pode ser atribuído à maior restrição nas conexões imposta pela direção das arestas, já que, nesses casos, os nós só podem se conectar de acordo com a direção do fluxo de água nas tubulações.

Além disso, é importante enfatizar que os resultados do gráfico apresentado na Figura 3.5 representam os resultados obtidos para ambos os tipos de grafos direcionados (direcionadas pela vazão e não ponderadas, e direcionadas e ponderadas pela vazão), uma vez que as comunidades são formadas pela direção das arestas utilizando o mesmo algoritmo.

Para a etapa de alocação ótima de válvulas, as otimizações foram realizadas no intervalo de 11-12 horas, devido ao maior consumo de água nesse período. No caso, os grafos particionados pelo algoritmo Louvain geraram maior modularidade do que os grafos particionados pelo algoritmo Fast-Greedy.

A partição realizada pelo Louvain desenvolveu modularidades de 0,9179 e 0,9478 para grafos com arestas não ponderadas e não direcionadas, e com arestas ponderadas pela vazão e não direcionadas, respectivamente. É importante ressaltar que o valor da modularidade pode variar de  $-1$  a  $1$ , onde quanto mais próximo de  $1$ , maior é a conectividade dos nós dentro das comunidades, isto é, mais conexões existem entre os nós de cada comunidade. Entretanto, valores próximos de  $0,63$  já representam comunidades bem conectadas (NEWMAN, 2003).

Enquanto as partições realizadas pelo Fast-Greedy geraram as seguintes modularidades:

- 0,6382 para grafo com arestas não ponderadas e não direcionadas;
- 0,6533 para grafo com arestas ponderadas pela vazão e não direcionadas;
- 0,6101 para grafo com arestas não ponderadas e direcionadas pela vazão; e
- 0,5906 para grafo com arestas ponderadas e direcionadas pela vazão.

Portanto, em geral, as comunidades desenvolvidas pelo algoritmo Louvain possuem nós mais conectados entre si do que as comunidades criadas pelo Fast-Greedy. Em termos hidráulicos, grafos com arestas ponderadas pela vazão e maiores valores de modularidade podem favorecer estruturas mais interconectadas, o que potencialmente contribui para maior flexibilidade hidráulica, dependendo das condições de operação.

Dessa forma, o algoritmo Louvain tende a produzir melhores resultados do que o Fast-Greedy no processo de criação de setores, uma vez que ele desenvolve comunidades com mais tubulações transportando água entre os nós, o que determina mais caminhos alternativos para a água em caso de ruptura de uma tubulação.

É importante citar que as incertezas dos modelos dos algoritmos de detecção de comunidades implementados estão diretamente relacionadas ao fato de que algoritmos Greedy e hierárquicos de *clustering* consideram soluções localmente ótimas para obter a solução global ótima, o que pode resultar em soluções que não são globalmente ótimas. Além disso, algoritmos Greedy não fazem retrocessos nem reconsideram decisões previamente tomadas, o que pode levar a resultados incorretos.

#### 3.4.2 Otimizações mono-objetivo para alocação de válvulas

Os resultados apresentados nesta subseção referem-se ao acoplamento do algoritmo PSO com os algoritmos de detecção de comunidades Fast-Greedy e Louvain, e todos os resultados apresentados nesta subseção correspondem aos dados de partição no passo de tempo de 11-12 horas.

Apenas esse passo de tempo foi selecionado na pesquisa para, justamente, validar a metodologia proposta e porque corresponde a um período que normalmente apresenta o maior consumo de água. Salienta-se que o objetivo de estudo é comparativo-metodológico, deste modo, não se busca generalização temporal.

Além disso, como a rede Modena sem setores opera com pressões próximas de 0 m, todas as otimizações foram realizadas considerando a pressão mínima de 0 m, a fim de não gerar pressões negativas na rede.

Em sequência, a Tabela 3.2 apresenta os resultados relacionados, respectivamente, às minimizações de  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$ .

**Tabela 3.2 – Resultados gerais da otimização de alocação de válvulas considerando  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$  como função-objetivo em otimização mono-objetivo.**

$FO$	ALGORITMO HÍBRIDO	$CV$ (€)	$PU$	$I_{WA}$ (h)	$R$
$CV$	FGDP-PSO	67.646	12,0	0,294	0,151
	FGD-PSO	67.646	12,0	0,294	0,151
	FGP-PSO	68.254	12,0	0,303	0,151
	FGS-PSO	71.744	12,0	0,303	0,149
	LOUP-PSO	20.640	12,0	0,286	0,151
	LOUS-PSO	52.474	12,0	0,289	0,151
$PU$	FGDP-PSO	72.144	11,9	0,297	0,153
	FGD-PSO	72.144	11,9	0,297	0,153
	FGP-PSO	71.253	11,9	0,303	0,153
	FGS-PSO	76.242	11,9	0,303	0,154
	LOUP-PSO	26.638	11,9	0,289	0,153
	LOUS-PSO	56.354	11,9	0,294	0,153
$I_{WA}$	FGDP-PSO	69.145	11,9	0,294	0,153
	FGD-PSO	69.145	11,9	0,294	0,153
	FGP-PSO	71.253	12,0	0,303	0,153
	FGS-PSO	73.243	12,0	0,303	0,149
	LOUP-PSO	22.140	12,2	0,282	0,149
	LOUS-PSO	52.474	12,0	0,290	0,151
$\bar{x}$		60.032	12,0	0,295	0,152
$STD$		17.795	0,065	0,007	0,002
Rede sem setores		-	11,9	0,303	0,154

Fonte: Autor da tese (2025).

Analisando os resultados, o algoritmo híbrido LOUP-PSO se destacou com os melhores resultados entre os algoritmos híbridos, uma vez que sua implementação gerou menores valores de  $CV$  e  $I_{WA}$ , além de resultados consideráveis para  $PU$  e  $R$ .

Na Tabela 3.2 é mostrado também que os resultados obtidos pelos algoritmos híbridos FGDP-PSO e FGD-PSO são praticamente os mesmos, e isso se deve à direção das arestas dos grafos da RDA, que restringe as conexões entre nós de acordo com a direção do fluxo de água nas tubulações. Comparando os resultados dos critérios hidráulicos com os dados do estado inicial da rede, nota-se que o parâmetro  $I_{WA}$  é reduzido em todos os casos, o que pode ser explicado pelo aumento da velocidade de escoamento da água, o que reduz o tempo de permanência da água nas tubulações.

Além disso, na Tabela 3.2 é mostrado, de forma geral, que o parâmetro  $R$  diminuiu e  $PU$  aumentou em relação aos dados da rede original. Esse resultado também pode

ocorrer, pois a alocação de válvulas de isolamento nas tubulações para criar os setores geralmente aumenta o percurso de escoamento até os consumidores, levando a maiores perdas de carga e variações de pressão na rede. Outro fato que deve ser enfatizado é que, quando  $I_{WA}$  e  $PU$  foram minimizados, ambos permaneceram abaixo dos valores da rede original de Modena em todos os casos.

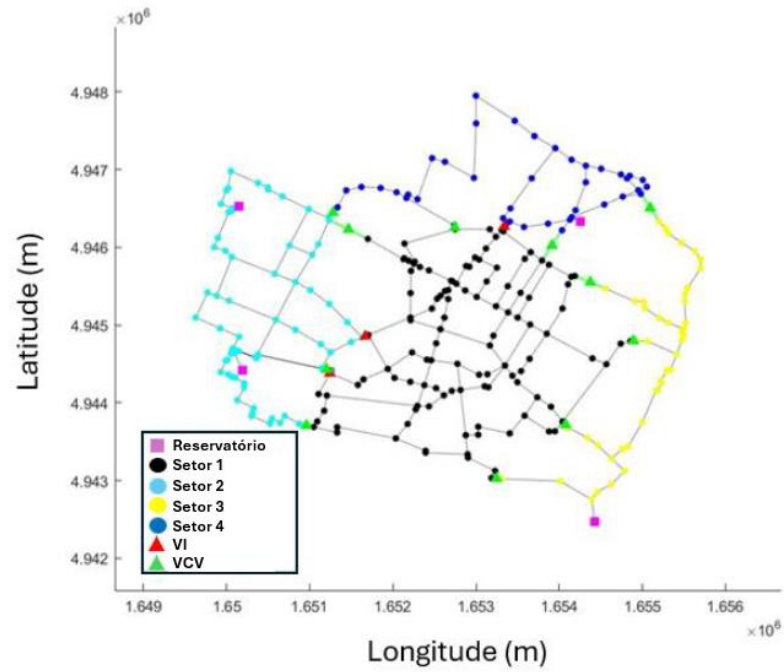
É importante referir que os resultados de  $PU$ ,  $I_{WA}$  e  $R$  apresentados na Tabela 3.2 exibem pouca variação em relação aos diferentes cenários de modelagem da RDA como grafo. Possivelmente isso ocorre porque a Modena é uma rede pequena e simples, sem bombas e válvulas.

Além disso, as pressões em excesso (acima dos valores mínimos) são baixas, o que gera pouca flexibilidade para o algoritmo e, conseqüentemente, resultados hidráulicos mais semelhantes. Por outro lado, o parâmetro  $CV$  variou mais (maior desvio padrão), uma vez que esse parâmetro não está relacionado com a topologia da rede de Modena, mas sim com o tipo e o tamanho das válvulas alocadas.

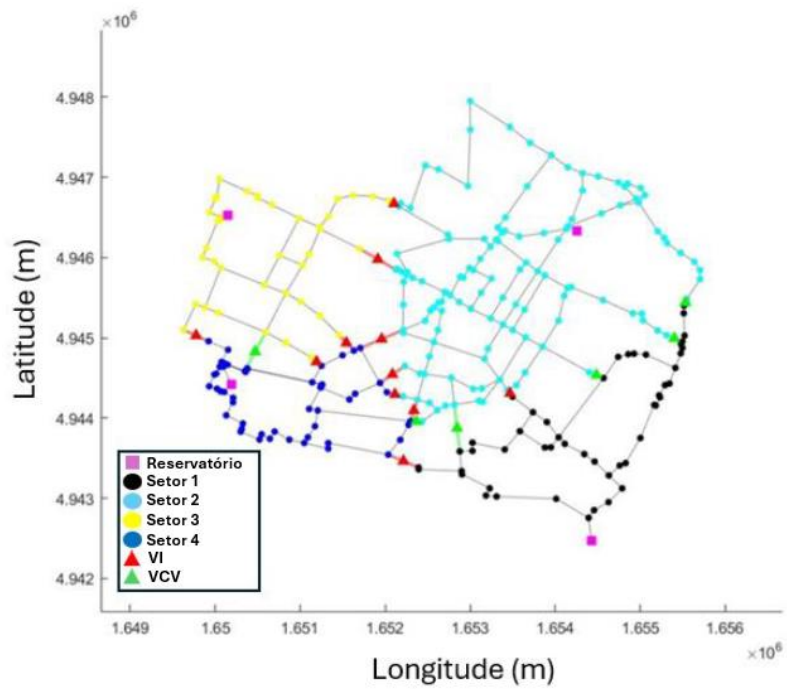
Ponderar as arestas de uma RDA pela vazão possibilita determinar quais nós estão sendo abastecidos, de modo que se apresenta na Figura 3.6 os mapas da rede de Modena com os dispositivos de controle alocados para ambos os algoritmos híbridos implementados (FGP-PSO e LOUP-PSO), nos casos de minimização de  $CV$ , considerando os grafos com arestas ponderadas apenas pela vazão. De salientar que IV representam as válvulas de isolamento e FCV as válvulas de controle de vazão.

O algoritmo Louvain desenvolveu um maior número de tubulações de fronteira (Figura 3.6a) entre suas partições em comparação com o algoritmo Fast-Greedy (Figura 3.6b). No entanto, é importante citar que as tubulações com os dispositivos implementados pelo LOUP-PSO possuem diâmetros menores do que as tubulações com válvulas alocadas pelo algoritmo FGP-PSO, o que explica o menor custo total de alocação de válvulas obtido pelo LOUP-PSO definido pela Equação (3.5).

Figura 3.6 – Mapas da rede de Modena com a configuração ótima de válvulas alocadas após a minimização do CV: (a) FGP-PSO e (b) LOUP-PSO).



(a)



(b)

Fonte: Autor da tese (2025).

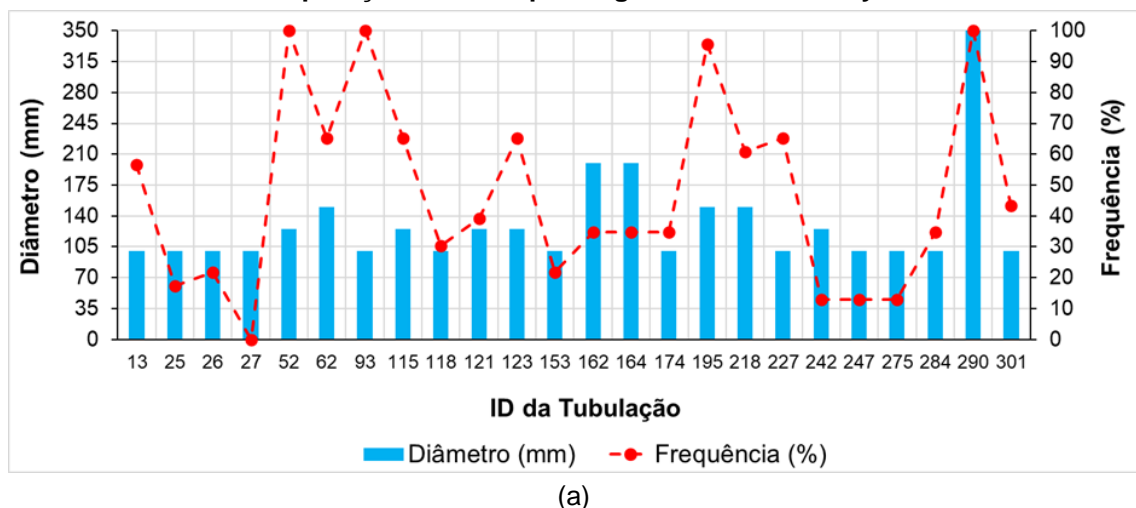
### 3.4.3 Análise de frequência de tubulações com válvulas alocadas

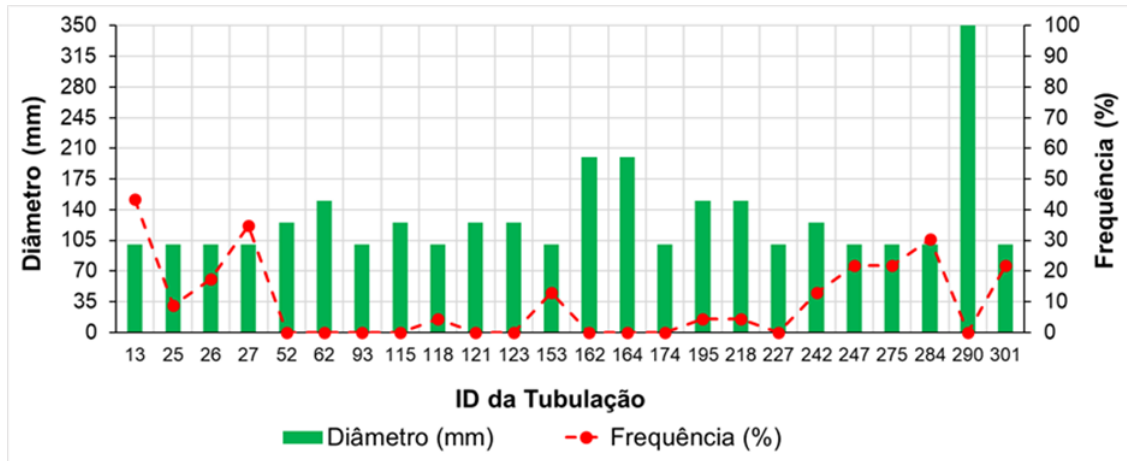
Este tópico apresenta as frequências das tubulações com VI e [OBJ] alocadas. As frequências das tubulações com válvulas alocadas foram calculadas pela divisão entre a quantidade de válvulas alocadas em uma tubulação avaliada e o número de soluções ótimas considerando todas as modelagens implementadas, de acordo com o tipo de válvula e para cada algoritmo de detecção de comunidades.

Os resultados estão organizados de acordo com o algoritmo de detecção de comunidades, visto que com o algoritmo Fast-Greedy foi possível particionar a RDA modelada a partir de todos os tipos de grafos, enquanto com o algoritmo Louvain somente foi possível particionar a RDA modelada como grafo ponderado e simples. Os grafos foram baseados em todos os cenários, ou seja, analisando todos os tipos de grafos com as respectivas soluções ótimas obtidas.

No caso da implementação dos algoritmos híbridos considerando o algoritmo Fast-Greedy para o particionamento da RDA, obtém-se os seguintes resultados apresentados na Figura 3.7.

**Figura 3.7 – Análise de frequência das tubulações com (a) VCV e (b) VI alocadas, considerando as partições criadas pelo algoritmo Fast-Greedy.**



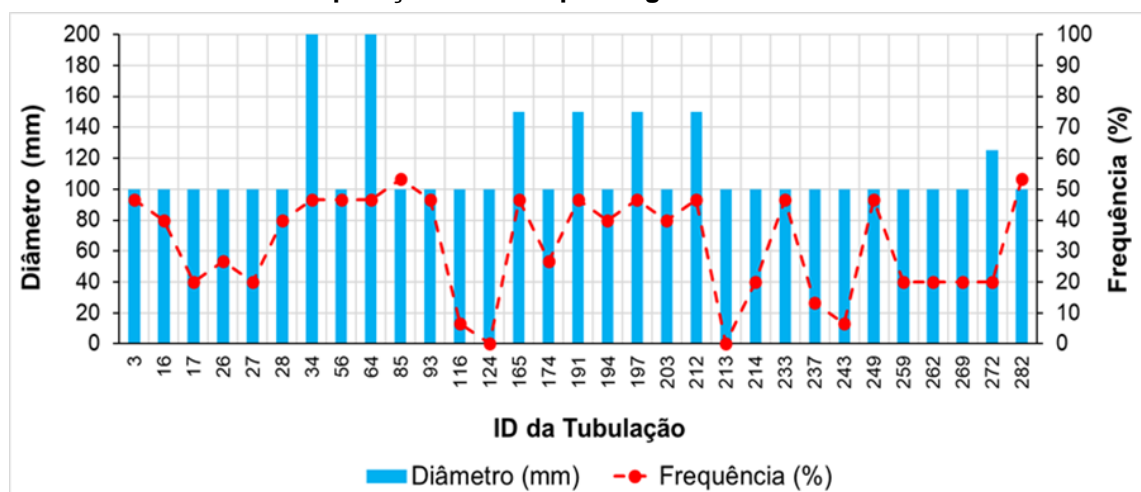


(b)

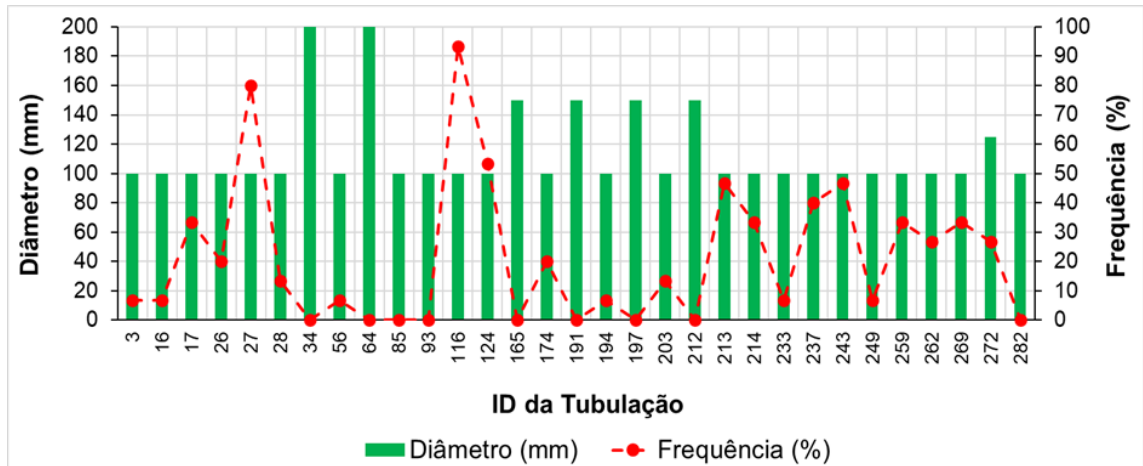
Fonte: Autor da tese (2025).

A válvula alocada à tubulação 290 apresenta o maior diâmetro (350 mm) de todas as tubulações de fronteira selecionadas pelo algoritmo Fast-Greedy e, juntamente com as tubulações 52 e 93, tem uma *VCV* alocada em todas (100%) as soluções obtidas, o que gerou custos mais elevados. Vale destacar que a tubulação 290 está próxima a um dos reservatórios da rede Modena e, portanto, possui um diâmetro maior do que as outras tubulações de fronteira. Além disso, analisando a Figura 3.7, nota-se que apenas *VI* foram alocadas na tubulação 27. Em sequência, a Figura 3.8 apresenta as frequências das tubulações com válvulas alocadas para o caso do particionamento da RDA desenvolvido pelo algoritmo Louvain.

**Figura 3.8 – Análise de frequência das tubulações com (a) *VCV* e (b) *VI* alocadas, considerando as partições criadas pelo algoritmo Louvain.**



(a)



(b)

Fonte: Autor da tese (2025).

Esta Figura 3.8 mostra uma maiores percentuais de  $VCV$  em relação às  $VI$ , o que aumenta os custos das soluções ótimas obtidas. No entanto, tubulações como 124 e 213 se destacam das demais, pois não possuem  $FCV$  em nenhum cenário.

Outras tubulações que se destacam são 27 e 116, uma vez que ambas apresentam altas frequências de alocação de  $VI$ . Comparando os resultados de alocação de válvulas, de forma geral, pode-se concluir que uma das principais razões para as soluções ótimas obtidas pelo algoritmo Fast-Greedy apresentarem custos mais elevados é a presença da tubulação 290 que tem associada uma válvula de maior diâmetro.

A tubulação 290 possui o maior diâmetro entre todas as tubulações de fronteira obtidas por ambos os algoritmos. Além disso, os algoritmos híbridos que incluem o algoritmo Fast-Greedy geraram soluções ótimas com maior frequência de  $VCV$  do que os algoritmos híbridos que incluem o Louvain, o que torna as soluções de projeto ótimas com maior custo.

### 3.5 Conclusões e perspectivas futuras

O algoritmo Fast-Greedy apresenta maior estabilidade dos dados e convergência dos resultados em termos de aspectos hidráulicos e da teoria dos grafos. Isso é justificado após a análise dos resultados para grafos simples (com arestas não ponderadas e não direcionadas), nos quais foram identificados valores constantes

de modularidade, número de tubulações de fronteira e comunidades ao longo do tempo.

No entanto, para grafos ponderados pela vazão, observou-se que o algoritmo Louvain apresenta valores de modularidade mais elevados em comparação aos resultados obtidos pelo algoritmo Fast-Greedy, e, portanto, gera partições com maior conectividade e com mais tubulações transportando água dentro dos setores.

Quanto aos algoritmos híbridos, o algoritmo Louvain-PSO apresentou os melhores resultados, com menores custos de investimento,  $CV$ , e menores valores do índice da idade da água,  $I_{WA}$ , e, além disso, resultados muito satisfatórios de  $PU$  e  $R$ . Os menores custos obtidos pela implementação do algoritmo híbrido Louvain-PSO, para o grafo ponderado apenas pela vazão, são justificados pela alocação de válvulas em tubulações de menor diâmetro (100 mm), em comparação com as tubulações com válvulas alocadas pelo Fast-Greedy-PSO.

Além disso, os melhores resultados nos critérios hidráulicos gerados pela implementação do Louvain-PSO, considerando arestas ponderadas pela vazão, podem ser atribuídos às maiores modularidades. A maior modularidade permitiu que as válvulas fossem alocadas em posições melhores (tubulações mais adequadas).

Os resultados do algoritmo híbrido Fast-Greedy-PSO para o caso do grafo com arestas direcionadas e ponderadas pela vazão (FGDP-PSO) e do grafo direcionado pela vazão (FGD-PSO) foram idênticos em todos os casos. Isso pode ser atribuído às conexões estabelecidas entre os nós de junção pela direção das arestas determinadas pela vazão nas tubulações.

Ao analisar a frequência das tubulações com válvulas alocadas, observou-se que os algoritmos híbridos com Fast-Greedy geraram soluções de maior custo devido à maior frequência de  $VCV$  alocadas em tubulações de maior diâmetro. Além disso, vale destacar que a tubulação de fronteira com maior diâmetro, tubo 290, esteve presente em todas as soluções do Fast-Greedy.

Os algoritmos híbridos que incluíram o Louvain na etapa de particionamento da RDA, em geral, apresentaram tubulações com diâmetros menores e menor frequência de *VCV* alocadas. Portanto, o algoritmo Louvain gerou soluções com custos reduzidos.

Para pesquisas futuras sobre a otimização de setores em RDA, sugere-se a realização de estudos envolvendo cenários que considerem mudanças de maior impacto, tais como: expansão das RDA devido ao crescimento populacional (cenários com maior demanda), aumento ou redução dos níveis de reservatórios e tanques em uma RDA, e consumos em períodos de seca.

Ademais, recomenda-se, para trabalhos futuros, o desenvolvimento de estudos relacionados à otimização de setores em RDA com a inclusão de vazamentos antes e depois do processo de criação dos setores, visando a compreensão das vantagens geradas pelos setores otimizados. Nesse contexto, sugere-se testar diferentes algoritmos de otimização para analisar o tempo necessário para criar os setores e o desempenho na otimização da rede de abastecimento.

## 4 OTIMIZAÇÃO DE SETORES PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Este capítulo é uma versão adaptada de um artigo científico submetido em revista internacional: ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas; COVAS, Dídía; MEIRELLES, Gustavo; BRENTAN, Bruno. Optimizing District Metered Areas Design for Sustainable Water Supply Management. **Urban Water Journal**. Submetido em agosto de 2025.

### RESUMO

Este artigo propõe e compara estratégias hidráulicas para o estabelecimento de novos setores, com o objetivo de promover uma operação mais sustentável dos sistemas de abastecimento de água. São utilizados dois algoritmos de detecção de comunidades (Louvain e Leiden) para a criação de os setores na RDA, e o algoritmo PSO para otimizar a operação das válvulas do sistema. O estudo de caso inclui a rede KL e a análise de três cenários de otimização. Os resultados são avaliados em termos de custos de projeto, uniformidade de pressão, idade média ponderada da água, volume de perdas reais e emissões de carbono. De modo geral, os resultados mostram que o algoritmo híbrido Leiden-PSO produziu o projeto de setorização ótima de menor custo, enquanto ambos os algoritmos híbridos Louvain-PSO e Leiden-PSO permitiram obter soluções de setorização que maximizam de desempenho hidráulico, em termos de uniformidade de pressões e idade da água. No entanto, o algoritmo Louvain-PSO desenvolveu o cenário com maior redução de vazamentos, enquanto o algoritmo Leiden-PSO destacou gerando mais cenários com redução de vazamentos mais significativas. Além disso, as diferentes estratégias hidráulicas de otimização de setores abordadas neste estudo melhoraram o desempenho hidráulico da rede e contribuíram para a redução de perdas e emissões de carbono, tornando o sistema de abastecimento de água mais sustentável.

Palavras-chaves: operação ótima; setorização; sistema de distribuição de água; sustentabilidade; vazamentos.

## 4.1 Introdução

As RDA são compostas, em sua maioria, por infraestruturas que frequentemente sofrem eventos anômalos induzidos por rompimentos de tubulações, vazamentos, consumos ilegais, transientes de pressão, entre outros. Para melhor avaliar e controlar a ocorrência desses eventos, a Water Authorities Association e o Water Research Centre (1985) propuseram a divisão da RDA em setores, conhecidos como Distritos de Medição (DM), nos quais todas as conexões de entrada e saída são monitoradas. A criação de setores visa tornar a avaliação e a detecção de vazamentos menos complexas e, conseqüentemente, promover um reparo mais rápido de vazamentos e rompimentos.

A criação de setores em RDA possibilita a regulação de pressões, melhora a qualidade da água, reduz os níveis de perdas e busca distribuir de forma mais uniforme as demandas dependentes da pressão (BRENTAN *et al.*, 2021; CREACO e HAIDAR, 2019). Esses benefícios desempenham um papel importante na transição para a sustentabilidade dos sistemas urbanos, elevando o desempenho hidroenergético do sistema de abastecimento de água e contribuindo para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos (MELGAREJO-MORENO; LÓPEZ-ORTIZ; FERNÁNDEZ-ARACIL, 2019).

Os setores são estabelecidos por meio da instalação de dispositivos de controle, como sejam válvulas redutoras de pressão ou válvulas de controle de vazão, assim como medidores de vazão (LI *et al.*, 2024). Desde 2010, os estudos sobre a criação de setores avançaram significativamente, introduzindo novas perspectivas, especialmente com técnicas mais complexas e detalhadas para subdividir as RDA em setores que permanecem relevantes até hoje. Para a etapa de particionamento topológico ou geração de comunidades (i.e., setores de RDA), têm sido adotados diversos princípios e métodos matemáticos, sendo a maioria das abordagens baseada na modelagem da RDA como um grafo.

Por exemplo, Herrera *et al.* (2010) aplicaram técnicas espectrais de grafos ao estabelecimento de setores, propondo um método que combina aprendizado de máquina semi-supervisionado com dados espectrais derivados da matriz Laplaciana

da RDA, modelada como um grafo ponderado, baseado no diâmetro das tubulações e na demanda. Essa metodologia fornece uma solução eficaz para o paradigma do zoneamento hidráulico, ao gerar agrupamentos que criam pequenas redes de abastecimento quase independentes.

Campbell *et al.* (2015) também incorporaram a teoria dos grafos no processo de criação flexível de setores. Esses autores desenvolveram um método para subdividir a RDA identificando a rede tronco e as redes de distribuição por meio do algoritmo *Breadth-First Search* (BFS), juntamente com a detecção de comunidades pelo algoritmo *Walktrap* (PONS e LATAPY, 2005). Nessa abordagem, as tubulações pertencentes à rede tronco foram excluídas dos setores, minimizando potenciais impactos negativos da implementação dos setores na rede de abastecimento, ao mesmo tempo em que se aprimora o controle de perdas.

De modo geral, os algoritmos de detecção de comunidades geram setores a partir do cálculo da modularidade (NEWMAN e GIRVAN, 2004), que caracteriza a conectividade dos nós tanto dentro quanto entre os setores. Esses algoritmos buscam minimizar as arestas entre nós de diferentes setores (tubulações de fronteira), enquanto maximizam a conectividade entre os nós localizados dentro de cada setor. Alguns exemplos de estudos sobre algoritmos de detecção de comunidades aplicados às RDA são Giustolisi e Ridolfi (2014) e Ciaponi, Murari e Todeschini (2016), nos quais foram implementados, respectivamente, um método refinado de cálculo da modularidade e um algoritmo para maximização da modularidade chamado Fast-Greedy (CLAUSET; NEWMAN; MOORE, 2004).

Além da etapa de particionamento da RDA, a fase relacionada à alocação de dispositivos de controle e medidores de vazão também avançou nas últimas décadas. Esse progresso pode ser atribuído ao crescente uso de heurísticas e métodos iterativos (BIANCHOTTI *et al.*, 2021; BRENTAN *et al.*, 2022), visto que tais métodos são altamente eficazes na resolução de problemas complexos que envolvem múltiplas restrições e funções-objetivo. Na literatura sobre RDA relacionada à otimização de setores, muitos estudos focam especificamente no uso

dos algoritmos PSO (KENNEDY e EBERHART, 1995) e NSGA-II (DEB *et al.*, 2000) para a alocação ótima de válvulas.

Em estudos recentes, a setorização tem sido abordada por meio da integração do particionamento da RDA baseado em teoria dos grafos com otimização multiobjetivo (SHEKOFTEH; YOUSEFI-KHOSHQALB; PIRATLA, 2023; RIYAHY *et al.*, 2024). Além disso, pesquisadores investigaram a aplicação de diferentes tipos de grafos e algoritmos bem estabelecidos em literatura para explorar as relações entre teoria matemática e comportamento hidráulico de setores em RDA, incorporando ponderações e critérios hidráulicos (DE FREITAS ANCHIETA; MEIRELLES; BRENTAN, 2024).

Ainda assim, persistem amplas oportunidades de pesquisa sobre RDA, especialmente no que diz respeito à criação e operação ótima dos setores e suas implicações para a sustentabilidade e o bem-estar social. A maioria dos estudos sobre a criação de setores limita-se tipicamente à etapa de alocação de válvulas, sem aprofundar a relação entre a operação ótima do sistema de abastecimento de água e a setorização. Além disso, tais estudos tendem a se concentrar mais na comparação de métricas de desempenho aplicadas após a criação dos setores do que na análise da formulação do problema para buscar melhores estratégias de otimização.

Deste modo, para preencher estas lacunas em literatura, o presente estudo apresenta uma nova perspectiva sobre o processo de otimização de setores, destacando a importância de incorporar condições de contorno diretamente relacionadas aos parâmetros hidráulicos e topológicos da RDA durante a setorização.

Neste trabalho, os processos de criação dos setores e de controle da operação hidráulica na rede de abastecimento de água são otimizados de forma conjunta. O objetivo é comparar a abordagem tradicional de otimizar a criação de setores separadamente da otimização da operação da RDA, com uma nova abordagem que

integra simultaneamente restrições, parâmetros hidráulicos e topológicos no processo de criação dos setores.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Abordagem geral

O projeto ótimo de setorização proposto é composto por quatro etapas principais. Primeiramente, a RDA é modelada como um grafo ponderado pela vazão. Em seguida, procede-se a detecção de comunidades (i.e. a criação dos setores) utilizando os algoritmos Louvain ou Leiden (TRAAG; WALTMAN; VAN ECK, 2019). Na terceira etapa, a operação da rede é otimizada por meio do algoritmo PSO e, por fim, efetua-se uma análise do volume de vazamentos, com o objetivo de identificar os cenários que proporcionam maior redução em perdas de água e emissões de carbono.

Este estudo considera uma simulação hidráulica de 24 horas realizada com o EPANET 2.2 (ROSSMAN *et al.*, 2020). Na etapa de detecção de comunidades, a RDA é modelada como um grafo ponderado pela vazão, de modo a criar os setores com base nas vazões que chegam aos nós do sistema.

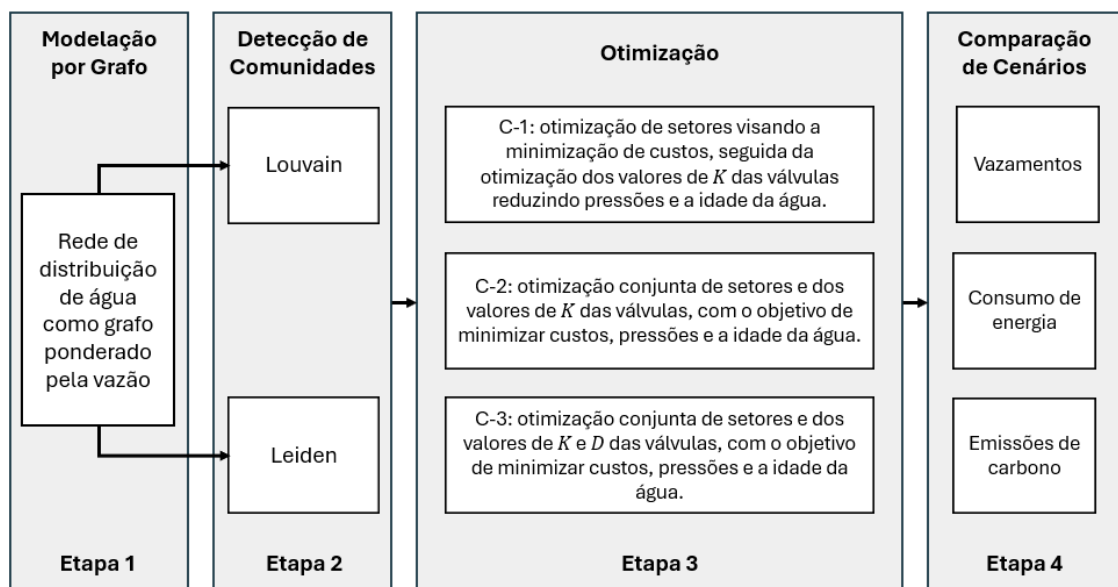
Na etapa de operação e alocação de válvulas, são analisados três cenários de otimização distintos:

- Cenário 1 (C-1): a setorização é inicialmente realizada por meio de otimização mono-objetivo dos custos de instalação das válvulas e, em seguida, o coeficiente de perda de carga localizada ( $K$ ) das válvulas de controle é otimizado recorrendo a processos mono-objetivo distintos, com o objetivo de reduzir a pressão e a idade da água na rede.
- Cenário 2 (C-2): a criação de setores é conduzida de acordo com as otimizações o  $K$  das válvulas visando minimizar os custos, as pressões operacionais e a idade da água, também por meio de otimizações mono-objetivo.

- Cenário 3 (C-3): alarga-se a otimização conjunta, incluindo na criação de setores tanto a otimização de  $K$  como do diâmetro ( $D$ ) das válvulas de controle, com o propósito de minimizar os custos, as pressões e a idade da água, novamente em otimizações mono-objetivo.

As configurações de setores correspondentes a cada solução ótima obtida nos cenários de otimização são avaliadas e comparadas quanto ao volume de perdas água (em relação à RDA sem setores), ao consumo de energia e às emissões de carbono resultantes da redução de vazamentos. O fluxograma apresentado na Figura 4.1 ilustra todo o processo de desenvolvimento proposto.

**Figura 4.1 – Fluxograma ilustrando as etapas realizadas no desenvolvimento desta pesquisa.**



Fonte: Autor da tese (2025).

#### 4.2.2 Modelagem da rede de distribuição de água como grafo

A primeira etapa consiste na modelagem da RDA como um grafo ( $G$ ), o qual é uma abstração matemática utilizada para representar sistemas do mundo real, como sejam, redes sociais, sistemas de transporte, redes elétricas, redes de distribuição de água, estruturas moleculares, entre outros. Um grafo  $G$  é composto por um conjunto finito de vértices  $V(G)$  conectados por um conjunto finito de arestas  $E(G)$ , sendo representado como definido matematicamente pela Eq. (2.1).

Na modelagem da RDA como um grafo, o conjunto de vértices ( $V$ ) corresponde aos nós de junção, reservatórios e tanques, enquanto o conjunto de arestas ( $E$ ) representa as tubulações, bombas e válvulas.

Entretanto, neste estudo, a RDA é modelada como um grafo com arestas ponderadas pela vazão. Assim,  $E$  representa as vazões que abastecem os nós da rede. A ponderação das arestas pela vazão foi aplicada com o objetivo de modelar o fornecimento de água durante o processo de criação de setores.

A modelagem da RDA como grafo foi implementada utilizando as bibliotecas *NetworkX* (HAGBERG; SWART; CHULT, 2008) e *Water Network Tool for Resilience* (WNTR) (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018) em linguagem de programação Python.

#### 4.2.3 Detecção de comunidades

##### 4.2.3.1 Algoritmo Louvain

De acordo com Blondel *et al.* (2008), o algoritmo Louvain baseia-se na maximização da modularidade (NEWMAN e GIRVAN, 2004). Esse objetivo é alcançado ao maximizar a conectividade dos nós dentro das comunidades e minimizar as arestas que conectam diferentes comunidades.

Ressalta-se que o ganho de modularidade é calculado por meio de um processo iterativo em duas etapas no algoritmo Louvain. Na primeira etapa, cada nó é inicialmente atribuído à sua própria comunidade individual e, em seguida, para cada nó, o algoritmo avalia a possível maximização do valor de modularidade decorrente de sua movimentação para cada uma das comunidades vizinhas. Caso nenhuma movimentação resulte em ganho positivo de modularidade, o nó permanece em sua comunidade original.

O ganho de modularidade ( $\Delta M$ ) obtido ao mover um nó isolado  $i$  para uma comunidade vizinha pode ser calculado de forma eficiente pela Eq. (3.4) (BLONDEL *et al.*, 2008; TRAAG; WALTMAN; VAN ECK, 2019):

#### 4.2.3.2 Algoritmo Leiden

O algoritmo de detecção de comunidades Leiden também foi implementado (TRAAG; WALTMAN; VAN ECK, 2019) e utilizado como alternativa ao algoritmo Louvain, pois de forma similar, o algoritmo Leiden pode identificar comunidades tanto por meio do cálculo da função de qualidade de modularidade apresentada na Eq. (4.1) (REICHARDT e BORNHOLDT, 2006; TRAAG; WALTMAN; VAN ECK, 2019) quanto por meio da função de qualidade conhecida como *Constant Potts Model* expressa na Eq. (4.2) (TRAAG; VAN DOOREN; NESTEROV, 2011).

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2n_w} \sum_C \left( e_C - \frac{\gamma K_C^2}{2n_w} \right), \quad (4.1)$$

$$\mathcal{H} = \sum_C \left[ e_C - \gamma \binom{n_C}{2} \right], \quad (4.2)$$

em que  $n_w$  é a soma dos pesos de todas as arestas do grafo;  $e_C$  é a soma dos pesos das arestas localizadas na comunidade  $C$ ;  $\gamma$  é o parâmetro de resolução;  $K_C$  é a soma dos graus dos nós na comunidade  $C$ ; e  $n_C$  é o número de nós na comunidade  $C$ .

O algoritmo Leiden baseia-se parcialmente no algoritmo de movimento local inteligente (*Intelligent Local Movement Algorithm*) proposto por Waltman e van Eck (2013), que pode ser considerado uma versão aprimorada do algoritmo de Louvain. No entanto, o Leiden apresenta uma estrutura mais complexa, composta por três etapas principais:

1. Movimento local dos nós – o algoritmo inicia com uma partição aleatória e move os nós individualmente de uma comunidade para outra, buscando encontrar uma configuração otimizada de comunidades;
2. Refinamento das partições – as comunidades previamente formadas são refinadas com o objetivo de aumentar a conectividade interna do sistema;

3. Agregação da rede – é criada uma rede agregada a partir das comunidades refinadas, utilizando as comunidades não refinadas como base para a formação inicial da rede agregada.

Essas etapas são repetidas iterativamente até que não sejam observadas melhorias adicionais na detecção das comunidades e no cálculo de modularidade.

É importante destacar que, neste estudo, as comunidades são construídas a partir de grafos ponderados por vazão, de modo a criar setores baseados no abastecimento de água da rede, resultando em setores hidráulicamente mais conectados. Além disso, o algoritmo Leiden opera conforme a função de modularidade no presente estudo (Eq. 4.1).

#### 4.2.4 Alocação e operação ótima de válvulas

##### 4.2.4.1 Modelagem hidráulica do problema

Nesta etapa, as Válvulas de Controle de Vazão (VCV) e as Válvulas de Isolamento (VI) são alocadas nas tubulações de fronteira por meio da implementação do algoritmo PSO. Este algoritmo aloca um dos dois tipos de válvulas em todas as tubulações de fronteira identificadas na etapa de detecção de comunidades.

Neste contexto é importante destacar que as simulações hidráulicas são realizadas em períodos de 24 horas e as otimizações iniciam-se a partir da hora 168 (correspondentes a 7 dias de simulação), para assegurar a convergência dos valores das idades da água em todas as tubulações para valores independentes do valor inicial.

Os três cenários de otimização desenvolvidos incluem a otimização do coeficiente de perda de carga localizada ( $K$ ) nas tubulações de fronteira com válvulas alocadas. No Cenário 1 (C-1), a otimização de  $K$  é realizada após a setorização e, nos Cenários 2 (C-2) e 3 (C-3), procede-se à criação simultânea de setores e a otimização da operação das válvulas. Nesses dois últimos cenários, é implementada uma estratégia de controle baseada em  $K$ , a qual:

- as válvulas são consideradas fechadas quando  $K < 10$ , indicando que os dispositivos não são sensíveis ao escoamento, devido a vazão ser relativamente pequena nestas tubulações e não introduzir perdas de carga localizadas (valor confirmado com a análise dos valores da vazão); neste caso, considera-se que estas válvulas são de isolamento (VI);
- válvulas são consideradas abertas quando  $K \geq 10$ , uma vez que a sensibilidade destas válvulas à variação da vazão é elevada e sua abertura permite uma otimização maior de  $K$ , reduzindo ainda mais as pressões operacionais ao longo do dia; neste caso, considera-se que se trata de válvulas de controle de vazão (VCV).

O valor limite de  $K = 10$  foi determinado como condição de contorno para a criação de setores nos cenários C-2 e C-3 após a realização de várias análises de sensibilidade com simulações-teste com diferentes valores de  $K$ , supondo a utilização de válvulas do tipo globo. Nessas simulações, valores de inferiores que 10 praticamente não alteravam as pressões a jusante, uma vez que as vazões nas tubulações de fronteira eram relativamente pequenas.

Segundo Rossman *et al.* (2020), o coeficiente  $K$  de válvulas do tipo globo é 10 quando estas estão totalmente abertas e, sendo assim, este valor foi adotado para a operação das válvulas e a criação de setores. Uma vez atingido esse limite, o algoritmo continua a otimizar os valores de  $K$  acima de 10, com o objetivo de reduzir ainda mais as pressões na RDA.

O uso deste valor de  $K$  como condição de contorno no processo de setorização é aplicado nos cenários C-2 e C-3, com o objetivo de alocar as válvulas de forma otimizada, também levando em conta o tipo de válvula empregado. O propósito desse modelo de otimização é explorar estratégias hidráulicas para melhorar o controle operacional do sistema de distribuição de água.

Adicionalmente, no cenário C-3, os diâmetros das válvulas ( $D$ ) também são otimizados para reduzir custos e pressões na rede, já que as perdas de carga totais nos dispositivos de controle resultam da combinação ótima entre  $K$  e  $D$ . Nesse caso, as tubulações de fronteira são divididas em segmentos iguais, e nós de junção –

com as mesmas propriedades topológicas dos nós originais – são adicionados nas extremidades de cada segmento.

Em seguida, uma nova tubulação com 1 m de comprimento é inserida entre cada par de novos nós de junção, localizados no ponto médio das tubulações originais. Essas novas tubulações são utilizadas para a instalação das válvulas, cujo  $D$  de cada dispositivo de controle é otimizado, podendo atingir valor mínimo de 50 mm. No cenário C-3, é importante ressaltar que o  $D$  das válvulas corresponde ao diâmetro original das respectivas tubulações.

Após a otimização dos setores, em cada cenário, o percentual de redução do volume de vazamento é calculado considerando a estimativa da vazão de vazamento dada pela Eq. (4.3) (ROSSMAN *et al.*, 2020):

$$q = Zp^\gamma, \quad (4.3)$$

em que  $q$  é a vazão de vazamento ( $L s^{-1}$ ),  $Z$  é o coeficiente emissor, com unidades de  $L s^{-1} m^{-\gamma}$ ,  $p$  é a carga de pressão (m), e  $\gamma$  é o expoente de pressão, definido com valor padrão de 0,5 (tipicamente utilizado para pequenos orifícios) no software EPANET 2.2.

De acordo com Puerta-Zurita *et al.* (2025), a maioria dos estudos envolvendo RDA com tubulações de diâmetro  $D \geq 300$  mm reportou valores calibrados de  $Z$  inferiores a  $10 L s^{-1} m^{-0.5}$ , assumindo  $\gamma = 0,5$ . Portanto, considerando que a RDA utilizada neste estudo inclui tubulações com diâmetro de 304,8 mm e que os vazamentos foram inseridos em todos os nós de demanda, adotou-se o valor de  $Z = 0,01 L s^{-1} m^{-0.5}$  para as simulações realizadas neste trabalho.

Nesse contexto, o percentual de redução de volume de vazamentos após a setorização ( $DV$ ) é estimado pela Eq. (4.4):

$$DV = \frac{V_o - V_f}{V_o} 100, \quad (4.4)$$

em que  $V_0$  representa o volume inicial de vazamentos ( $m^3$ ) antes da setorização, e  $V_f$  é o volume de vazamentos ( $m^3$ ) após o estabelecimento dos setores. Assim,  $DV$  expressa o percentual de redução de vazamentos ao longo do período de simulação de 24 horas.

É importante salientar que os valores absolutos de redução de vazamentos devem ser interpretados como estimativas comparativas entre cenários, e não como previsões reais para sistemas operacionais

O valor de  $DV$  também é convertido em metros cúbicos ( $m^3$ ) para uma melhor compreensão do efeito da redução de vazamentos após a setorização, utilizando-se a seguinte expressão na Eq. (4.5):

$$V_{DV} = \sum_{j=0}^{T=24} \left\{ \left[ \sum_{i=1}^N Z(p_{0,i,j}^Y - p_{f,i,j}^Y) \right] 3,6 \right\}, \quad (4.5)$$

em que  $V_{DV}$  ( $m^3$ ) representa o volume de vazamento economizado, e os valores de pressão antes ( $p_0$ ) e após a setorização ( $p_f$ ) correspondem à pressão no nó de demanda ( $i$ ) para cada hora ( $j$ ) ao longo do período de simulação hidráulica de 24 horas.

Além disso, o benefício econômico ( $B_{DV}$ ) relacionado ao volume de vazamento economizado também é calculado considerando o custo unitário de produção de água, como mostrado na Eq. (4.6):

$$B_{DV} = 2,57V_{DV}, \quad (4.6)$$

em que  $B_{DV}$  é calculado em euros (€) e 2,57 corresponde ao custo médio de produção de água potável (€/m<sup>3</sup>), identificado em 36 cidades de 20 países da Europa, com base nas tarifas publicadas pela Rede Internacional de Benchmarking para Serviços de Água e Saneamento, do inglês *International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities* (IBNET) (WATER NEWS EUROPE, 2021).

Outra análise realizada neste estudo refere-se ao cálculo de consumo de energia, resultantes da diminuição do volume de vazamentos após a setorização. Este cálculo de consumo de energia associado ao volume de água não desperdiçado é definido pela Eq. (4.7):

$$B_{EDV} = E_{factor} V_{DV}, \quad (4.7)$$

em que  $B_{EDV}$  (kWh) representa o consumo de energia associado à redução do volume de vazamentos, e  $E_{factor}$  (0,497 kWh/m<sup>3</sup>) corresponde à energia necessária para produzir (ou seja, tratar, transportar e distribuir) 1 m<sup>3</sup> de água (GIBELLINI *et al.*, 2024).

#### 4.2.4.2 Formulação matemática do problema

Após a implementação dos algoritmos de detecção de comunidades, o estudo concentra-se em otimizações mono-objetivo utilizando o algoritmo PSO para alcance de um projeto de setorização de maior custo-benefício. Tais otimizações são fundamentadas no aumento de  $K$  e redução de  $D$  das válvulas alocadas nas tubulações de fronteira, ou seja, nas tubulações que conectam diferentes setores.

Cada otimização é mono-objetivo e realizada separadamente, considerando três funções-objetivo ( $FO$ ) distintas:

- minimização de custo ( $FO_1 = Min CV$ ), recorrendo às Eqs. (3.5), (3.6) e (3.7);
- Minimização do índice de uniformidade de pressão adaptado ( $FO_2 = Min PU$ ), isto é, o valor obtido de  $PU$  de acordo com Eq. (3.8) dividido pelo total de passos de tempo de simulação hidráulica (ALHIMIARY e ALSUHAILY, 2007);
- Minimização do índice de idade medida ponderada da água acima de limite estabelecido ( $FO_3 = Min I_{WA}$ ) (MARCHI *et al.*, 2014) expresso pela Eq. (3.9).

No total, são simulados 18 cenários de otimização, correspondentes a cada uma das três otimizações mono-objetivo ( $FO_1$ ,  $FO_2$  e  $FO_3$ ) aplicadas a três cenários de otimização (C-1, C-2 e C-3) recorrendo a dois algoritmos híbridos distintos (Louvain-PSO e Leiden-PSO).

As otimizações visam minimizar os custos, as pressões e a idade da água de acordo com a alocação das *VCV* e *VI* nas tubulações de fronteira. A abertura e fechamento das válvulas são determinadas por meio de um processo binário na matriz de otimização  $O = [o_{ab}]$  do algoritmo PSO, em que  $a$  representa o número de partículas do algoritmo e  $b$  é o número de variáveis de decisão. Neste contexto,  $o_{ab} = 1$  indica a alocação de *VCV*, enquanto  $o_{ab} = 0$  indica a alocação de *VI*.

Basicamente, nos cenários C-1 e C-2, as variáveis de decisão correspondem às tubulações de fronteira. No C-3, as variáveis de decisão incluem tanto as tubulações de fronteira quanto os seus diâmetros. Nesse cenário, a seleção das tubulações de fronteira ainda segue um processo binário para alocação das válvulas, enquanto seus diâmetros começam com os valores originais e podem ser reduzidos até um mínimo de 50 mm.

Além das funções-objetivo, a pressão mínima requerida para os nós de demanda é considerada como uma restrição neste estudo. Esta restrição é implementada para penalizar (*PEN*) a função-objetivo das soluções que resultam em pressão no nó de demanda  $i$  (caso o nó  $i$  seja um nó de demanda) e no passo de tempo  $j$  ( $P_{(i,j)}$ ) abaixo da pressão mínima necessária para o fornecimento adequado de água ( $p_{min} = 28$  m), conforme mostrado na Eq. (3.10).

#### 4.2.4.3 Otimização por enxame de partículas

Para a etapa de otimização de alocação e operação de válvulas foi empregado o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), desenvolvido por Kennedy e Eberhart (1995), designado por algoritmo enxame de partículas. Ressalta-se que o PSO é uma técnica meta-heurística projetada para resolver problemas de otimização simulando o comportamento social de partículas em um enxame, enquanto buscam um objetivo comum.

Esse comportamento é caracterizado pelo ajuste e atualização das posições das partículas contínuos, com cada partícula esforçando-se para encontrar a posição ótima com base em sua melhor posição conhecida e na melhor posição conhecida de todo o enxame, até o alcance de um critério de parada previamente estabelecido.

O processo de busca pelas melhores soluções é realizado com base nas Eqs. (3.11) e (3.12).

#### 4.2.4.4 Estimativas das emissões de carbono associadas aos vazamentos

O vazamento em sistemas de abastecimento de água representa uma grande perda de recursos hídricos, bem como um custo operacional significativo, especialmente, em termos de consumo de eletricidade associado à energia utilizada para bombear e tratar a água desde a fonte até a torneira do consumidor. Parte dessa energia provém de fontes não renováveis, como carvão, petróleo, gás natural e energia nuclear, resultando em emissões desnecessárias de CO<sub>2</sub>.

Portanto, tendo em vista todo este contexto e a fim de se estimar a redução de emissões de CO<sub>2</sub> desnecessário após o desenvolvimento dos cenários de setorização ótima, neste trabalho as emissões de CO<sub>2</sub> (toneladas de CO<sub>2</sub>) associadas aos vazamentos são calculadas utilizando a Eq. (4.8):

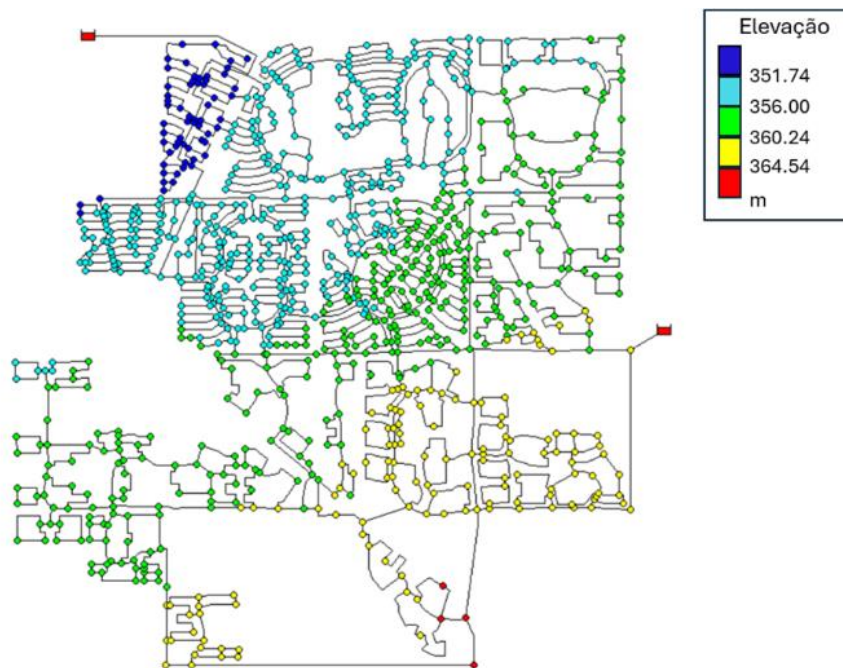
$$CO_2 = (V_{DV} E_{factor} C_{factor}) / 1000, \quad (4.8)$$

em que  $E_{factor}$  é a energia utilizada para produzir (ou seja, tratar, transportar e distribuir) 1 m<sup>3</sup> de água (kWh/m<sup>3</sup>), e  $C_{factor}$  são as emissões de CO<sub>2</sub> por kWh de eletricidade (kg CO<sub>2</sub>/kWh). Neste trabalho, são considerados os seguintes valores para esses fatores:  $E_{factor} = 0,497$  kWh/m<sup>3</sup> (GIBELLINI *et al.*, 2024) e  $C_{factor} = 0,2264$  kg CO<sub>2</sub>/kWh (CLIMATE TRANSPARENCY, 2022).

### 4.3 Estudo de caso

Recorre-se à RDA *benchmark* KL (KANG e LANSEY, 2012) como caso de estudo dada a sua dimensão média, o que facilita uma melhor avaliação e compreensão dos processos e resultados relacionados às diferentes otimizações realizadas. A rede KL é composta por um reservatório, 935 nós, 1.274 tubulações e um comprimento total de 252 km. Nesta rede, existem 623 nós com demanda, e a altura piezométrica mínima requerida para abastecimento de água aos consumidores é de 28 m. apresenta-se na Figura 4.2 a rede KL com os dois reservatórios.

**Figura 4.2 – Rede KL com dois reservatórios.**



Fonte: Autor da tese (2025).

É importante enfatizar que, neste trabalho, foi adicionado um segundo reservatório à rede KL para aumentar as pressões no sistema e, conseqüentemente, evidenciar o controle operacional hidráulico aprimorado após as otimizações dos setores. A

#### **4.4 Resultados e discussões**

Esta seção apresenta os resultados obtidos organizados de acordo com as principais etapas da metodologia, isto é, a detecção de comunidades, a otimização de setores e a análise de vazamentos. Todas as otimizações foram realizadas considerando a simulação hidráulica de 24 horas, iniciado após a hora 168.

##### **4.4.1 Algoritmos de detecção de comunidades**

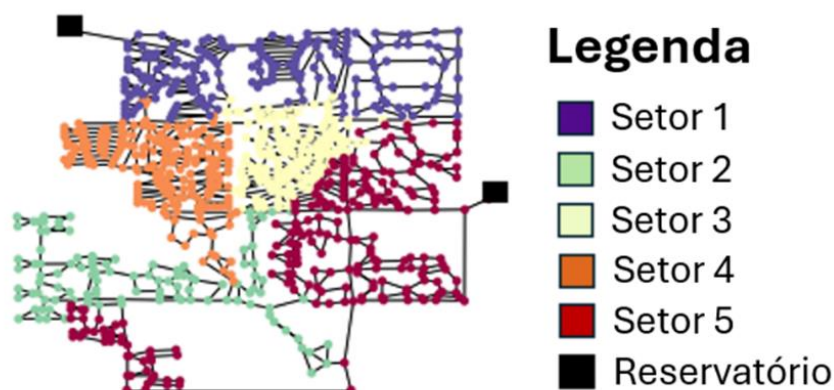
As configurações de comunidades utilizadas para o estabelecimento dos setores são selecionadas com base no maior valor de modularidade obtido durante o período da simulação hidráulica. Desta forma, as comunidades detectadas pelos algoritmos Louvain e Leiden nos instantes de 9 e 4 horas, respectivamente, são escolhidas para representarem os setores.

As configurações de ambas as comunidades apresentam os maiores valores de modularidade e, conseqüentemente, maior conectividade dos nós dentro delas. É importante salientar que os setores desenvolvidos a partir dessas configurações de comunidades com maior modularidade resultam em setores de maior robustez topológica, pois possuem mais nós conectados dentro das comunidades, ou seja, mais tubulações que transportam água entre os nós de consumo, conforme grafo ponderado pela vazão, e, portanto, mais caminhos alternativos em caso de avaria.

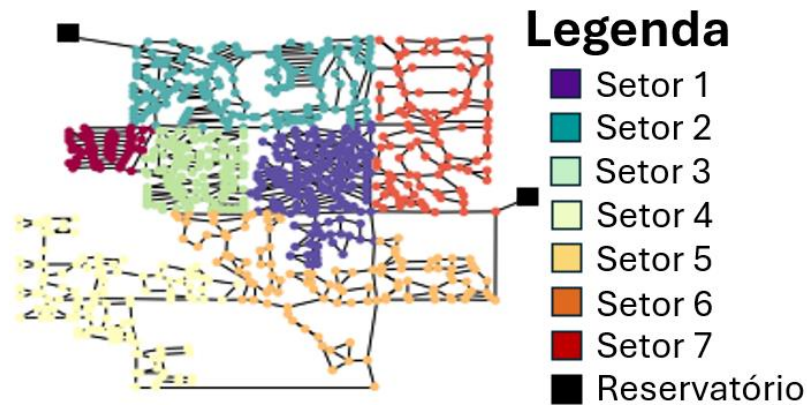
Outro aspecto importante é que são selecionados diferentes valores de parâmetros de resolução para cada algoritmo, a fim de gerar um número semelhante de setores para fins de comparação. Esses valores desempenham um papel crucial, uma vez que valores mais altos tendem a produzir um maior número de comunidades, enquanto valores mais baixos resultam em menos e maiores comunidades com mais nós conectados.

No entanto, como os algoritmos Louvain e Leiden utilizam processos diferentes de detecção de comunidades, os parâmetros de resolução são distintos. Utiliza-se uma resolução de 0,125 para o algoritmo Louvain, resultando em uma configuração com cinco comunidades, enquanto é aplicada uma resolução de 0,000375 para o algoritmo Leiden, resultando numa configuração com sete comunidades. Esta diferença nos valores de resolução reflete os distintos métodos de maximização da modularidade utilizados por cada algoritmo. A Figura 4.3 apresenta as comunidades (setores) desenvolvidos por ambos os algoritmos.

**Figura 4.3 – Setores desenvolvidos pelos algoritmos (a) Louvain e (b) Leiden.**



(a)



(b)

Fonte: Autor da tese (2025).

Observando a Figura 4.3, pode-se notar que os setores gerados pelo algoritmo Leiden estão melhor posicionados espacialmente (Figura 4.3b), uma vez que nenhum deles tem duas zonas separadas e ligadas apenas por uma conduta como, por exemplo, os setores 2 e 5 criados pelo algoritmo Louvain (Figura 4.3a). Este é um fator importante, uma vez que uma subdivisão bem planejada da RDA permite identificar, com mais precisão, vazamentos e rupturas existentes ou que possam ocorrer. Este aspecto é corroborado pelo maior número (46) de tubulações de fronteira gerado pelo algoritmo Louvain em comparação com o do algoritmo Leiden (21 tubulações de fronteira). Em cada uma dessas tubulações limite, é colocado um dos dois tipos de válvulas (*VI* ou *VCV*) de acordo com a otimização pelo algoritmo PSO. Esta diferença do número de tubulações de fronteira gerada entre os algoritmos explica os menores custos obtidos pelo algoritmo Leiden nos diferentes cenários de otimização, uma vez que as válvulas são alocadas nas tubulações de fronteira.

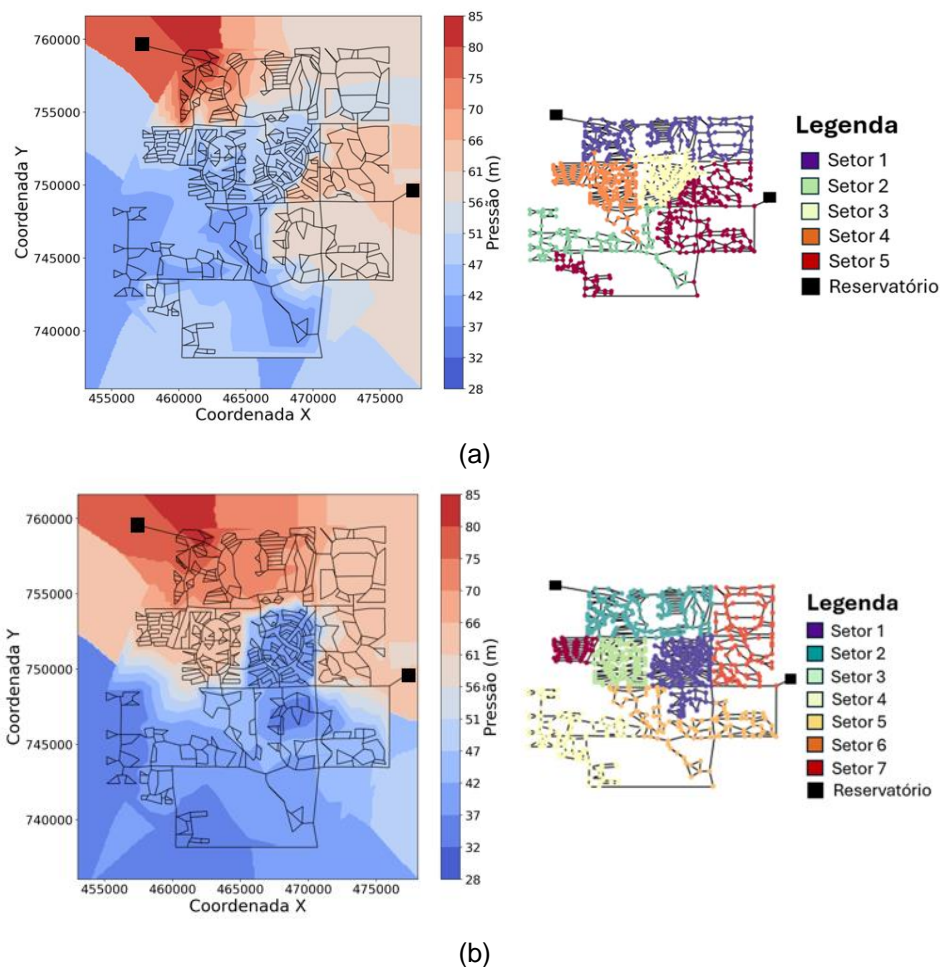
No entanto, a demanda base total gerada pelo algoritmo Louvain é distribuída de forma mais uniforme do que nos setores criados pelo algoritmo Leiden e isto é evidenciado pelos valores de desvio padrão da variação da demanda entre os setores: 0,018 e 0,022 m<sup>3</sup>/s, para os algoritmos Louvain e Leiden, respectivamente. Esta diferença de desvio padrão de demanda deve-se ao menor número de setores obtido com o algoritmo Louvain. Em síntese, apesar do algoritmo Leiden gerar uma configuração de setores espacialmente mais uniforme, a diferença da demanda base

total entre os setores desenvolvidos pelo algoritmo Leiden é maior em comparação com a variação de demanda entre os setores criados pelo algoritmo Louvain.

#### 4.4.2 Otimização de setores visando a minimização de custos (C-1)

Para o Cenário C-1, o algoritmo Louvain-PSO resultou numa configuração com 36 *IV* e 10 *VCV*, enquanto a configuração ótima de válvulas estabelecida pelo algoritmo Leiden-PSO resultou em 14 *VI* e 7 *VCV*. É importante enfatizar que as válvulas são alocadas em todas as tubulações de fronteira identificadas pelos algoritmos Louvain e Leiden, e o número de *VI* e *VCV* é definido por meio do processo de otimização realizado pelo algoritmo PSO. Na Figura 4.4 são apresentados os mapas de superfície que ilustram as pressões mínimas em cada nó, obtidas em todo o período de simulação hidráulica, após a otimização dos setores.

**Figura 4.4 – Mapas de superfície de pressão mínima desenvolvidos após as setorizações feitas por (a) Louvain-PSO e (b) Leiden-PSO em C-1.**



Fonte: Autor da tese (2025).

As maiores pressões mínimas registam-se nos setores localizados na região norte da rede para ambos os algoritmos híbridos. Isto deve-se aos menores valores de cota de elevação dos nós nesses setores.

A região com as maiores pressões mínimas inclui parte do Setor 1 para o cenário de otimização gerado pelo algoritmo híbrido Louvain-PSO e parte do Setor 2 para a configuração ótima criada pelo algoritmo híbrido Leiden-PSO. É importante destacar que os setores com pressões mínimas mais elevadas requerem atenção acrescida, devido ao risco de sobrecargas e possíveis rompimentos de tubulações.

Além disso, na Figura 4.4 é mostrado que as menores pressões mínimas são observadas nos Setor 2 para o cenário de otimização gerado pelo algoritmo híbrido Louvain-PSO, e no Setor 4 para a configuração criada pelo algoritmo Leiden-PSO. Esses setores apresentam pressões mínimas próximas de 28 m, valor praticamente igual ao requisito mínimo de pressão da rede KL. Portanto, esses setores também precisam de atenção, já que pressões abaixo do mínimo exigido podem limitar o abastecimento aos consumidores.

Entretanto, após a otimização dos setores visando minimizar o  $CV$ , também é realizada a otimização de  $K$  em cada  $VCV$ , considerando o período de simulação de 24 horas. Nesse caso, o objetivo da otimização de  $K$  é minimizar a  $PU$  e  $I_{WA}$  por meio de otimizações mono-objetivo realizadas pelo algoritmo PSO. Portanto, foram realizadas três otimizações para este cenário.

Admitiu-se que o intervalo de variação para o coeficiente de perdas de carga,  $K$ , em  $VCV$  é restrito a valores entre 0 e 100, uma vez que valores mais altos de  $K$  correspondem a válvulas parcialmente fechadas (ANSARI e RAFID, 2023). Apesar deste intervalo de otimização de  $K$  estar limitado, a maioria dos valores ótimos obtidos é pequena.

Tal resultado pode ser atribuído à complexidade encontrada pelo algoritmo PSO em gerar soluções que mantenham a pressão mínima de 28 m na rede KL, especialmente, após a otimização prévia dos setores, a qual causou uma redução significativa de pressão. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados de custos e

critérios hidráulicos obtidos por ambos os algoritmos após a criação dos setores e otimização de  $K$  para as  $V_{CV}$ .

**Tabela 4.1 – Resultados obtidos antes e após a otimização de  $K$  para a setorização.**

Algoritmo Híbrido	FO	Critério de Avaliação		
		CV (€)	PU	$I_{WA}$ (h)
Louvain-PSO	CV	202.731	1,39	2,56
	PU		1,34	2,56
	$I_{WA}$		1,38	2,53
Leiden-PSO	CV	207.189	1,45	2,48
	PU		1,38	2,46
	$I_{WA}$		1,44	2,44
Rede KL sem Setores			1,52	2,95

Fonte: Autor da tese (2025).

O algoritmo Louvain-PSO produziu resultados caracterizados por maior redução de  $CV$  e  $PU$  do que o algoritmo Louvain-PSO nos cenários de otimização voltados à minimização de  $CV$  e  $PU$ , enquanto o Leiden-PSO apresentou menores valores de  $I_{WA}$  em comparação com os resultados obtidos pelo algoritmo Leiden-PSO.

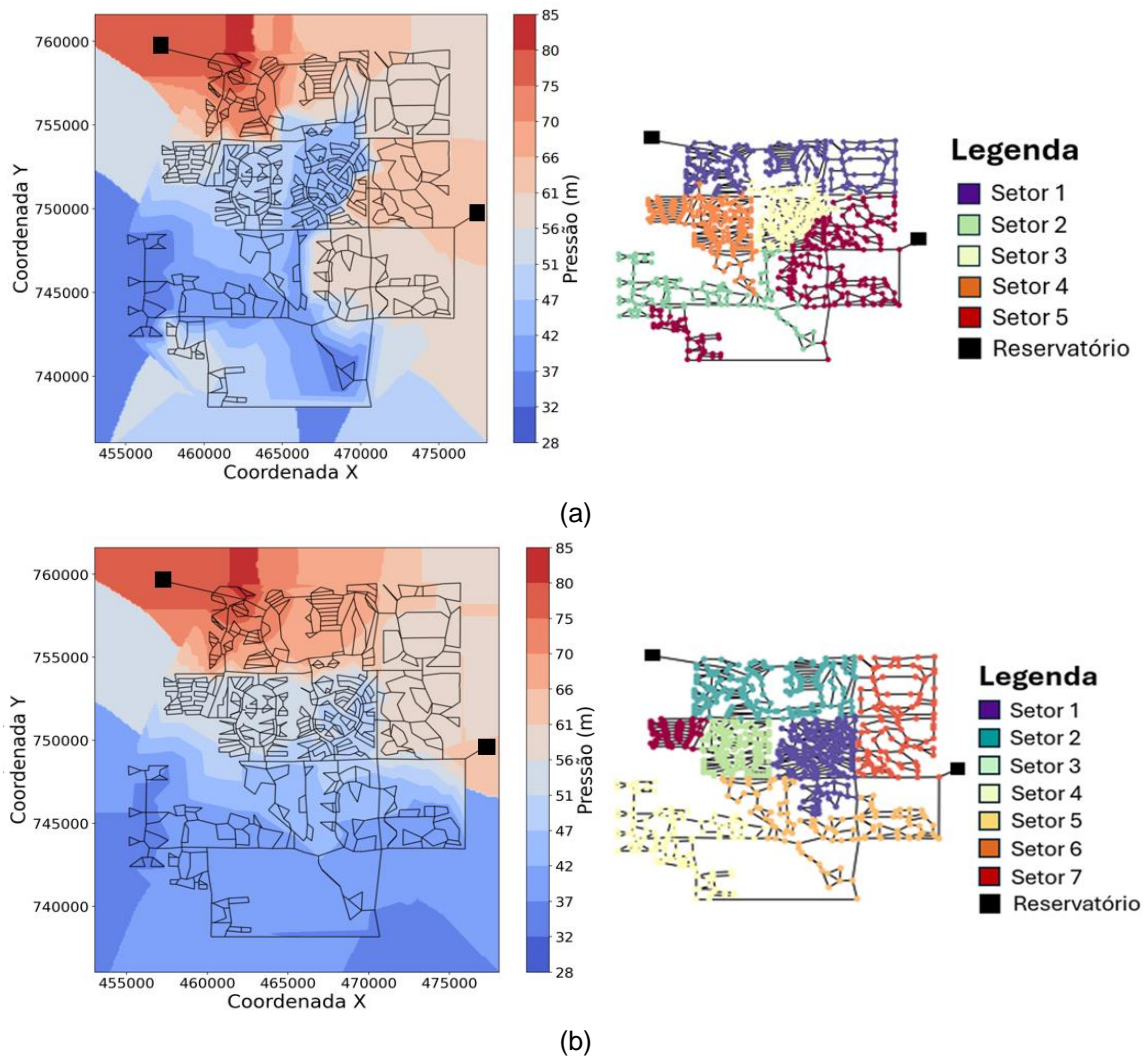
As pressões diminuem após a otimização dos setores devido ao aumento da perda de carga causada pela alocação e operação ótima das válvulas. Além disso, houve uma redução de  $I_{WA}$  após a setorização, o que pode ser atribuído ao aumento das velocidades da água nas tubulações.

#### 4.4.3 Otimização integrada de setores e do coeficiente de perda de carga das válvulas (C-2)

No Cenário C-2, a criação de setores é realizada em simultâneo com a otimização da operação das válvulas (i.e., caracterizada pelo valor ótimo do  $K$ ). Conforme referido, as  $VI$  são alocadas para  $K < 10$ , enquanto as  $V_{CV}$  são alocadas para  $K \geq 10$ . As otimizações tiveram como objetivo minimizar  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$ , separadamente. Portanto, são realizadas três otimizações mono-objetivo para cada algoritmo híbrido, totalizando seis otimizações. A maioria das otimizações resultou em configurações de setores com um número maior de  $VI$  do que  $V_{CV}$  após a implementação do algoritmo híbrido Louvain-PSO. Para otimização de  $CV$  obteve-se 10  $V_{CV}$  e 36  $VI$ , para otimização de  $PU$  gerou-se 11  $V_{CV}$  e 35  $VI$ , e para  $I_{WA}$ , obteve-se 3  $V_{CV}$  e 43  $VI$ .

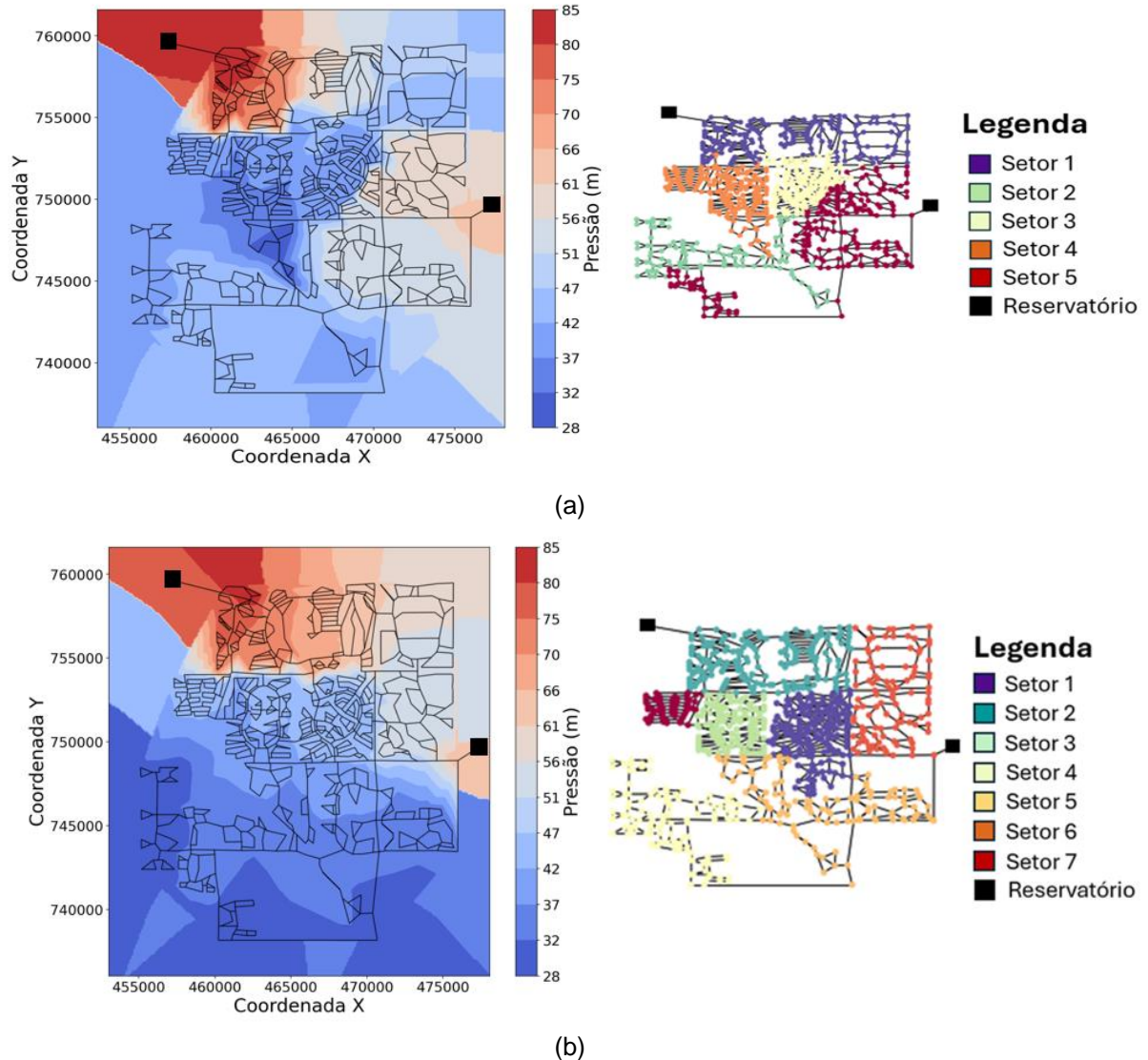
Por outro lado, os resultados obtidos pelo algoritmo Leiden-PSO geraram um número maior de *VCV* nos cenários voltados à minimização de *PU* e  $I_{WA}$ . Para otimização de *CV* obteve-se 10 *VCV* e 11 *VI*, para *PU* gerou-se 17 *VCV* e 4 *VI*, e para  $I_{WA}$  obteve-se 13 *VCV* e 8 *VI*. A maior quantidade de *VCV* pode ser atribuída ao maior controle hidráulico de pressões e de vazões nas tubulações assegurado pelas *VCV*. Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 são apresentados os mapas de superfície de pressões mínimas obtidas durante o período de simulação hidráulica, após as otimizações realizadas pelos algoritmos híbridos Louvain-PSO e Leiden-PSO, para três formulações da função objetivo: minimização de custos, uniformização de pressões e idade da água.

**Figura 4.5 – Mapas de superfície de pressão mínima desenvolvidos após as setorizações feitas por (a) Louvain-PSO e (b) Leiden-PSO em C-2 visando a minimização de *CV*.**



Fonte: Autor da tese (2025).

**Figura 4.6 – Mapas de superfície de pressão mínima desenvolvidos após as setorizações feitas por (a) Louvain-PSO e (b) Leiden-PSO em C-2 visando a minimização de *PU*.**



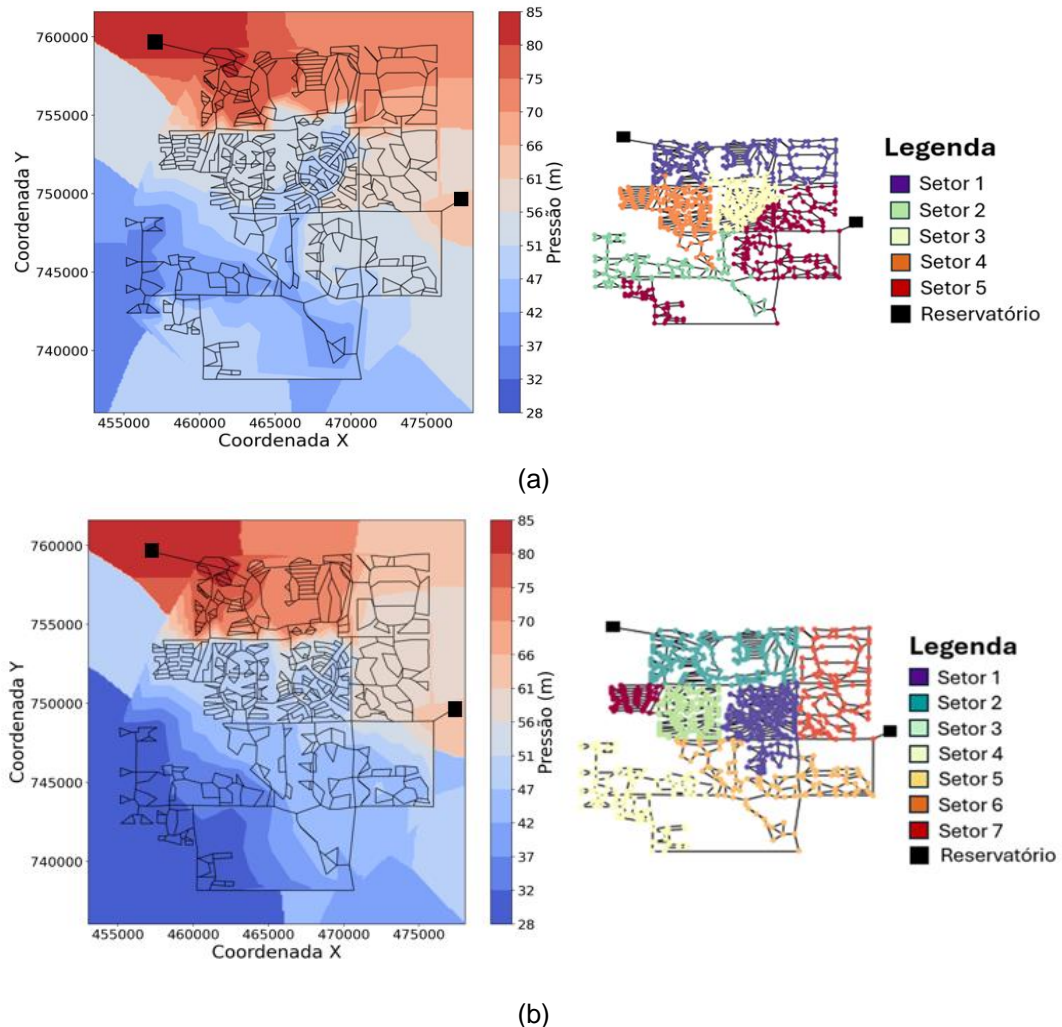
Fonte: Autor da tese (2025).

Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, registra-se que as pressões mínimas mais elevadas são ocorrem nos setores localizados na região norte da rede KL para ambos os algoritmos híbridos. No entanto, a região com as maiores pressões mínimas inclui parte do Setor 1 nos cenários de otimização gerados pelo algoritmo híbrido Louvain-PSO. Similarmente, a região com as maiores pressões mínimas na configuração de setores criada pelo algoritmo Leiden-PSO está localizada dentro do Setor 2.

As pressões mínimas mais baixas são encontradas em partes do Setores 2 e 4 para os cenários de otimização gerados pelo algoritmo híbrido Louvain-PSO, enquanto as

menores pressões mínimas para a configuração de setores criada pelo algoritmo Leiden-PSO estão localizadas nos Setores 4 e 5.

**Figura 4.7 – Mapas de superfície de pressão mínima desenvolvidos após as setorizações feitas por (a) Louvain-PSO e (b) Leiden-PSO em C-2 visando a minimização de  $I_{WA}$ .**



Fonte: Autor da tese (2025).

Além disso, nota-se que as pressões mais baixas estão distribuídas nas regiões centro-oeste, sudoeste e sul da rede KL, ao analisar os cenários de otimização voltados à minimização de  $PU$  para ambos os algoritmos híbridos. Tal fato deve-se ao distanciamento das regiões aos reservatórios, visto que há uma redução de perda de carga ao longo das tubulações que conectam os reservatórios aos nós consumidores.

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados de custos e critérios hidráulicos obtidos por ambos os algoritmos híbridos antes e depois da otimização integrada de setores e do parâmetro  $K$ .

**Tabela 4.2 – Resultados obtidos antes e após a otimização integrada de setores e  $K$  das válvulas.**

Algoritmo Híbrido	FO	Critério de Avaliação		
		CV (€)	PU	$I_{WA}$ (h)
Louvain-PSO	CV	225.713	1,40	2,59
	PU	275.267	1,32	2,55
	$I_{WA}$	212.073	1,47	2,44
Leiden-PSO	CV	267.514	1,41	2,73
	PU	346.510	1,32	2,74
	$I_{WA}$	286.185	1,40	2,52
Rede KL sem Setores			1,52	2,95

Fonte: Autor da tese (2025).

Observando os resultados, nota-se que ambos os algoritmos híbridos Louvain-PSO e Leiden-PSO alcançaram resultados caracterizados por significativa redução de  $PU$  em relação ao estado original da rede KL, sem setores. Entretanto, pode-se observar que nos cenários de otimização de setores desenvolvidos pelo algoritmo Louvain-PSO geraram menores  $CV$  e  $I_{WA}$ , o que determina projetos de setorização mais econômicos e com menor idade da água, conseqüentemente, de maior qualidade ao consumidor.

Analisando comparativamente os resultados dos critérios hidráulicos obtidos antes e depois da otimização integrada de setores e do parâmetro  $K$ , observa-se uma redução nas pressões e na idade da água em todos os casos após as otimizações.

Neste sentido, a diminuição das pressões pode ser atribuída ao aumento das perdas de carga causadas pelos valores mais altos de  $K$  obtidos nas otimizações, enquanto a redução da idade da água pode estar relacionada às maiores velocidades de escoamento nas tubulações após a subdivisão da rede KL em setores.

#### 4.4.4 Otimização integrada de setores, do coeficiente de perda de carga e do diâmetro das válvulas (C-3)

No Cenário C-3, os setores são gerados com base nas otimizações dos parâmetros  $K$  e  $D$  das válvulas. Especificamente, as  $VI$  são alocadas para  $K < 10$ , e as  $VCV$  são alocadas para  $K \geq 10$ , tendo também seus  $Ds$  otimizados.

É importante enfatizar que a otimização do  $D$  tem como objetivo reduzir, ainda mais, as pressões e os custos envolvendo a alocação de válvulas. No caso, o  $D$  original das válvulas pode ser reduzido até 50 mm no processo de otimização, que tiveram como objetivo minimizar  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$ .

A quantidade de  $VI$  foi, em geral, maior que a de  $VCV$  nas otimizações realizadas com o algoritmo híbrido Louvain-PSO. No caso do algoritmo Louvain-PSO, para a minimização de  $CV$  obteve-se 32  $VCV$  e 14  $VI$ , para a minimização de  $PU$  gerou-se 13  $VCV$  e 33  $VI$ , e para a minimização de  $I_{WA}$  obteve-se 12  $VCV$  e 34  $VI$ .

Em contraste, a quantidade de  $VCV$  foi predominantemente maior que a quantidade de  $VI$  nas otimizações conduzidas com o algoritmo híbrido Leiden-PSO, pelas quais foi possível obter 16  $VCV$  e 5  $VI$  para a minimização de  $CV$ , 17  $VCV$  e 4  $VI$  para a minimização de  $PU$ , e 15  $VCV$  e 6  $VI$  para a minimização de  $I_{WA}$ .

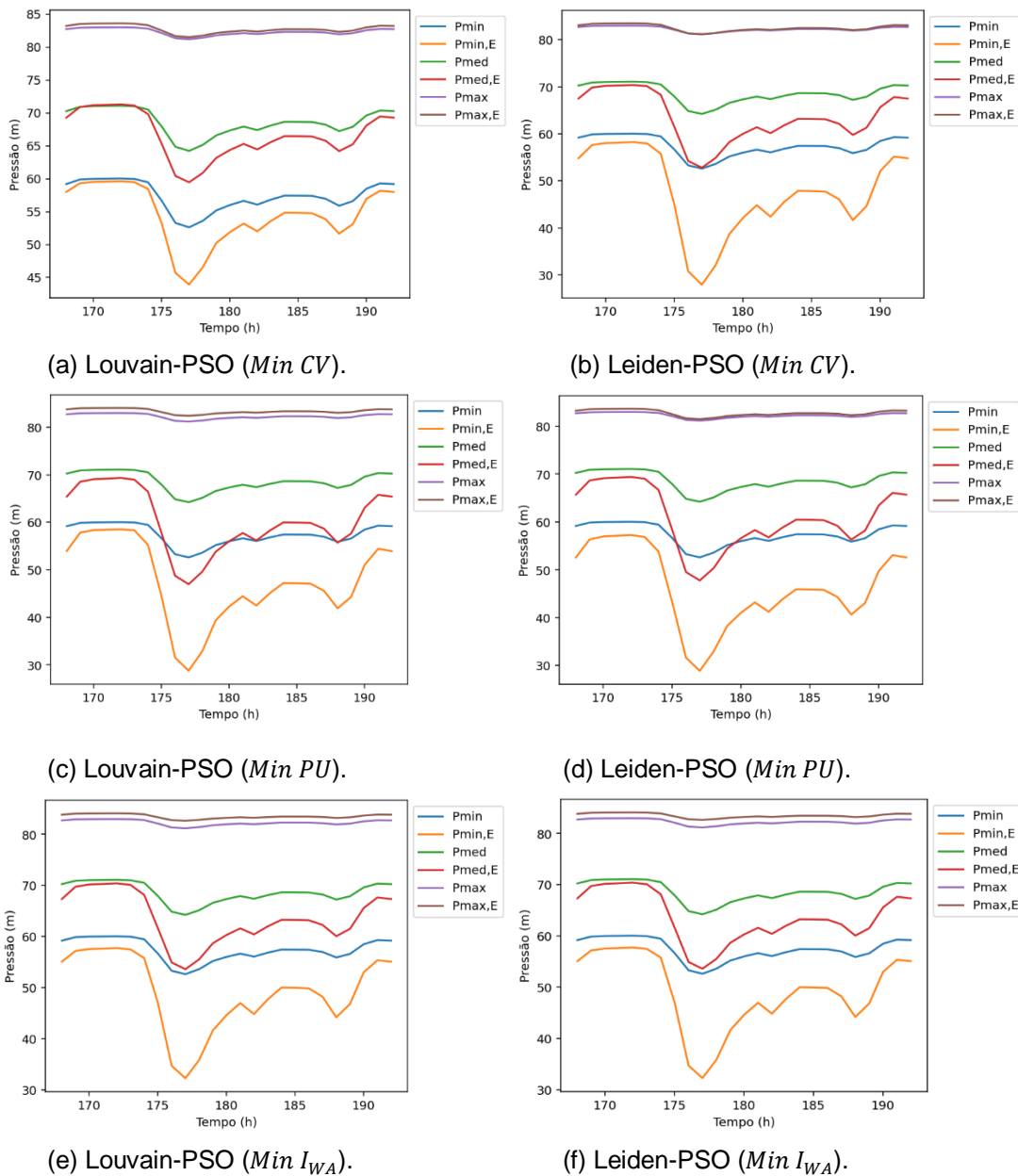
No caso do algoritmo híbrido Louvain-PSO, o valor de  $D$  das válvulas foi reduzido, em média, em 100 mm, 80 mm e 70 mm para as minimizações de  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$ . No algoritmo híbrido Leiden-PSO, a redução média de  $D$  foi superior, de 140 mm, 90 mm e 130 mm para as minimizações de  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$ , respectivamente.

A minimização de  $CV$  está diretamente associada à maior redução de  $D$  das válvulas e, conseqüentemente, os cenários de otimização focados na minimização de  $CV$  alcançaram as maiores reduções em  $D$ .

Apresenta-se na Figura 4.8 as variações das pressões antes e depois das otimizações realizadas pelos algoritmos híbridos Louvain-PSO e Leiden-PSO.

A seguinte notação é usada nesta figura:  $p_{min}$  representa a pressão mínima horária na rede sem setores;  $p_{min,E}$  representa a pressão mínima horária na rede com setores;  $p_{med}$  representa a pressão média horária na rede sem setores;  $p_{med,E}$  representa a pressão média horária na rede com setores;  $p_{max}$  representa a pressão máxima horária na rede sem setores; e  $p_{max,E}$  representa a pressão máxima horária na rede com setores.

**Figura 4.8 – Análise comparativa de pressões antes e após a otimização integrada de setores,  $K$  e  $D$ , obtidas pelos algoritmos Louvain-PSO e Leiden-PSO.**



Fonte: Autor da tese (2025).

Apesar dos gráficos apresentarem tendências semelhantes, com poucas diferenças perceptíveis, as pressões médias e mínimas foram significativamente reduzidas após a implementação do algoritmo híbrido Leiden-PSO em comparação com o algoritmo Louvain-PSO, no entanto, as pressões máximas aumentaram para ambos os algoritmos híbridos.

No caso do algoritmo Leiden-PSO (Figura 4.8 – b, d, f) os valores mínimos de pressão durante o período de simulação hidráulica de 24 horas atingiram valores muito próximos de 28 m (pressão mínima requerida pela rede KL para abastecimento) para todas as otimizações, o que indica, de forma geral, um melhor desempenho de otimização para as três funções-objetivo ( $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$ ) após a implementação do algoritmo híbrido Leiden-PSO. Na Tabela 4.3 é apresentada a comparação dos resultados de custos e critérios hidráulicos obtidos por ambos os algoritmos híbridos para os três cenários de otimização.

**Tabela 4.3 – Resultados obtidos antes e após a setorização para os três cenários de otimização (C-1, C-2 e C-3).**

Algoritmo Híbrido	Cenário	FO	Critério de Avaliação		
			CV (€)	PU	$I_{WA}$ (h)
Louvain-PSO	C-1	CV	202.731	1,39	2,56
		PU	202.731	1,34	2,56
		$I_{WA}$	202.731	1,38	2,53
	C-2	CV	225.713	1,40	2,59
		PU	275.267	1,32	2,55
		WA	212.073	1,47	2,44
	C-3	CV	88.906	1,47	2,88
		PU	117.172	1,31	2,65
		$I_{WA}$	146.497	1,42	2,51
Leiden-PSO	C-1	CV	207.189	1,45	2,48
		PU	207.189	1,38	2,46
		$I_{WA}$	207.189	1,44	2,44
	C-2	CV	267.514	1,41	2,73
		PU	346.510	1,32	2,74
		$I_{WA}$	286.185	1,40	2,52
	C-3	CV	84.665	1,40	2,91
		PU	192.315	1,32	2,77
		$I_{WA}$	115.288	1,52	2,59
	Rede KL sem Setores		1,52	2,95	

Fonte: Autor da tese (2025).

Os menores valores da função-objetivo de  $CV$  correspondem às soluções obtidas pelo algoritmo Leiden-PSO para C-3, enquanto os menores valores de  $I_{WA}$  foram obtidos por ambos os algoritmos híbridos, uma vez que o menor valor de  $I_{WA}$  (2,44

h) foi encontrado em C-1 e C-2 para os algoritmos Leiden-PSO e Louvain-PSO, respectivamente.

No caso da avaliação das pressões nas tubulações da rede KL, a partir da Tabela 4.3 pode-se observar que os menores valores de  $PU$  obtidos foram encontrados, praticamente, com o auxílio de ambos os algoritmos híbridos também, pois o menor valor de  $PU$  desenvolvido após a implementação do algoritmo Louvain-PSO foi 1,31 em C-3, enquanto o menor valor de  $PU$  gerado com o auxílio do algoritmo Leiden-PSO foi 1,32.

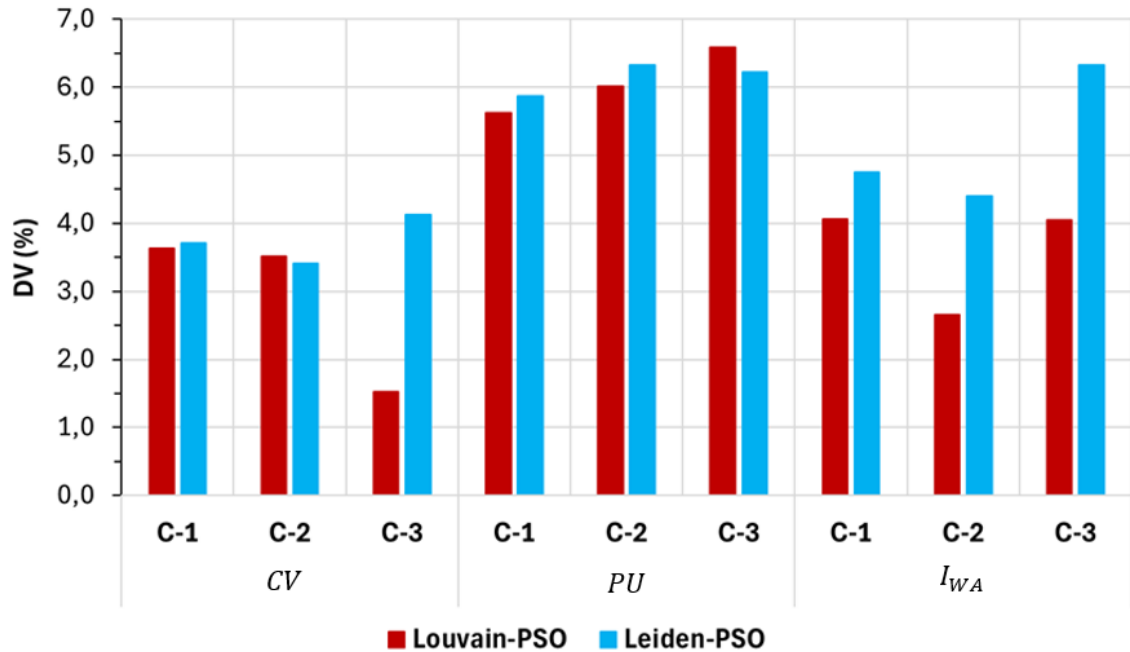
De modo geral, o cenário clássico (C-1) de setorização desenvolvido com o algoritmo Leiden-PSO produziu configurações de setores com menores valores de  $I_{WA}$  em comparação com os outros cenários. Portanto, estes cenários são caracterizados por apresentarem uma maior qualidade da água fornecida, já que o tempo de estagnação da água nas tubulações é reduzido.

Contudo, os cenários C-2 e C-3 foram os que resultaram nos menores valores de  $PU$  na rede KL após a otimização dos setores. Este fato pode ser atribuído a estratégia hidráulica de redução de otimização do  $K$  e  $D$  das válvulas, o que contribui para uma maior redução de pressões, devido as maiores perdas de carga geradas pelas válvulas.

#### 4.4.5 Estimação de vazamentos, impacto econômico e emissões de carbono dos cenários de setorização

A percentagem de redução de vazamentos ( $DV$ ) e o respectivo volume de água ( $V_{DV}$ ) são calculados para os 18 processos de otimização. Apresenta-se na Figura 4.9 os resultados de  $DV$  para cada otimização realizada. Nota-se que o algoritmo Louvain-PSO gerou cenários de setorização com  $DV$  mais elevado do que os cenários desenvolvidos pelo algoritmo Leiden-PSO em C-2 visando minimizar  $CV$  e em C-3 buscando minimizar  $PU$ .

**Figura 4.9 – Redução de volume de vazamento para cada cenário de otimização considerando um período diário de abastecimento de água.**



Fonte: Autor da tese (2025).

O algoritmo híbrido Leiden-PSO gerou configurações ótimas de setores com maiores reduções de vazamentos na maioria dos cenários de otimização, o que se deve ao menor número de tubulações de fronteira e válvulas alocadas, o que reduz a interferência da setorização nas pressões ao longo da rede. Vale destacar que o cenário C-3, cujo objetivo foi minimizar a  $PU$ , resultou na redução do volume de perdas ( $V_{DV}$ ) igual a 305,88 m<sup>3</sup> quando a setorização foi obtida algoritmo híbrido Louvain-PSO. A título ilustrativo, este volume seria suficiente para abastecer uma cidade com 2000 habitantes, durante um dia considerando consumo médio diário de 150 L por pessoa.

Foram avaliados, também, os benefícios econômicos e ambientais associados à redução das perdas de água. Foram calculados o benefício econômico total ( $B_{DV}$ ) e da redução no consumo de energia ( $B_{EDV}$ ) relacionados aos valores de perdas economizados, através das Eqs. (4.6) e (4.7), e das emissões desnecessárias de CO<sub>2</sub> pela Eq. (4.8). Os cenários C-2 e C-3 que visaram minimizar a  $PU$  se destacaram-se como aqueles com maiores benefícios econômicos e ambientais associados às reduções de vazamentos.

O algoritmo híbrido Louvain-PSO, com o objetivo de reduzir *PU*, apresentou a maior redução no volume de vazamento (6.59%), o que conseqüentemente evitou a perda de 305,88 m<sup>3</sup> de água na rede KL durante um período de 24 horas, resultando em economia de € 786,10 e 152,02 kWh de energia associada ao volume de vazamento reduzido. Estes resultados evidenciam o efeito da redução de vazamentos, melhoria da eficiência operacional e promoção da sustentabilidade.

Em contraste, o cenário com menor redução no volume de vazamento também foi encontrado em C-3 com a utilização do algoritmo híbrido Louvain-PSO, no entanto, tendo como objetivo a redução de *CV*. Este cenário obteve apenas 1.53% de redução no volume de vazamento, evitando a perda de 70,983 m<sup>3</sup> de água em um período de 24 horas, e proporcionando economia de € 182,43 e 35,28 kWh de energia associada à redução correspondente de vazamento.

Em termos de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, os cenários de otimização dos setores levaram a uma diminuição nas emissões variando entre 0,014 e 0,034 toneladas de CO<sub>2</sub> durante as 24 horas de simulação hidráulica. Tal fato evidencia o impacto ambiental positivo do controle de vazamentos na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Neste contexto, destaca-se, especialmente, os cenários que visaram a redução de *PU*, uma vez que alcançaram as maiores reduções de emissões de CO<sub>2</sub>, com uma faixa de diminuição total entre 0,029 e 0,034 toneladas de CO<sub>2</sub>, após a implementação dos setores realizadas por cada algoritmo híbrido.

De forma geral, estes resultados destacam a importância da redução de vazamentos alcançada por meio de estratégias de setorização ótima voltadas à minimização de pressões excessivas em RDA. Especificamente, os cenários C-2 e C-3, que tiveram como objetivo minimizar *PU*, se destacaram por gerarem as maiores reduções nas perdas de água, nos custos econômicos e nas emissões de carbono associadas. Esses resultados reforçam o papel essencial do controle de pressões na promoção da sustentabilidade e da eficiência energética dos sistemas de abastecimento urbano de água.

## 4.5 Conclusões

De modo geral, ambos os algoritmos híbridos Louvain-PSO e Leiden-PSO permitiram obter soluções de setorização otimizadas muito promissoras, permitindo um maior controle de pressões, a redução de idade da água e menores custos de alocação de válvulas. Os resultados dos diferentes cenários de otimização (C-1, C-2 e C-3) mostram que abordagens integradas de otimização envolvendo a criação de setores e operação das válvulas são cruciais para resolver problemas de otimização.

As soluções de setorização mais eficazes neste estudo, caracterizadas por menores pressões e menor custo de projeto, estão associadas à otimização conjunta entre setores e o  $K$  das válvulas (C-2), e à otimização simultânea de setores,  $K$  e  $D$  das válvulas (C-3). Por outro lado, os melhores resultados relativos à minimização do índice de idade da água ( $I_{WA}$ ) estão relacionados com o modelo clássico de otimização de setores, o qual considera a otimização da operação da RDA somente após a setorização (C-1).

Neste estudo, tanto o algoritmo híbrido Louvain-PSO quanto o algoritmo Leiden-PSO levaram reduções de vazamentos em todos os cenários de otimização, o que se traduz em benefícios significativos para a companhia de águas, o ambiente e a sociedade. Ao minimizar as perdas de água, os algoritmos apoiam um abastecimento mais confiável e seguro, garantindo que as comunidades, especialmente as cidades em desenvolvimento, tenham acesso adequado aos recursos. Essa melhoria contribui diretamente para a sustentabilidade ambiental, reduzindo a distribuição desnecessária de água, o que, por sua vez, diminui o consumo de energia e os custos operacionais.

A redução das perdas de água leva a uma diminuição nas emissões de  $\text{CO}_2$  associadas à energia utilizada no bombeamento e tratamento da água, aumentando a eficiência energética geral do sistema. Estes resultados combinados reforçam a importância da otimização inteligente em redes de água, promovendo sustentabilidade de longo prazo, resiliência e serviços públicos mais econômicos para os sistemas de abastecimento de água.

## 5 SETORIZAÇÃO DINÂMICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Este capítulo é uma versão adaptada de um artigo científico submetido em revista internacional: ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas; COVAS, Dídida; BRENTAN, Bruno. Dynamic District Metered Areas. **Journal of Water Process Engineering**. Submetido em fevereiro de 2026.

### RESUMO

Apesar da setorização estática das RDA aumentar o controle de pressões e facilitar a regulação de demandas e detecção de vazamentos, frequentemente, os setores criados geram maiores perdas de energia de escoamento devido aos maiores caminhos que a água tende a percorrer entre os reservatórios e os pontos de consumo, reduzindo assim, a qualidade da água que chega à população. Neste contexto, este estudo propõe uma nova metodologia setorização dinâmica de RDA, com a otimização da abertura das VCV realizadas hora a hora e visando reduzir custos, pressões e idades da água. Os resultados obtidos com as setorizações dinâmicas são comparados com os das setorizações estáticas, com todos os cenários de criação de setores sendo fundamentados na alocação e operação ótima dos dispositivos de controle. Utiliza-se como caso de estudo a rede KL. Os resultados são analisados em termos de critérios hidráulicos e custo total de alocação de válvulas. Além disso, visando a obtenção de projetos de setorização de maior eficiência hidro-energética, o comportamento hidráulico da rede KL é também avaliado quanto à redução de vazamentos, consumo de energia e custos associados, após os cenários de setorização. Este estudo demonstra que a setorização dinâmica da RDA permite obter uma maior eficiência hidroenergética e menor custos de operação (perdas de água e eletricidade), em comparação a setorização estática.

Palavras-chaves: otimização; rede de distribuição de água; setorização dinâmica; vazamentos.

### 5.1 Introdução

O estudo de RDA sempre foi uma desafio, devido à complexidade dos sistemas de abastecimento e da dificuldade de extração, modelagem, análise e tratamento de

dados para avanços em estudos de monitoramento, qualidade da água, desempenho operacional e capacidade da rede em suportar condições anômalas e emergenciais (BRENTAN *et al.*, 2025).

Para enfrentar este desafio, a criação de setores ou Distritos de Medição (do inglês, *District Metered Areas*) se destaca como uma forma de melhorar o gerenciamento, em geral, o gerenciamento das RDA, uma vez que a setorização do sistema de distribuição acaba tornando mais simplificado controle de pressões, a regulação de demandas e a detecção de vazamentos na rede (KOWALSKA; SUCHORAB; KOWALSKI, 2022).

Em literatura há uma vasta gama de estudos com abordagens, modelo e análises de dados matemáticos e hidráulicos diferentes em âmbito de setorização. Como exemplo tem-se o estudo de Di Nardo *et al.* (2017b), em que os autores desenvolveram uma configuração ótima de setor e válvulas permanente ao longo do período de simulação hidráulica (setorização estática) em uma RDA mexicana com o intuito de gerar um abastecimento de água mais robusto e de menor custo em termos de energia consumida pelo sistema.

Saldarriaga *et al.* (2019) propuseram uma metodologia de setorização estática que permite a redução de custos, pressões e idade da água, mantendo a similaridade de demanda entre os setores da rede E-Town. Zhang *et al.* (2019) implementaram uma otimização multiobjetivo para a setorização estática de uma RDA considerando a minimização de pressão média, idade da água média e custos de alocação de dispositivos de controle.

Mais recentemente, Kim *et al.* (2022) desenvolveram um método de avaliação e determinação de setores de controle prioritário baseado, basicamente, em múltiplos indicadores topológicos e de eventos críticos envolvendo a qualidade da água para abastecimento. O trabalho foi realizado em resposta à recente crise, em larga escala, de água enferrujada (água avermelhada) na Coreia também surge como mais uma opção de setorização levando em conta, realmente, o estado de qualidade da água da rede de abastecimento.

No entanto, apesar destes estudos de setorização estática contribuírem para melhorar o gerenciamento de RDA, em geral, setores com configuração de válvulas e medidores de vazão permanentes ao longo do tempo podem também reduzir a qualidade de água devido aos caminhos mais longos que a água precisa percorrer desde os reservatórios até os nós consumidores (BRENTAN *et al.*, 2021; GRAYMAN; MURRY; SAVIC, 2009).

Outro fator que pode ser ocasionado pela implementação de setores estáticos é a redução da carga de pressão ao longo das tubulações e, conseqüentemente, da resiliência hidráulica do sistema (GIUDICIANNI *et al.*, 2020b). Tal contexto também é estabelecido devido à menor quantidade de caminhos alternativos para abastecimento de água, o que diminui a capacidade de resposta da rede a eventos anômalos, isto é, de redirecionar o fluxo de água em quantidade e qualidade aceitáveis mantendo as pressões adequadas.

Desta forma, com o intuito de melhorar ainda mais o desempenho das RDA e flexibilizar a operação de setores, na última década, alguns estudos foram publicados considerando a setorização dinâmica da RDA. Por exemplo, Wright *et al.* (2014) propuseram um método prático de setorização dinâmica com base na implementação de um processo de otimização por programação não-linear e controladores de redes multifuncionais integrados por válvula do tipo globo e componentes adaptados. Neste trabalho, os autores visaram reduzir as pressões em RDA avaliando três cenários com configurações de válvulas pré-estabelecidas. No caso, o cenário com todas as válvulas operando de forma dinâmica gerou melhor resultado com maior redução de pressão.

Posteriormente, Giudicianni *et al.* (2020a) desenvolveram um estudo de setorização dinâmica com o foco em gerar uma configuração ótima de setores para cenário anômalo referente a pico de demanda. Giudicianni *et al.* (2020b) implementaram uma setorização dinâmica visando a obtenção de uma configuração ótima de setores para períodos diurno (maior demanda) e noturno (menor demanda), com objetivo de recuperação de energia associada à RDA.

Fu *et al.* (2022) exploraram um método dinâmico de setorização, a partir de redes neurais de grafos, em que as tubulações de fronteira (entre os setores) são abertas ou fechadas, conforme sua influência no sistema calculada via teoria de redes complexas. Os autores elaboraram um modelo visando obter configurações ótimas de setores mais preparadas às situações emergenciais de abastecimento.

Mais recentemente, Shekofteh, Yousefi-Khoshqalb e Piratla (2023) também desenvolveram uma metodologia fundamentada na criação de setores com base no horário de máxima demanda, visando garantir o abastecimento de água em cenário crítico.

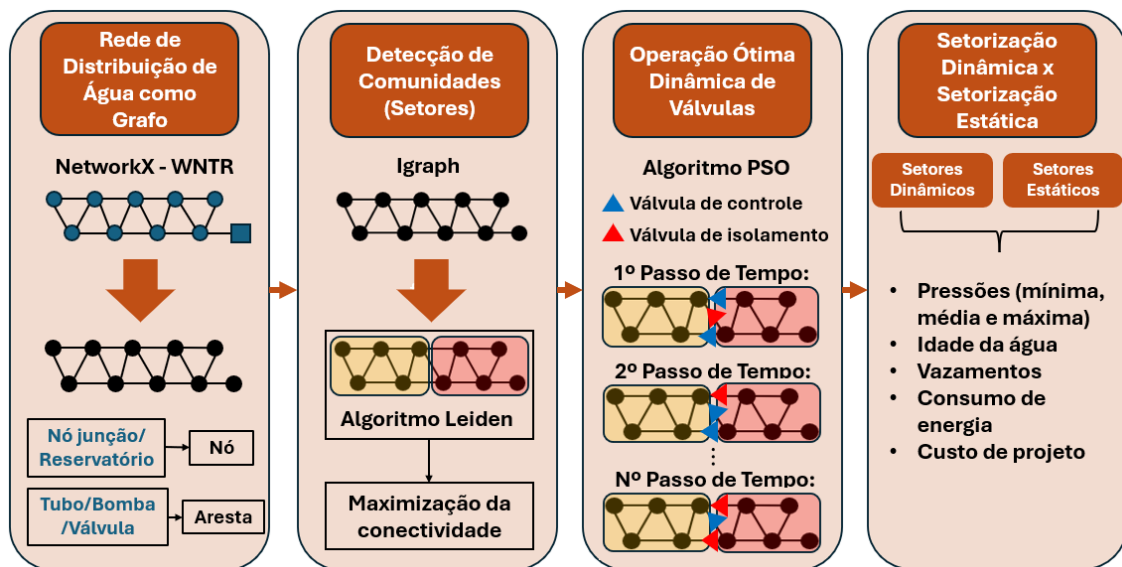
Entretanto, apesar dos diversos estudos já consolidados em literatura envolvendo a setorização dinâmica, ainda há uma lacuna a ser preenchida relacionada ao estabelecimento de uma configuração ótima de válvula por passo de tempo, continuamente, durante o período de simulação hidráulica. Tal processo pode garantir uma maximização da performance hidroenergética do sistema de abastecimento, além de encontrar uma configuração de válvulas de menor custo.

À vista deste contexto, neste trabalho é realizada a setorização dinâmica a partir da otimização, hora a hora, da operação da RDA, com intuito de garantir projetos de setorização de máxima redução de pressões, vazamentos, idades da água e custos.

## **5.2 Material e métodos**

Este trabalho é constituído de 4 etapas (Figura 5.1), sendo elas: (1) modelagem da RDA como grafo; (2) detecção de comunidades (setores); (3) operação ótima de setores estáticos e dinâmicos; e (4) análise de resultados associados à redução de vazamentos, mitigação do consumo excessivo de energia e custo total de alocação de válvulas, entre os cenários de otimização de setores dinâmicos e estáticos.

Figura 5.1 – Etapas para elaboração do estudo.



Fonte: Autor da tese (2025).

O presente estudo considera um período de simulação hidráulica de 24h avaliado no software EPANET 2.2 (ROSSMAN *et al.*, 2020). Os relatórios com os resultados hidráulicos são gerados a cada hora ao longo do período de simulação. No caso do parâmetro de qualidade da água abordado (idade da água), os resultados são calculados de 5 em 5 minutos, porém com os resultados mostrados em relatório considerando o passo de tempo de 1 hora.

A modelagem hidráulica do problema de otimização consiste, basicamente, na preparação do modelo e adequada aplicação de mecanismos hidráulicos para consolidação dos setores, dinamicamente ou estaticamente, visando melhorar o desempenho hidroenergético da operação hidráulica da RDA.

Desse modo, após análises prévias de convergência da curva de idade da água ao longo do tempo para cada nó de consumo da rede, primeiramente, estabeleceu-se o passo de tempo de 168h como marco inicial de simulação hidráulica do modelo para todas as otimizações realizadas neste estudo. Portanto, todas as otimizações se iniciaram no passo de tempo de 168h e terminaram no passo de tempo de 192h, uma vez que o período de simulação hidráulica considerado é de 24h.

Entretanto, para alcançar o objetivo melhorar o desempenho hidroenergético da operação hidráulica da RDA, as válvulas de controle de vazão (*VCV*) e válvulas de isolamento (*VI*) precisam ser alocadas nas tubulações de fronteira a partir da implementação do algoritmo PSO. No caso, o algoritmo aloca um dos dois tipos de válvulas em todas as tubulações de fronteira nos processos de otimização.

No caso da otimização de setores dinâmicos, as configurações ótimas de válvulas variam a cada passo de tempo da simulação hidráulica realizada. Enquanto, na otimização de setores estáticos obtém-se apenas uma configuração ótima de válvulas correspondente a todo o período de simulação hidráulica estabelecido.

### 5.2.1 Rede de distribuição de água como grafo (Etapa 1)

O grafo ( $G$ ) ponderado é uma abstração matemática caracterizada por vértices ( $V$ ) conectados por arestas ( $E$ ) com um número não-negativo atribuído, isto é, uma ponderação atribuída ( $w(E)$ ), como definido na Eq. (5.1) (BONDY e FAN, 1991):

$$G = (V, w(E)) \quad (5.1)$$

Desse modo, fazendo uma analogia aos consagrados modelos hidráulicos de RDA, têm-se que  $V$  pode representar os nós de junção, tanques e reservatórios, enquanto  $w(E)$  pode corresponder tanto às características topológicas das tubulações (diâmetro, rugosidade, comprimento etc.), como aos parâmetros hidráulicos e de qualidade da água (vazão, velocidade, perda de carga, idade da água etc.).

No caso deste estudo, considera-se a ponderação das arestas dos grafos da RDA pela vazão, uma vez que esta ponderação possibilita a identificação dos nós de junção abastecidos para a criação de comunidades, que serão os setores de consumo do sistema de abastecimento de água.

Vale destacar que este processo de modelagem da RDA como grafo é realizado a partir da utilização das bibliotecas NetworkX (HAGBERG; SWART; CHULT, 2008), Igraph (CSARDI e NEPUSZ, 2006) e Water Network Tool for Resilience (WNTR) (KLISE; MURRAY; HAXTON, 2018) em linguagem de programação Python.

As bibliotecas NetworkX e Igraph possibilitam a extração dos grafos e implementação do algoritmo Leiden em sistemas complexos, enquanto a biblioteca WNTR permite que seja feita a interface entre o ambiente Spyder em linguagem de programação Python e o software EPANET 2.2.

### 5.2.2 Detecção de comunidades pelo algoritmo Leiden (Etapa 2)

Após a modelagem da RDA como grafo ponderado pela vazão, o algoritmo de detecção de comunidades chamado Leiden é implementado (TRAAG; WALTMAN; VAN ECK, 2019).

Este algoritmo, fundamentalmente, estabelece as comunidades, que, posteriormente, serão os setores, calculando a função de modularidade definida pela Eq. (4.1). Ressalta-se que o algoritmo Leiden é um algoritmo complexo e consiste em três etapas de processamento: movimentação local dos nós, refinamento das comunidades e agregação da rede. Essas etapas podem ser descritas da seguinte forma:

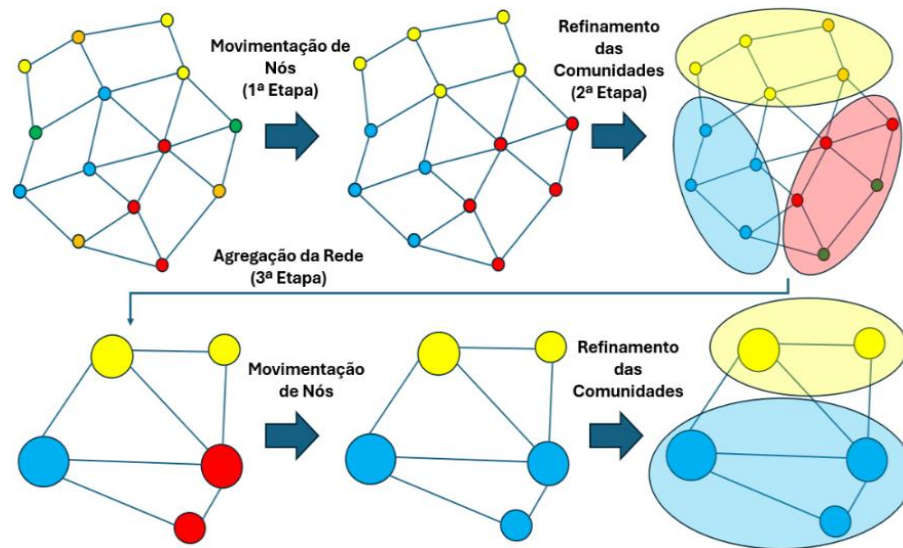
1ª etapa – O algoritmo começa com uma partição aleatória e move os nós individualmente de uma comunidade para outra, buscando encontrar uma configuração adequada de comunidades.

2ª etapa – As comunidades previamente particionadas são refinadas para aumentar a conectividade do sistema.

3ª etapa – Uma rede agregada é criada a partir das comunidades refinadas, utilizando as comunidades não refinadas para formar a comunidade inicial da rede agregada.

Estas etapas são repetidas até que nenhuma melhoria adicional possa ser feita na detecção de comunidades ou no cálculo da modularidade. Em sequência, na Figura 5.2 é apresentado o processo de detecção de comunidades realizado pelo algoritmo Leiden.

**Figura 5.2 – Processo de detecção de comunidades realizado pelo algoritmo Leiden.**



Fonte: Autor da tese (2025).

Portanto, o número e a localização das tubulações de fronteira são determinados por meio da maximização da modularidade utilizando o algoritmo de detecção de comunidades Leiden.

Em seguida, a alocação e a operação ótimas das válvulas são realizadas pelo algoritmo PSO, com o objetivo de minimizar as funções objetivo definidas.

### 5.2.3 Operação ótima de setores estáticos e dinâmicos (Etapa 3)

#### 5.2.3.1 Setores estáticos e dinâmicos

Primeiramente, é importante ressaltar que neste estudo são realizadas as otimizações dinâmica e estática dos setores, para fins de comparação em âmbito de desempenho hidráulico e custos de projeto relacionados à alocação ótima de válvulas.

No caso da otimização dinâmica executa-se uma otimização, conforme a função-objetivo estabelecida, para cada passo de tempo de simulação hidráulica, isto é, de hora em hora durante o período de 24 horas.

Desse modo, para o cenário de otimização dinâmica obtém-se uma configuração ótima de alocação e operação de válvulas a cada hora durante as 24 horas

simuladas. Vale destacar também que a demanda real e a idade da água de cada nó de consumo são atualizadas a cada hora após os cenários ótimos estabelecidos nos cenários correspondentes à setorização dinâmica.

Já no caso da setorização estática, a otimização é realizada considerando todo o período de simulação hidráulica e, portanto, ao final do processo de otimização, gera-se apenas uma configuração ótima de alocação e operação de válvulas correspondente a todo o período simulado.

Em ambos os tipos de setorização, os processos de otimização determinam a alocação de *VCV* e *IV* nas tubulações de fronteira da rede, isto é, tubos que conectam os diferentes setores desenvolvidos.

As *VCV* são importantes pois podem regular a entrada do fluxo de água dos reservatórios para dentro dos setores conforme a demanda e o estado hidráulica da RDA, evitando assim, maiores perdas no sistema e um desequilíbrio de vazão de água para diferentes setores na rede.

Já as *VI* são fundamentais em um processo de setorização, devido à capacidade desses dispositivos em isolar setores, seja para manutenção ou, até mesmo, para redirecionar o fluxo de água para outros setores de consumo do sistema de abastecimento de água.

Todos os cenários são fundamentados na otimização do *K* e permitem a criação dos setores (abertura e fechamento de válvulas) juntamente com a operação ótima das *VCV*. A estratégia hidráulica é caracterizada de modo que: *VI* são alocadas quando  $K < 10$ , devido a insensibilidade desses dispositivos ao fluxo (vazão relativamente pequena); e *VCV* são alocadas quando  $K \geq 10$ , por, justamente, apresentarem maior sensibilidade ao fluxo, permitindo a otimização de *K* para reduzir as pressões operacionais ao longo do dia.

O valor limite de  $K = 10$  foi determinado após pré-simulações realizadas para diferentes valores de *K*, supondo a utilização de válvulas de tipo Globo. Nestas simulações, valores menores do que 10 não reduziram significativamente as

pressões, uma vez que as vazões nas tubulações de fronteira eram relativamente pequenas. Neste contexto, também é importante citar que, segundo Rossman *et al.* (2020), válvulas de tipo Globo operam com  $K = 10$  ainda totalmente abertas. Portanto, este valor foi adotado para operação das válvulas e criação de setores, em que uma vez atingido esse limite, o algoritmo continua a otimizar os valores de  $K$  acima de 10, com o objetivo de reduzir ainda mais as pressões na RDA.

A operação e a instalação ótimas de válvulas são realizadas com o apoio do algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization – PSO*) (Kennedy e Eberhart, 1995). O algoritmo PSO é uma técnica meta-heurística inspirada no comportamento social de um enxame de partículas, desenvolvida para resolver problemas de otimização de alta complexidade, não lineares, multimodais e de alta dimensionalidade.

#### 5.2.3.2 Funções-objetivo

Este estudo utiliza otimizações mono-objetivo por meio do algoritmo PSO para o desenvolvimento de setores dinâmicos e estáticos, com base na alocação de  $V_{CV}$  e  $I_V$  de acordo com seus valores ótimos de  $K$ . 4 problemas de otimização mono-objetivo são implementados para ambos os tipos de setores (estáticos e dinâmicos), em que cada um busca minimizar um objetivo distinto, como:

- (i) custo de total de alocação de válvulas ( $FO_1 = Min CV$ ) calculado pelas Eqs. (3.5, 3.6 e 3.7) (WDSA/CCWI Committee, 2022);
- (ii) o índice adaptado de uniformidade de pressão ( $FO_2 = Min PU$ ) definido pela divisão do valor obtido a partir da Eq. (3.8) (ALHIMIARY e ALSUHAILY, 2007) pelo total de passos de tempo de simulação hidráulica;
- (iii) índice da idade média ponderada da água acima de limite estabelecido ( $FO_3 = Min I_{WA}$ ) definido pela Eq. (3.9) (MARCHI *et al.*, 2014);

(iv) custo e uniformidade de pressão,  $CV + PU$  (19 – 6h), durante o período noturno (maiores perdas), e custo e o índice de idade da água,  $CV + I_{WA}$  (7h – 18h), durante o período diurno (maior consumo), conforme as seguintes equações:

$$FO_4 = \text{Min}((1 - w).CV^* + w.I_{WA}^*), \text{ se } t \in [0,6] \text{ e } [19,23] \quad (5.2)$$

ou

$$FO_4 = \text{Min}((1 - w).CV^* + w.PU^*), \text{ se } t \in [7,18] \quad (5.2)$$

em que  $w$  é o peso atribuído, sendo igual a 0,5. Vale destacar que as variáveis indicadas com \* são normalizadas por meio do método de escalonamento Min–Max, de modo a representá-las em uma escala de 0 a 1 e integrá-las em uma única função objetivo. As variáveis normalizadas são:

$$CV^* = \left( \frac{CV - CV_{\min}}{CV_{\max} - CV_{\min}} \right) \quad (5.3)$$

$$PU^* = \left( \frac{PU - PU_{\min}}{PU_{\max} - PU_{\min}} \right) \quad (5.4)$$

$$I_{WA}^* = \left( \frac{I_{WA} - I_{WA_{\min}}}{I_{WA_{\max}} - I_{WA_{\min}}} \right) \quad (5.5)$$

em que  $CV_{\min}$  e  $CV_{\max}$  são, respectivamente, os menores e os maiores custos associados à instalação de válvulas, sendo  $CV_{\min}$  correspondente à configuração de válvulas composta apenas por  $VI$ , enquanto  $CV_{\max}$  corresponde à configuração composta apenas por  $VCV$ ;  $PU_{\min}$  e  $PU_{\max}$  são os menores e os maiores valores de  $PU$ ; e  $I_{WA_{\min}}$  e  $I_{WA_{\max}}$  são, respectivamente, os menores e os maiores valores de  $I_{WA}$ .

Junto à resultante das funções-objetivo de todas as otimizações deste trabalho é somada uma penalização ( $PEN$ ), para que a pressão mínima requerida para abastecimento dos nós de demanda seja considerada como uma restrição. A conceituação desta penalização é definida pela Eq. (3.10)

#### 5.2.4 Análise de redução de vazamentos (Etapa 4)

Para cada cenário de otimização de setorizações dinâmica e estática, o percentual de redução de volume de vazamento é estimado a partir do cálculo da vazão de vazamento dada pela Eq. (4.4). Enquanto o volume, em  $m^3$ , de vazamento economizado ( $VDV$ ) após as setorizações, e o seus benefícios econômicos ( $B_{DV}$ ) e de consumo de energia ( $B_{EDV}$ ) associados são calculados respectivamente pelas Eqs. (4.5), (4.5) e (4.7).

### 5.3 Estudo de caso

Como estudo de caso deste trabalho foi considerada uma versão adaptada da RDA *benchmark* KL (KANG e LANSEY, 2012), constituída por 935 nós de junção (623 nós com demanda), 1.274 tubulações e 2 reservatórios.

Vale ressaltar que, originalmente, a rede KL possui apenas o reservatório localizado na região noroeste (Figura 4.2), entretanto, para estabelecimento do processo de otimização da operação da rede, um segundo reservatório foi implementado a jusante de um dos nós de junção periféricos na região sudeste do sistema de distribuição de água.

O modelo hidráulico da rede KL foi escolhido como estudo de caso para este trabalho por ser um sistema de distribuição de água de porte médio, o que facilita a implementação e execução das otimizações envolvendo os cenários estabelecidos de setorização estática e dinâmica.

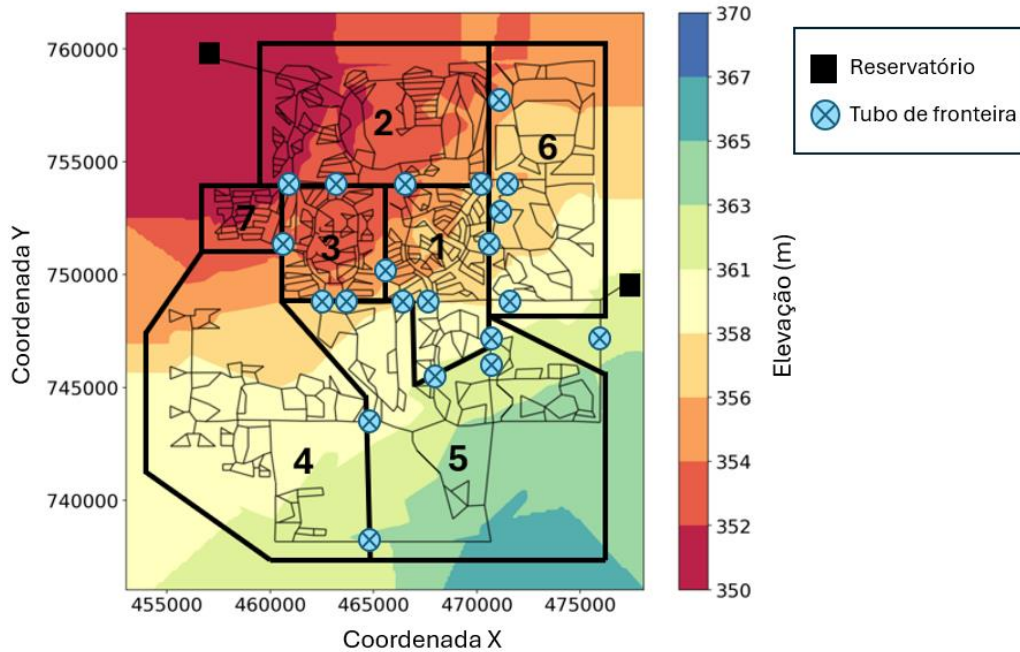
### 5.4 Resultados e discussões

#### 5.4.1 Configuração ótima de setores pelo algoritmo Leiden

Após a modelagem da RDA KL como grafo de arestas ponderadas pela vazão, o algoritmo de detecção de comunidades Leiden subdividiu a rede em 7 setores com 21 tubulações de fronteira, isto é, 21 tubos conectando um par de nós de diferentes setores, onde as válvulas de isolamento ( $VI$ ) ou de controle de vazão ( $VCV$ ) são alocadas em processo de otimização. Em sequência, na Figura 5.3 e na Tabela 5.1

são apresentados, respectivamente, os setores e os dados referentes à demanda base total de cada setor.

**Figura 5.3 – Rede KL setorizada com elevações.**



Fonte: Autor da tese (2025).

**Tabela 5.1 – Demanda base total dos setores.**

Setor	Demanda Base Total (m <sup>3</sup> /s)
1	0,057
2	0,087
3	0,043
4	0,056
5	0,046
6	0,030
7	0,018

Fonte: Autor da tese (2025).

#### 5.4.2 Avaliação de custo e desempenho hidráulico de cenários de otimização

Como descrito em metodologia, neste estudo são abordados 8 cenários de otimização desenvolvidos a partir da implementação do algoritmo híbrido Leiden-PSO, sendo:

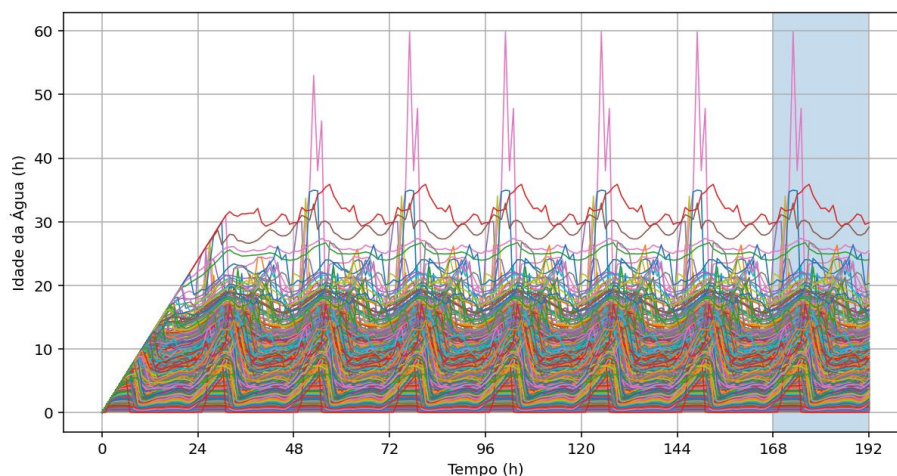
- cenários visando correspondentes à minimização de  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$  considerando a setorização estática da RDA KL;

- cenários referentes à minimização de  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$  implementando a setorização dinâmica da rede;
- cenários de setorização (dinâmica e estática) visando minimizar  $CV$  e  $PU$  durante um período predominantemente noturno, o qual geralmente há maiores perdas (19h às 6h) e,  $CV$  e  $I_{WA}$  durante um período predominantemente diurno (7h às 18h), o qual há maior consumo

Todos os cenários foram desenvolvidos a partir da otimização conjunta de alocação e operação de válvulas, com base no ponto de operação do  $K$  de cada válvula alocada nas respectivas tubulações de fronteira da RDA KL. No caso, para  $K < 10$ , as válvulas, a priori, do tipo Globo são fechadas e, ao contrário, para  $K \geq 10$ , as válvulas permanecem abertas permitindo o aumento de  $K$  para uma redução ainda maior das pressões excessivas ao longo das tubulações da RDA KL.

Além disso, é importante destacar que o intervalo de simulação hidráulica de 24h utilizado para otimização do sistema de distribuição de água iniciou-se somente a partir da hora 168, pois a partir deste passo de tempo foi identificada uma convergência abaixo de determinado limite (aproximadamente 60h) da curva de idade da água obtida para cada nó consumidor ao longo de 192h (168h+24h). Estas curvas de idades de água dos nós da RDA KL sem estar setorizada são apresentadas na Figura 5.4.

**Figura 5.4 – Comportamento da idade da água dos nós de consumo da rede KL durante o período de simulação hidráulica de 24h.**



Fonte: Autor da tese (2025).

Deste modo, a partir da hora 168, foram otimizados e avaliados os critérios de  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$ , com a implementação das setorizações dinâmica e estática. Vale ressaltar que a partir das otimizações de setorização estática obteve-se apenas uma configuração ótima de alocação e operação de válvulas para todo o período de simulação hidráulica de 24 h. Enquanto no caso da setorização dinâmica desenvolveu-se uma configuração ótima de alocação e operação de válvulas para cada hora ao longo do período de simulação hidráulica de 24 h.

Além disso, salienta-se novamente que em cada tubulação de fronteira é alocada somente uma válvula Globo, podendo ser  $VCV$  ou  $VI$ . No caso da setorização dinâmica, a  $VCV$  pode se fechar completamente em determinados passos de tempo (horas) ao longo do período de simulação hidráulica, entretanto, permanecendo aberta em, ao menos, um passo de tempo. Já a válvula que mantém-se fechada durante toda a simulação hidráulica é considerada  $VI$  e tem seu respectivo custo associado.

#### 5.4.2.1 Otimizações visando a minimização do custo total de alocação de válvulas

Nos cenários referentes à otimização buscando a minimização de  $CV$  obteve-se uma configuração ótima de válvulas de 10  $VI$  (10 válvulas fechadas ao longo de todo o período de simulação) e 11  $VCV$  (11 válvulas que foram abertas e fechadas ao longo do período de simulação) tanto para a setorização dinâmica, como para a setorização estática durante 24 h de simulação hidráulica. Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados referentes ao custo e desempenho hidráulico para cada tipo de setorização realizada.

**Tabela 5.2 – Resultados obtidos antes e após a otimização visando minimizar o custo total de alocação de válvulas ( $CV$ ).**

Cenário	Critério de Avaliação		
	$CV$ (€)	$PU$	$I_{WA}$ (h)
Sem setores	-	1,52	2,95
Setores estáticos	267.514	1,41	2,73
Setores dinâmicos	267.514	1,43	2,46

Fonte: Autor da tese (2025).

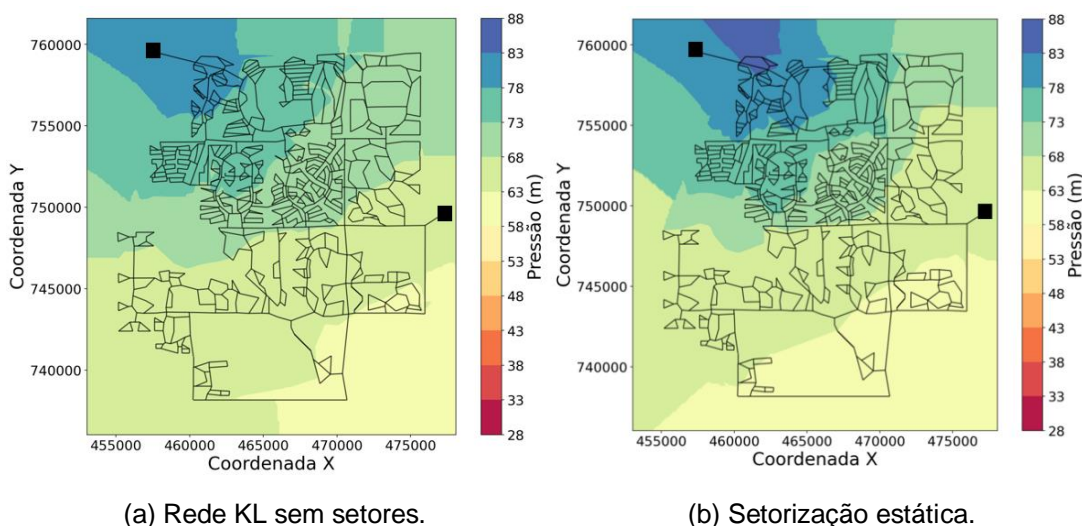
A partir dos resultados obtidos, após as otimizações dinâmica e estática, é possível observar que a setorizações dinâmica e estática geraram projetos ótimo de setores

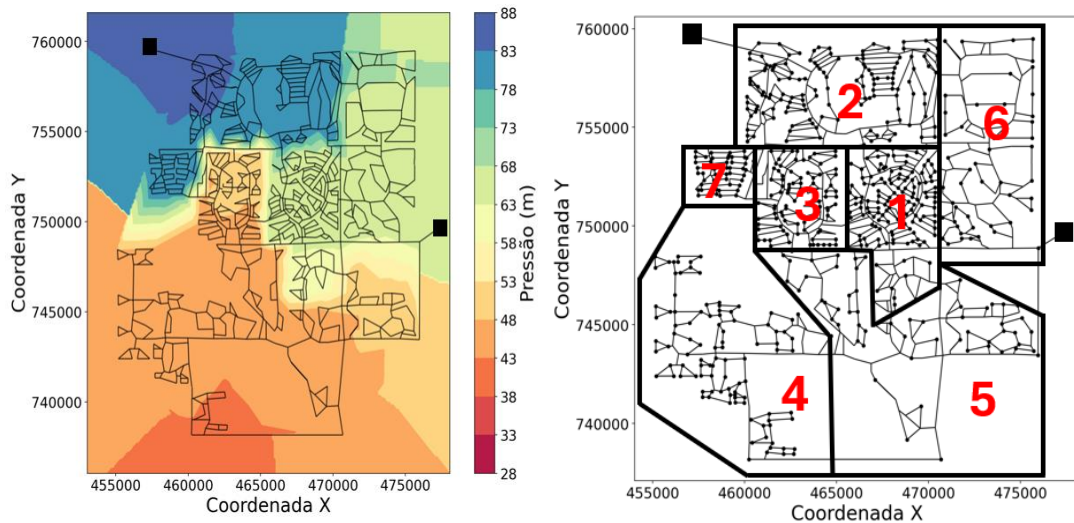
de mesmo  $CV$  e  $PU$  praticamente. No entanto, o  $I_{WA}$  da rede KL foi menor após a setorização dinâmica, o que fortalece a tese de que a setorização dinâmica redistribui o fluxo de forma mais eficiente dos reservatórios aos consumidores, entregando um abastecimento de água de menores idades da água e de maior qualidade e segurança aos consumidores.

Ao analisar a Tabela 5.2, também nota-se que ambas as setorizações geraram menores valores de  $PU$  e  $I_{WA}$  em relação aos respectivos valores destes critérios hidráulicos para a rede KL sem setores, o que pode ser justificado pelas maiores perdas de carga e velocidades ou menores caminhos de escoamento entre reservatórios e nós, gerados pelo processo de alocação e operação ótima de válvulas a partir da setorização da RDA.

Em seguida, nas Figuras 5.5 e 5.6 são apresentados os mapas de superfície de pressão e idade da água dos nós da rede KL em horário de menor (172 h – 5ª hora durante uma simulação de 24 h) e maior (178 h – 10ª hora durante uma simulação de 24 h) consumo ao longo do período de simulação hidráulica de 24h, após a otimização de setores dinâmicos e estáticos, visando a minimização de  $CV$ .

**Figura 5.5 – Mapas de superfície de pressão correspondentes ao horário de menor demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de  $CV$ .**





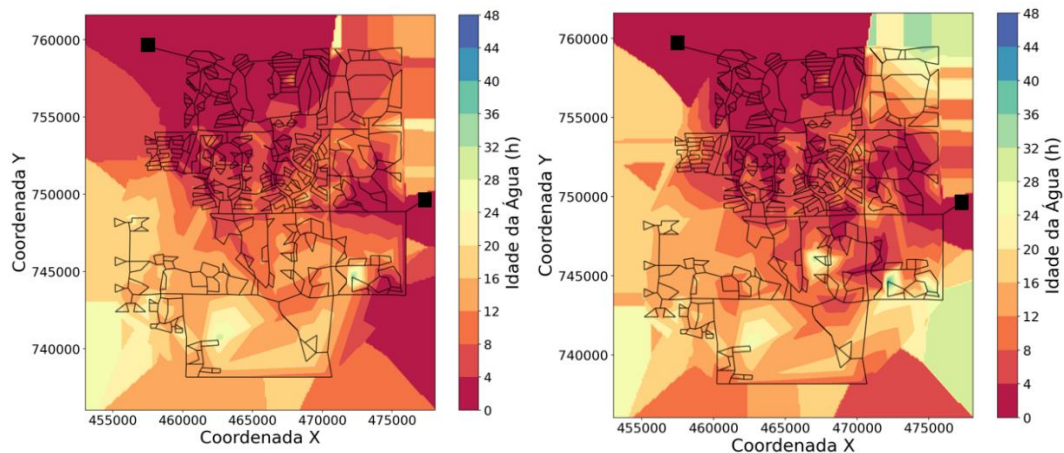
(c) Setorização dinâmica.

(d) Setores delimitados.

Fonte: Autor da tese (2025).

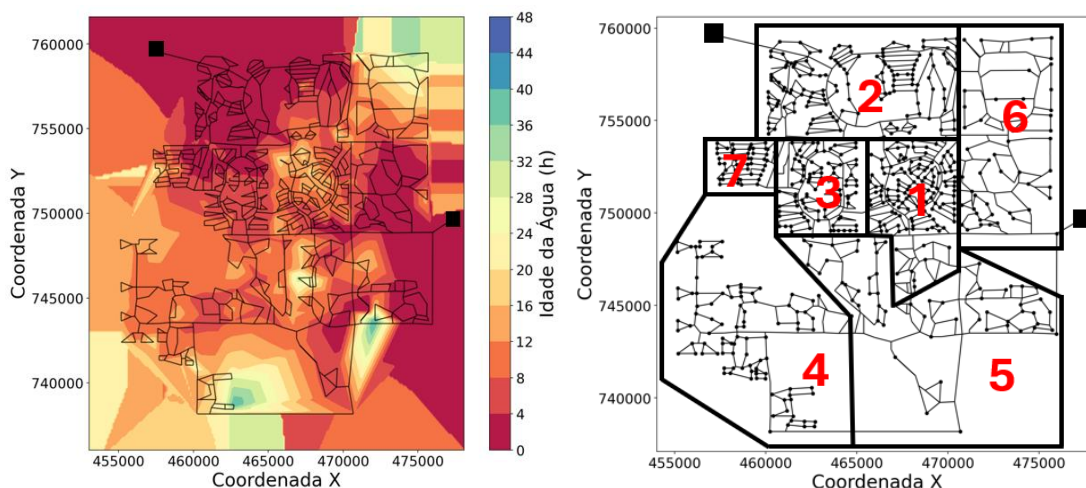
Avaliando-se os mapas da Figura 5.5 pode-se notar que as pressões são maiores na região do Setor 2 para todos os casos de setorização durante o horário de menor demanda. Enquanto as regiões de menor pressão, em geral, estão localizadas em zonas mais altas e distantes dos reservatórios, mais precisamente nos Setores 4 e 5. Comparando-se os resultados referentes às pressões na rede para os diferentes modelos de setorização implementados, pode-se comprovar que houve uma maior queda de pressões na rede com a setorização dinâmica em comparação à setorização estática, uma vez que dos Setores 3, 4 e 5 tiveram suas pressões significativamente reduzidas após a setorização dinâmica.

**Figura 5.6 – Mapas de superfície de idade da água correspondentes ao horário de maior demanda antes e após as setorizações da rede KL minimização de CV.**



(a) Rede KL sem setores.

(b) Setorização estática.



(c) Setorização dinâmica.

(d) Setores delimitados.

Fonte: Autor da tese (2025).

Já analisando os mapas da Figura 5.6, nota-se a idade da água dos nós, em geral, é menor nos nós mais próximos dos reservatórios, o que faz sentido, pois o tempo que a água gasta a chegar nesses pontos de consumo, obviamente, é menor do que nas outras regiões da rede.

Além disso, a partir da Figura 5.6 pode-se observar que a idade da água reduziu-se mais na hora de maior consumo após a setorização dinâmica em relação à setorização estática e tal este contexto é evidenciado em regiões pontuais da rede KL ou, mais especificamente, nos Setores 5 e 6 durante a setorização dinâmica.

#### 5.4.2.2 Otimizações visando a minimização de uniformidade de pressão

Nos cenários referentes à otimização buscando a minimização de  $PU$  obteve-se uma configuração ótima de válvulas de 2  $VI$  (2 válvulas fechadas ao longo de todo o período de simulação) e 19  $VCV$  (19 válvulas que foram abertas e fechadas ao longo do período de simulação) a partir da setorização dinâmica, enquanto 4  $VI$  e 17  $VCV$  foram alocadas nas tubulações de fronteira para o caso de setorização estática.

Na Tabela 5.3 são evidenciados os resultados referentes ao custo e desempenho hidráulico para cada tipo de setorização realizada.

**Tabela 5.3 – Resultados obtidos antes e após as otimizações visando minimizar a uniformidade de pressão ( $PU$ ).**

Cenário	Critério de Avaliação		
	$CV$ (€)	$PU$	$I_{WA}$ (h)
Sem setores	-	1,52	2,95
Setores estáticos	346.510	1,32	2,74
Setores dinâmicos	376.672	1,03	2,79

Fonte: Autor da tese (2025).

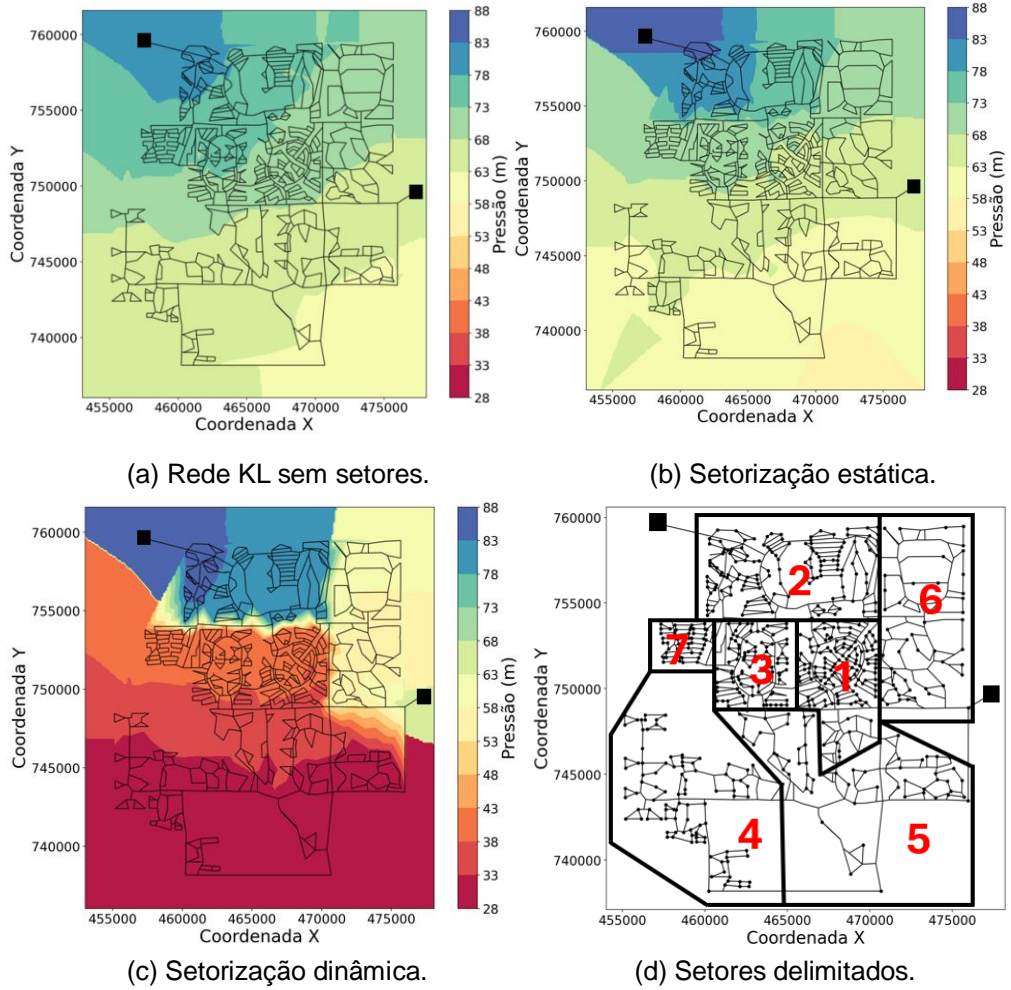
Por meio dos resultados obtidos, após as otimizações dinâmica e estática, é possível observar que apesar dos valores de  $I_{WA}$  serem próximos, a setorização dinâmica gerou um projeto ótimo de setores que produziu uma operação hidráulica da rede KL com muito maior redução de  $PU$  do que no caso da setorização estática.

Contudo, o projeto de setorização dinâmica requer um  $CV$  maior para ser implementado em comparação com o projeto de setorização estática. Tal fato pode ser justificado pela predominância de  $VCV$  alocadas nas tubulações de fronteira na setorização dinâmica.

Além disso, ao analisar a Tabela 5.3, nota-se que ambas as setorizações desenvolveram menores valores de  $PU$  e  $I_{WA}$  em comparação aos respectivos valores destes critérios hidráulicos para a rede KL sem setores. Este contexto pode ser atribuído às maiores perdas de carga e velocidades ou menores caminhos entre reservatórios e nós, gerados pelo processo de alocação e operação ótima de válvulas a partir da setorização da RDA.

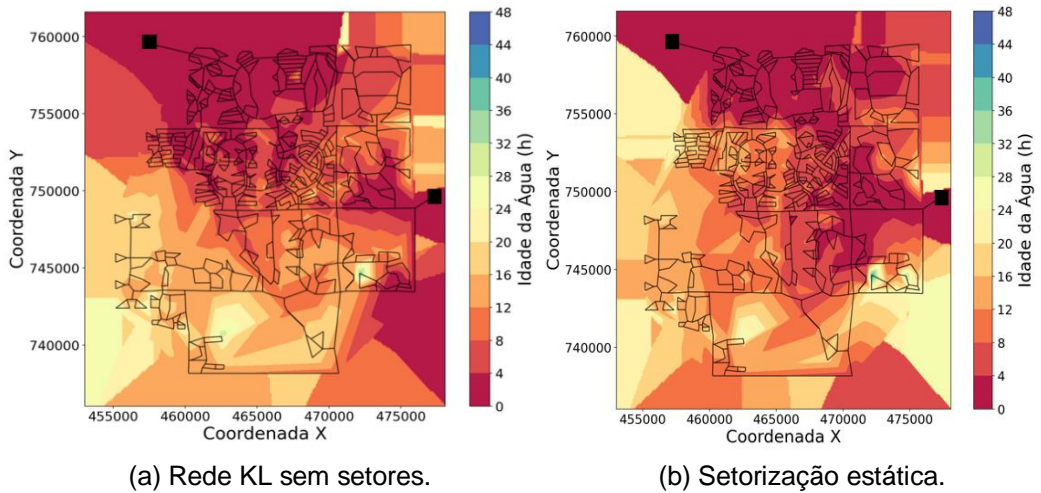
Em sequência, nas Figuras 5.7 e 5.8 são apresentados os mapas de superfície de pressão e idade da água dos nós da rede KL em horário de menor (172 h – 5ª hora durante uma simulação de 24 h) e maior (178 h – 10ª hora durante uma simulação de 24 h) consumo ao longo do período de simulação hidráulica de 24h, após a otimização de setores dinâmicos e estáticos, visando a minimização de  $PU$ .

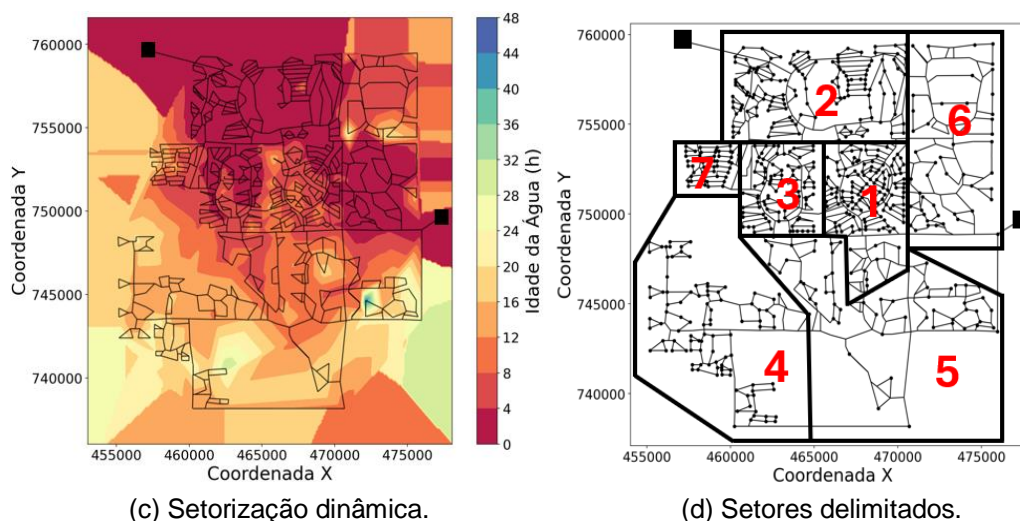
**Figura 5.7 – Mapas de superfície de pressão correspondentes ao horário de menor demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de *PU*.**



Fonte: Autor da tese (2025).

**Figura 5.8 – Mapas de superfície idade da água correspondentes ao horário de maior demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de *PU*.**





Fonte: Autor da tese (2025).

A partir dos mapas da Figura 5.7 nota-se, novamente, que as pressões são maiores na região do Setor 2 para todos os modelos de setorização durante o horário de menor demanda. Em contrapartida, observa-se também que as regiões de menor pressão, em geral, estão localizadas em zonas mais altas e distantes dos reservatórios, mais especificamente nos Setores 4 e 5.

Entretanto, analisando comparativamente os resultados referentes às pressões na rede para os diferentes tipos de setorização implementados, pode-se comprovar que houve uma queda muito maior das pressões na rede KL com a setorização dinâmica do que empregando a setorização estática. Tal fato é evidente uma vez que, com a implementação da setorização dinâmica, os Setores 4 e 5 tiveram suas pressões muito próximas da pressão mínima operacional da rede KL (28 m) em quase na totalidade de seus nós. Enquanto as pressões alcançaram uma margem mínima de aproximadamente 50 m com a setorização estática da rede KL durante o horário de menor demanda.

Já observando os mapas da Figura 5.8 é possível notar, novamente, que a idade da água dos nós, em geral, é menor nos nós mais próximos dos reservatórios, devido, basicamente, ao menor tempo que a água gasta a chegar nesses pontos de consumo. Contudo, comparando-se os resultados de idade da água na hora de maior consumo entre os diferentes modelos de setorização, pode-se observar que a setorização dinâmica gerou idades da água um pouco mais elevadas do que a

setorização estática, principalmente, em alguns nós específicos nos Setores 4 e 5, os quais estão mais distantes de ambos os reservatórios.

#### 5.4.2.3 Otimizações visando a minimização do índice de idade média ponderada da água acima de limite estabelecido

Nos cenários relacionados à otimização buscando a minimização de  $I_{WA}$  obteve-se uma configuração ótima de válvulas de 3 VI (3 válvulas fechadas ao longo de todo o período de simulação) e 18 VCV (18 válvulas que foram abertas e fechadas ao longo do período de simulação), enquanto, 8 VI e 13 VCV foram alocadas nas tubulações de fronteira para o caso de setorização estática. Na Tabela 5.4 são mostrados os resultados referentes ao custo e desempenho hidráulico para cada tipo de setorização realizada.

**Tabela 5.4 – Resultados obtidos antes e após as otimizações visando minimizar  $I_{WA}$ .**

Cenário	Critério de Avaliação		
	CV (€)	PU	$I_{WA}$ (h)
Sem setores	-	1,52	2,95
Setores estáticos	286.185	1,40	2,52
Setores dinâmicos	361.591	1,32	2,33

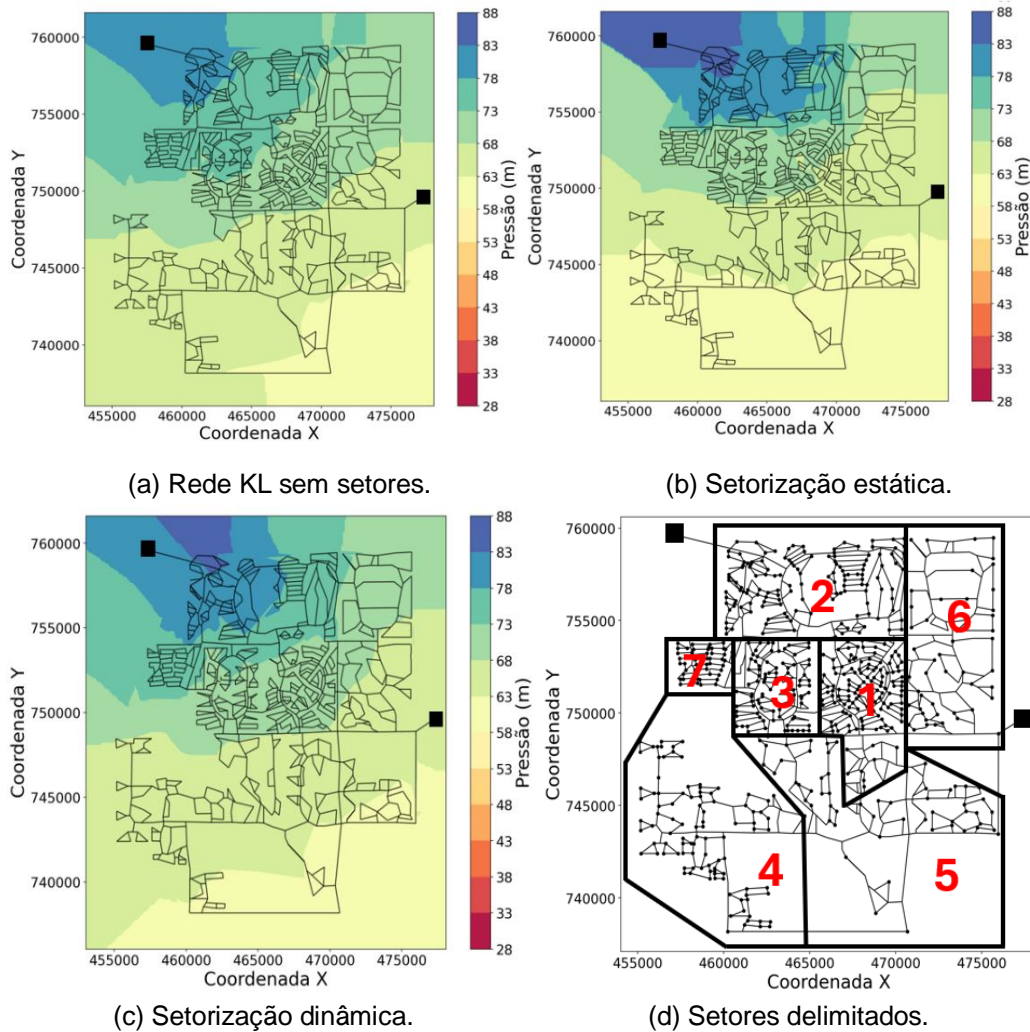
Fonte: Autor da tese (2025).

A partir dos resultados obtidos, após as otimizações dinâmica e estática, pode-se notar que a setorização dinâmica produziu um maior desempenho hidráulico de abastecimento de água em relação à setorização estática, uma vez que gerou menores valores de  $PU$  e  $I_{WA}$ .

Entretanto, a setorização estática desenvolveu um projeto de menor  $CV$  em comparação com o orçamento para alocação de válvula gerado pela setorização dinâmica. É importante destacar que ambas as setorizações geraram menores valores de  $PU$  e  $I_{WA}$  em relação aos respectivos valores destes critérios hidráulicos para a rede sem setores. Tal fato evidencia a importância da otimização da subdivisão da rede KL em setores e da otimização da alocação e operação dos dispositivos de controle que reduzem as pressões excessivas no sistema e tornam mais rápido o abastecimento de água.

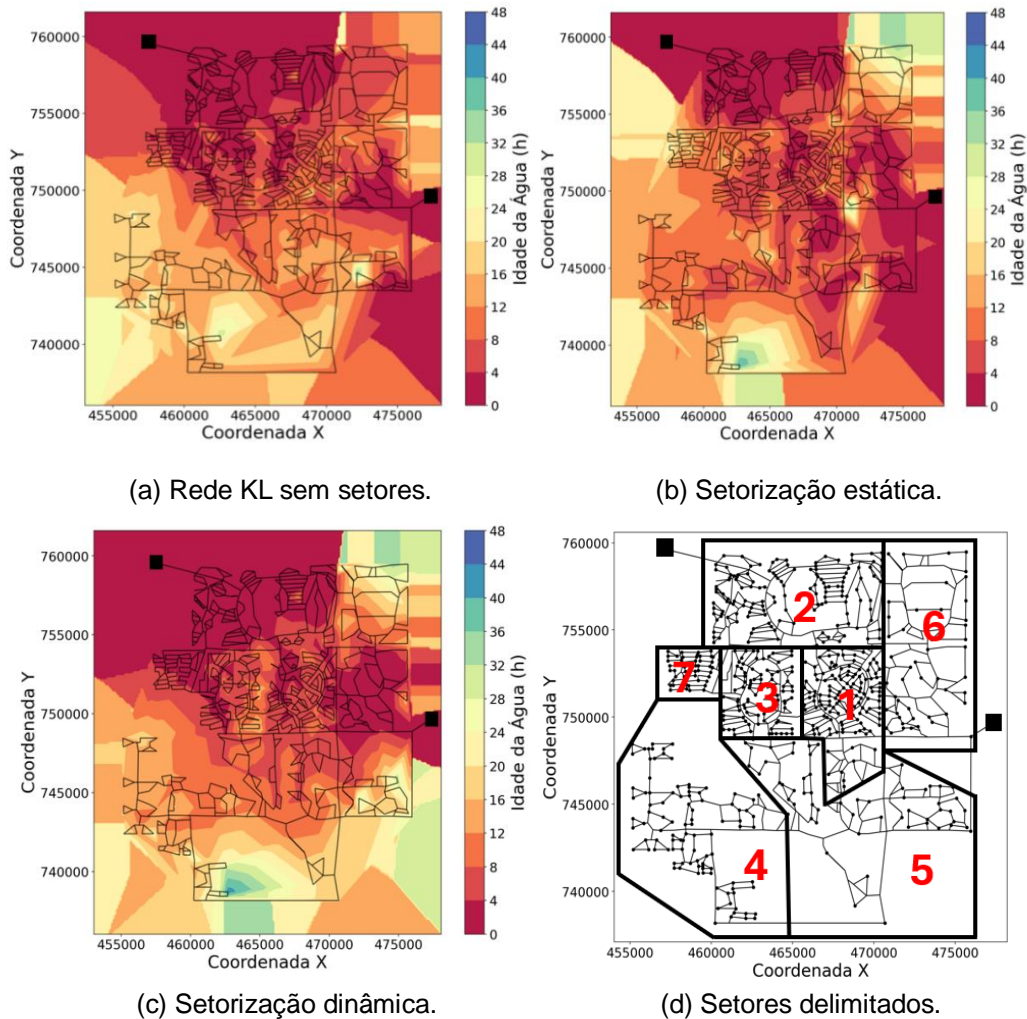
Em sequência, na Figuras 5.9 e 5.10 são apresentados os mapas de superfície de pressão e idade da água dos nós da rede KL em horário de menor (172 h – 5ª hora durante uma simulação de 24 h) e maior (178 h – 10ª hora durante uma simulação de 24 h) consumo ao longo do período de simulação hidráulica de 24h, após a otimização de setores dinâmicos e estáticos, visando a minimização de  $I_{WA}$ .

**Figura 5.9 – Mapas de superfície de pressão correspondentes ao horário de menor demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de  $I_{WA}$ .**



Fonte: Autor da tese (2025).

**Figura 5.10 – Mapas de superfície de idade da água correspondentes ao horário de maior demanda antes e após as setorizações da rede KL para minimização de  $I_{WA}$ .**



Fonte: Autor da tese (2025).

Analisando os mapas da Figura 5.9 nota-se que as pressões são maiores na região do Setor 2 para todos os tipos de setorização durante o horário de menor demanda. Enquanto as regiões de menor pressão estão localizadas nos Setores 4 e 5, que são mais distantes e apresentam as maiores altitudes.

No entanto, avaliando-se comparativamente os resultados referentes às pressões na rede para os diferentes casos de setorização é possível identificar que as pressões se mantiveram um pouco mais altas na rede KL para o caso da setorização dinâmica em relação à setorização estática, o que pode ser visto nas regiões dos Setores 4 e 5. Tal contexto pode ser atribuído à otimização de melhor desempenho de  $I_{WA}$  para

o caso da setorização dinâmica, o que, inevitavelmente, pode aumentar as pressões.

Já avaliando os mapas da Figura 5.10 é possível notar a redução da idade da água ao longo da rede KL após ambos os casos de setorização. Contudo, neste contexto destaca-se a redução da idade da água dos nós após a setorização dinâmica, especialmente em nós localizados nos Setores 6 e 7, aumentando a qualidade do abastecimento de água nestes setores.

#### 5.4.2.4 Resultados gerais de otimização

De forma geral, na Tabela 5.5 são apresentados todos os resultados referentes ao desempenho hidráulico e custo de projeto obtido para cada cenário de otimização das setorizações estática e dinâmica estabelecidas em estudo.

**Tabela 5.5 – Resultados obtidos antes e após todas as otimizações realizadas para as setorizações dinâmica e estática.**

Configuração	FO	Critério de Avaliação		
		CV (€)	PU	$I_{WA}$ (h)
Setores estáticos	Min CV	267.514	1,41	2,73
	Min PU	346.510	1,32	2,74
	Min $I_{WA}$	286.185	1,40	2,52
	Min CV + PU ou Min CV + $I_{WA}$	282.595	1,37	2,83
Setores dinâmicos	Min CV	267.514	1,43	2,46
	Min PU	376.672	1,03	2,79
	Min $I_{WA}$	361.591	1,32	2,33
	Min CV + PU ou Min CV + $I_{WA}$	342.920	1,17	2,41
Sem setores		-	1,52	2,95

Fonte: Autor da tese (2025).

Analisando-se a Tabela 5.5 pode-se notar que os cenários de setorização dinâmica apresentam índices hidráulicos melhores do que os cenários de setorização estática, uma vez que possuem, predominantemente, menores valores de  $PU$  e  $I_{WA}$ , evidenciando um abastecimento de água com menos pressões excessivas e menores idades da água.

Dentre os cenários de setorização dinâmica destaca-se o cenário que visou a minimização de  $CV$ , pois, neste caso, ambos os tipos de setorizações desenvolveram o mesmo  $CV$  e  $PU$  praticamente, entretanto, a setorização dinâmica

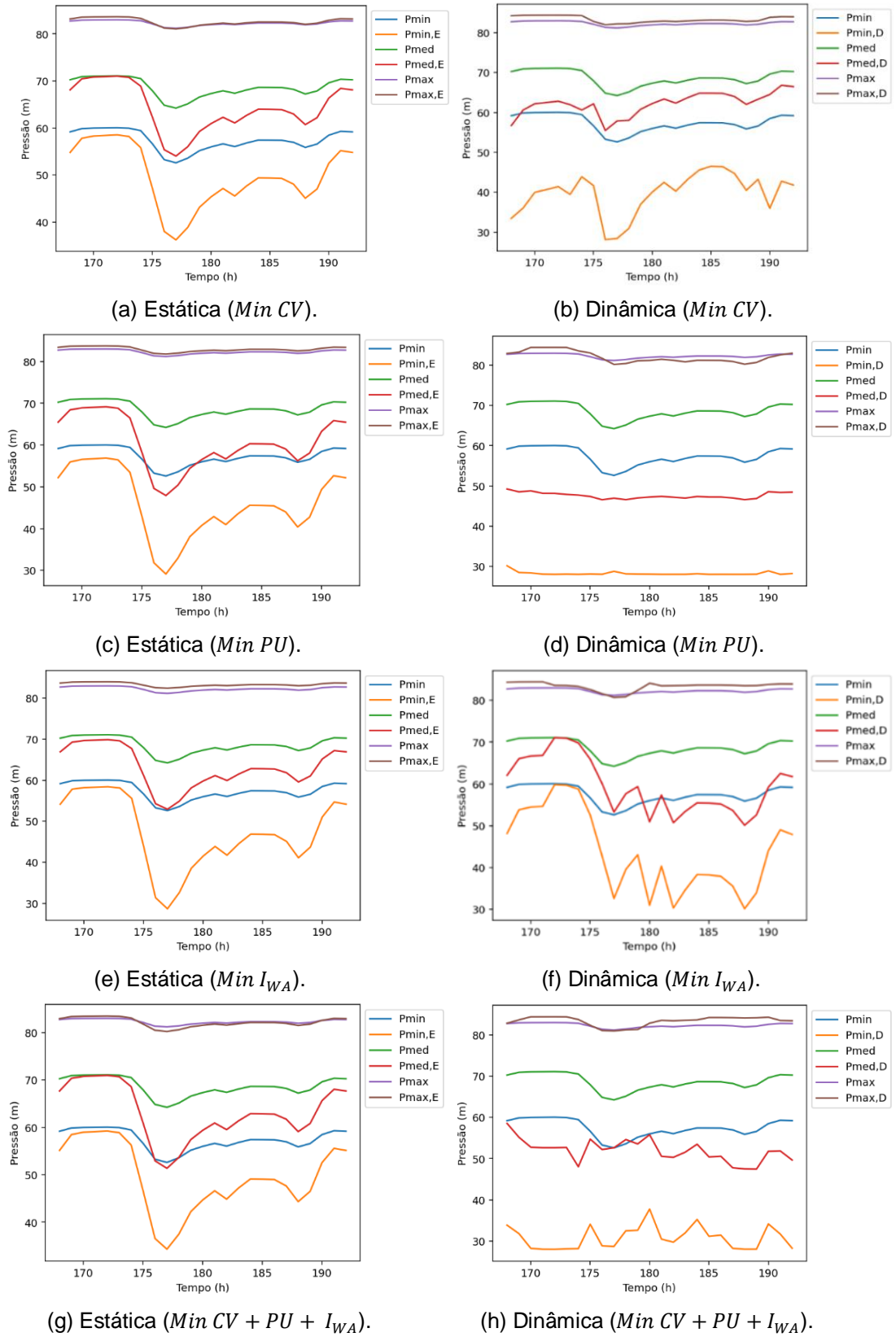
gerou um valor de  $I_{WA}$  menor em relação à setorização estática, o que evidencia a importância do dinamismo das válvulas e flexibilização dos setores na obtenção de um abastecimento de água caracterizado por menores idades da água e, conseqüentemente, de maior qualidade ao consumidor.

A setorização dinâmica com esta proposta de minimizar  $CV$  e  $PU$  em período de maiores perdas, e  $CV$  e  $I_{WA}$  em período de maior consumo, gerou o segundo menor valor de  $PU$  e o menor valor de  $I_{WA}$  entre todos os cenários de otimização de setores implementados neste trabalho para a rede KL. Tal fato evidencia o alcance do objetivo da tese, isto é, a maximização do desempenho hidráulico do sistema de abastecimento ao menor custo que foi possível conforme as configurações de otimização estabelecidas. É importante destacar que os todos os ganhos observados decorrem da operação dinâmica das válvulas, que resulta em uma configuração operacional de setores variável ao longo do tempo.

Os cenários referentes à minimização de  $PU$  geraram soluções ótimas de configuração de válvulas com maior custo em ambos os tipos de setorização, devido, possivelmente, ao maior número de  $VCV$  alocadas nas tubulações para ambos os tipos de setorização. Além disso, a partir da Tabela 5.5 pode-se notar que os valores de  $PU$  e  $I_{WA}$  calculados para ambos os tipos de setorização são menores do que os valores resultantes para a rede KL sem setores em todos os cenários de otimização, o que evidencia a importância da otimização conjunta de alocação e operação de válvulas para estabelecimento dos setores.

Em seqüência, na Figura 5.11 é apresentado o comportamento da pressão mínima horária da rede KL sem setores ( $p_{min}$ ), da pressão mínima horária na rede após as setorizações dinâmica ( $p_{min,D}$ ) e estática ( $p_{min,E}$ ), da pressão média horária da rede KL sem setores ( $p_{med}$ ), da pressão média horária da rede KL após as setorizações dinâmica ( $p_{med,D}$ ) e estática ( $p_{med,E}$ ), da pressão máxima horária da rede KL sem setores ( $p_{max}$ ) e da pressão máxima horária da rede KL após as setorizações dinâmica ( $p_{max,D}$ ) e estática ( $p_{max,E}$ ).

**Figura 5.11 – Análise comparativa de pressões horárias antes e após as otimizações realizadas para as setorizações estática e dinâmica.**



Fonte: Autor da tese (2025).

A partir da Figura 5.11 pode-se notar que, em geral, as pressões mínimas e médias desenvolvidas na rede KL após as otimizações envolvendo a setorização dinâmica foram predominantemente menores do que as pressões mínimas e médias estabelecidas com as otimizações abordando a setorização estática. Tal fato é ainda mais explícito para o cenário de otimização de setores dinâmicos com o objetivo de minimizar a  $PU$ , em que as pressões mínimas horárias alcançaram a pressão mínima requerida da rede KL (28 m) em, praticamente, todo o período diário de simulação hidráulica.

Este contexto evidencia a capacidade da setorização dinâmica em reduzir sobrecargas no sistema e, conseqüentemente, gerar um abastecimento de água com menores perdas e mais seguro à população. Contudo, é necessário frisar que operar próximo à pressão mínima também pode reduzir a margem operacional do sistema, devendo ser avaliado com cautela em aplicações reais.

#### 5.4.2.5 Avaliação de vazamentos dos cenários de otimização

Na Tabela 5.6 são apresentados os dados referentes ao percentual de redução de volume de vazamentos dos cenários de otimização mono-objetivo visando minimizar  $CV$ ,  $PU$  e  $I_{WA}$ .

**Tabela 5.6 – Resultados de redução de vazamentos de todas as otimizações realizadas para as setorizações dinâmica e estática.**

Setores	Redução de Vazamento			Volume		
	$Min CV$	$Min PU$	$Min I_{WA}$	$Min CV$	$Min PU$	$Min I_{WA}$
Estáticos	3,42%	6,33%	4,40%	158,65 m <sup>3</sup>	293,59 m <sup>3</sup>	204,40 m <sup>3</sup>
Dinâmicos	3,36%	17,72%	7,40%	152,59 m <sup>3</sup>	822,37 m <sup>3</sup>	343,27 m <sup>3</sup>
-	$Min CV + PU$ e $Min CV + I_{WA}$			$Min CV + PU$ e $Min CV + I_{WA}$		
Estáticos	4,25%			197,15 m <sup>3</sup>		
Dinâmicos	13,99%			649,33 m <sup>3</sup>		

Fonte: Autor da tese (2025).

A partir da Tabela 5.6 é possível notar que a maior redução do volume de vazamentos é identificada após a setorização dinâmica buscando minimizar a  $PU$ , uma vez que este cenário gerou uma redução significativa de 17,72% do volume de vazamentos, o que corresponde a 822,37 m<sup>3</sup> de água não desperdiçados na rede KL. Tal redução de vazamentos produziu uma economia de 2.113,49 € (Eq. (4.5)) e

uma redução no consumo de energia de 408,72 kWh (Eq. (4.6)) pelo sistema de abastecimento.

Observando a Tabela 5.6 também pode-se perceber que o cenário de otimização de setores dinâmicos visando a minimização de  $CV$  e  $PU$  durante a noite e  $CV$  e  $I_{WA}$  durante o dia desenvolveu o segundo maior percentual de redução de vazamentos entre todos os cenários, economizando cerca de 649,33 m<sup>3</sup> de água e, conseqüentemente, 1.668,78 € e 322,72 kWh associados do volume de água não desperdiçado.

Portanto, este contexto evidencia os cenários de setorização dinâmica em relação aos cenários de setorização estática, uma vez que a otimização do processo de alocação e operação de válvulas a cada hora gerou maiores reduções de vazamentos e diminuição do consumo de energia na rede KL, garantindo assim, um sistema de abastecimento de água de maior segurança, qualidade e eficiência aos consumidores.

## **5.5 Conclusões e perspectivas futuras**

Com a elaboração deste estudo pôde-se concluir a importância da implementação de otimizações dinâmicas envolvendo a operação hidráulica de uma RDA em um processo de setorização, uma vez que os resultados de maior eficiência hidroenergética corresponderam aos cenários de criação de setores dinâmicos. Outro fato a ser destacado a partir deste estudo é a influência que a flexibilidade da operação ótima e dinâmica de válvulas traz para o controle hidráulico de uma RDA, pois com os cenários de otimização de setores dinâmicos foi possível mitigar as pressões excessivas na rede KL e, simultaneamente, reduzir os caminhos hidráulicos menos eficientes que a água necessita percorrer dos reservatórios aos nós consumidores.

Além disso, os cálculos de percentual de redução de vazamentos e diminuição do consumo de energia associado ao volume de água perdida também mostram a importância da setorização dinâmica no desenvolvimento de redes de abastecimento mais sustentáveis, uma vez que o modelo dinâmico de otimização de válvulas gerou

uma redução muito maior de vazamentos e consumo de energia em comparação aos cenários de setorização estática. Portanto, a metodologia apresentada neste estudo comprova que pode solucionar os problemas hidroenergéticos envolvendo a setorização clássica, gerando maiores reduções de pressão e de caminhos entres as tubulações, desenvolvendo assim, um abastecimento de água mais seguro e de maior qualidade aos consumidores.

Para pesquisas futuras e melhor exploração da metodologia proposta, sugere-se a abordagem das técnicas de setorização apresentadas neste estudo em RDA maiores e mais complexas (com bombas e válvulas). Além disso, estudos futuros envolvendo a esqueletização das RDA para a criação de setores dinâmicos também podem ser relevantes, uma vez que podem contribuir para a redução do tempo computacional dos processos de otimização de alocação e operação de válvulas, tornando os métodos de setorização dinâmica ainda mais viáveis de serem implementados pelas concessionárias de abastecimento de água. Vale frisar também que a implementação prática da metodologia de setores dinâmicos requer infraestrutura de automação e controle compatível, o que poderia ser também analisado em estudos posteriores.

## 6 DISCUSSÃO GERAL

### 6.1 Detecção de comunidades

Neste trabalho foram implementados e comparados três algoritmos de detecção de comunidades para a etapa de particionamento de uma RDA em processo de setorização, designadamente Fast-Greedy (CLAUSET; NEWMAN; MOORE, 2004), Louvain (BLONDEL *et al.*, 2008) e Leiden (TRAAG; WALTMAN; VAN ECK, 2019).

No primeiro artigo, referente ao Capítulo 3 desta tese, a teoria de grafos foi aplicada e explorada no processo de setorização e os algoritmos Fast-Greedy e Louvain foram analisados quanto à formação de comunidades (setores) para todos uma variedade de grafos. Neste estudo foi considerado um período de simulação de 24 horas, ao longo do qual foram criadas configurações de setores e tubulações de fronteira para cada hora. A rede Modena foi considerada como estudo de caso e avaliaram-se os grafos: não-direcionados e não-ponderados, não-direcionados e ponderados pela vazão, não-ponderados e direcionados pela vazão, e direcionados e ponderados pela vazão. O algoritmo Fast-Greedy foi aplicado a todos os tipos de grafos, enquanto o algoritmo Louvain só permitiu a modelagem da RDA como grafos não-direcionados (ponderados ou não).

O algoritmo Louvain gerou comunidades caracterizadas por um valor maior de modularidade, isto é, para o caso de um grafo ponderado pela vazão, com mais tubulações transportando água entre os nós consumidores dentro dos setores. Tais resultados de conectividade dos setores para um grafo ponderado pela vazão permitem evidenciar uma maior robustez topológica dos setores e um maior potencial de redistribuição de fluxos. Este resultado deve-se ao algoritmo de Louvain ser uma versão melhorada do algoritmo Fast-Greedy (BLONDEL *et al.*, 2008).

No segundo artigo, referente ao Capítulo 4 desta tese, foram comparados os algoritmos de detecção de comunidades Louvain e Leiden, a fim de explorar a aplicação do algoritmo Leiden na criação de setores e selecionar o algoritmo que obtivesse maior modularidade para posterior processo de setorização dinâmica a partir da modelagem da RDA como grafo de arestas ponderadas pela vazão.

No estudo, o algoritmo Leiden permitiu criar setores ainda mais bem particionados do que o algoritmo Louvain, uma vez que gerou valores de modularidade superiores aos do algoritmo Louvain. Comparando-se os algoritmos híbridos formados pelo algoritmo Louvain (Louvain-PSO) e pelo algoritmo Leiden (Leiden-PSO) observou-se que ambos desenvolveram cenários de setorização com reduções de custos, idade da água, vazamentos e consumo de energia.

Portanto, comparando os algoritmos de detecção de comunidades Fast-Greedy, Louvain e Leiden, no particionamento de RDA é possível concluir que os algoritmos Louvain e Leiden são mais indicados para serem implementados em processo de setorização de RDA com grafos ponderados pela vazão não só por permitirem a criação de setores mais conectados (maiores modularidades) e com maior potencial de redistribuição de fluxo, mas também por gerarem projetos de menor custo e maior desempenho hidráulico da RDA.

## **6.2 Setorização**

Ao longo desta tese foram explorados diferentes modelos matemáticos e mecanismos hidráulicos para aumentar a segurança e a qualidade do abastecimento de água ao consumidor a partir do processo de setorização.

Tais estudos foram realizados com o intuito de alcançar projetos ótimos de setorização estática e dinâmica que gerassem operações caracterizadas por minimizações de custos de projeto e maximização do desempenho hidroenergético do sistema de abastecimento. É importante destacar que todos os estudos realizados de setorização consideraram um período de simulação hidráulica de 24 horas para otimização.

Desse modo, elaborou-se três principais artigos a partir desta tese, dentre os quais, o primeiro artigo, correspondente ao Capítulo 3, explorou a teoria de grafos no desenvolvimento de setores por meio da criação de múltiplos cenários de setorização estática, fundamentados na modelagem da RDA para diferentes tipos de grafos.

Os cenários foram criados com a implementação de dois algoritmos híbridos, Fast-Greedy-PSO e Louvain-PSO. Estes cenários foram fundamentados na modelagem da RDA Modena como: grafos não-direcionados e não-ponderados, não-direcionados e ponderados pela vazão, não-ponderados e direcionados pela vazão, e direcionados e ponderados pela vazão.

Os resultados evidenciaram projetos ótimos de setorização de menor custo e idades da água para o algoritmo híbrido Louvain-PSO, em comparação aos resultados gerados a partir da implementação do algoritmo Fast-Greedy-PSO. Deste modo, a implementação do algoritmo Louvain-PSO se destacou por apresentar projetos de setorização em que o custo e a idade da água são menores, o que, conseqüentemente, aumenta a viabilidade de implantação do projeto e a qualidade do abastecimento de água aos consumidores.

Em sequência, no segundo artigo apresentado no Capítulo 4, estratégias hidráulicas foram exploradas para otimização da operação dos setores e foram comparados dois algoritmos híbridos, Louvain-PSO e Leiden-PSO, para cenários caracterizados por setorizações estáticas realizadas a partir da otimização de dois parâmetros associados às características das válvulas, como sejam o coeficiente de perda de carga localizada e o diâmetro da válvula. Os cenários foram desenvolvidos considerando a RDA KL adaptada como estudo de caso.

Com os resultados, pôde-se observar principalmente que estratégias hidráulicas, como otimizar o diâmetro e o coeficiente de perdas de carga das válvulas, podem desenvolver projetos ótimos de setorização mais sustentáveis, de menores custos e com maior desempenho hidráulico. Verificou-se que os projetos de setorização estática em que a otimização dos setores foi feita, conjuntamente, com a otimização da operação hidráulica das válvulas resultou em maiores reduções de vazamentos, menor consumo de energia e menores emissões de carbono.

Além disso, ambos os algoritmos Louvain-PSO e Leiden-PSO geraram setorizações com redução de vazamentos, de consumo de energia, de emissões de carbono e idade da água, conforme os diferentes cenários implementados. Contudo, a

implementação do algoritmo Leiden-PSO ainda se destacou por gerar um maior número de cenários de setorização mais sustentáveis, isto é, associados a maior redução de vazamentos, de consumo de energia e de emissões de carbono.

No terceiro artigo, presente no Capítulo 5 desta tese, foi utilizado apenas o algoritmo híbrido Leiden-PSO para criação e comparação de setores estáticos e dinâmicos, com as setorizações sendo realizadas no modelo hidráulico da RDA KL adaptada.

No caso, a comparação entre os tipos de setorização foi realizada com objetivo de se obter um método de setorização que maximize o desempenho hidráulico da RDA, reduzindo, ao máximo, a idade da água, os vazamentos e os custos associados ao projeto de setorização. Sendo assim, as setorizações estática e dinâmica foram feitas visando a otimização dos setores conjuntamente com a otimização da operação das válvulas alocadas.

Os resultados obtidos mostram que a setorização dinâmica reduz significativamente os vazamentos e a idade da água em um período diário, em comparação com os resultados obtidos para setorização estática. Vale destacar que as pressões mínimas horárias identificadas na operação da RDA após a setorização dinâmica, corresponderam à pressão mínima requerida para abastecimento aos consumidores na rede KL.

Portanto, estes resultados evidenciam a importância da setorização dinâmica para maximizar o desempenho hidráulico e a qualidade da água em sistemas de abastecimento.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões

Com a elaboração desta tese, em geral, pôde-se evidenciar o quão importantes são os métodos aplicados em cada etapa do processo de setorização de uma RDA.

Ao longo dos estudos descritos na presente tese foram aplicados e explorados diferentes modelagens e métodos para a criação de setores e, alocação e operação ótima de válvulas. No caso deste trabalho foram realizadas a aplicação e exploração da teoria de grafos para a modelagem e particionamento das RDA; foram implementadas diferentes estratégias hidráulicas para a otimização conjunta de setores e operação dos sistemas de abastecimento; e, por último, foram feitas análises comparativas entre os processos de setorização dinâmica e estática, em termos de desempenho hidráulico e custos de projeto.

Na etapa de exploração da RDA via teoria de grafos foi possível evidenciar a relevância da modelagem da rede de abastecimento como grafo ponderado hidráulicamente, uma vez que ao ponderar os grafos de RDA pela vazão, as conexões entre os nós dos grafos somente são estabelecidas se as tubulações transportem água entre os pares de nós.

Deste modo, a abordagem de grafos ponderados pela vazão foi levada adiante na segunda etapa do processo de setorização, caracterizada pelo particionamento da RDA a partir da implementação de algoritmos de detecção de comunidades. Nesta etapa, com os grafos ponderados pela vazão, comparou-se os algoritmos Fast-Greedy, Louvain e Leiden em relação à conectividade (modularidade) dos nós dos grafos e, de forma geral, o algoritmo Leiden obteve os melhores resultados, gerando setores, a priori, com mais robustez topológica.

Os algoritmos Louvain e Leiden se destacaram ainda mais após a alocação e operação ótima de válvulas realizadas pelo algoritmo PSO (Leiden-PSO), pois produziram significativos resultados de otimização, caracterizados por projetos de setorização de menores custo, idades da água e uniformidade de pressão, isto é, RDA setorizadas de maior segurança e qualidade ao consumidor.

Além disso, é importante explicitar que, ao longo deste trabalho, também se explorou diferentes técnicas e modelos de setorização. Para tanto, foram comparados cenários de setorização estática clássica (visando a minimização de custos de alocação de válvulas e posterior operação ótima de válvulas) e de setorização estática visando a otimização conjunta de criação de setores e operação de válvulas.

No caso, tais projetos de setorização estática desenvolvidos com o objetivo de otimizar conjuntamente a criação de setores e a operação das válvulas geraram RDA mais sustentáveis, com maiores reduções de vazamentos, consumo de energia e emissão de carbono, em comparação ao cenário de setorização estática clássica. Sendo assim, após a implementação destes cenários foi possível evidenciar a importância da aplicação de estratégias hidráulicas para reduzir ainda mais os custos e as sobrecargas de pressão na rede.

Por último, neste trabalho comparou-se a implementação de setores dinâmico e estático, com o auxílio do algoritmo híbrido Leiden-PSO e, considerando a otimização conjunta de setores e operação de válvulas. Deste modo, na última etapa do trabalho implementou-se um dos algoritmos híbridos e um dos métodos de setorização que geraram os melhores resultados, em termos de custos e desempenho hidráulico, ao longo da pesquisa.

Como resultados, pôde-se observar que a setorização dinâmica gera projetos de setores de menores custos, menores idades da água e menos vazamentos, quando comparados aos resultados referentes aos projetos de setorização estática.

É importante ressaltar que as pressões mínimas horárias após a otimização da uniformidade de pressão se mantiveram, predominantemente, iguais ao valor da pressão mínima requerida pela RDA após a implementação da setorização dinâmica. Tal fato somente destaca e reforça, ainda mais, a importância e a efetividade de um processo dinâmico de otimização de setores, implementado a partir de técnicas adequadas, na maximização do desempenho hidráulico de uma RDA.

Portanto, o objetivo geral deste estudo foi alcançado, uma vez que a operação dinâmica de válvulas levou à uma operação hidroenergética mais eficiente do sistema, gerando um abastecimento de água com menores perdas e menores idades da água, isto é, de maior segurança e qualidade à população.

## **7.2 Recomendações para trabalhos futuros**

A partir do desenvolvimento desta tese notou-se limitações e dificuldades para a implementação da presente metodologia de setorização dinâmica em termos práticos. Deste modo, a partir da experiência do presente estudo desenvolvido, sugere-se para trabalhos futuros:

- a aplicação da presente metodologia em RDA mais complexas, contendo tanques, bombas, válvulas e com maiores variações entre as cotas geométricas dos nós de junção;
- a abordagem de trabalhos envolvendo a setorização dinâmica via teoria de grafos ponderados e dinâmicos, para que seja possível a incorporação e extração de informações hidráulicas ainda mais realistas aos modelos matemáticos implementados para a criação dos setores;
- a aplicação de métodos de esqueletização (redução) de RDA em âmbito de criação de setores, para que seja mais viável, computacionalmente, a implementação de métodos de setorização dinâmica em redes de grandes cidades;
- a implementação de estudos de transitórios hidráulicos aos projetos de setorização para entendimento mais detalhado do escoamento após o processo de alocação de válvulas para criação de setores;
- e uma avaliação da confiabilidade, durabilidade e frequência de operação de válvulas em estratégias dinâmicas, considerando manutenção e falhas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-BASSET, Mohamed; ABDEL-FATAH, Laila; SANGAIAH, Arun Kumar. Metaheuristic algorithms: A comprehensive review. **Computational intelligence for multimedia big data on the cloud with engineering applications**, p. 185-231, 2018.

ALHIMIARY, HA Ali.; ALSUHAILY, RH Shakir. Minimizing Leakage Rates in Water Distribution Networks through Optimal Valves Settings. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat**. 2007. p. 1-13.

ALAGGIO, Jordana et al. Assessment of criticality in water distribution networks via complex network theory. **Processes**, v. 13, n. 2, p. 408, 2025.

ALVES, Débora et al. Robust data-driven leak localization in water distribution networks using pressure measurements and topological information. **Sensors**, v. 21, n. 22, p. 7551, 2021.

ALVISI, Stefano. A new procedure for optimal design of district metered areas based on the multilevel balancing and refinement algorithm. **Water resources management**, v. 29, p. 4397-4409, 2015.

ANSARI, Muhtadi Ahnaf; RAFID, Juhar. **Study Of Different Types of Valves & Determination Of Minor Head Loss For Various Openings Of Locally Manufactured uPVC Ball Valve**. 2023. Tese (Doutorado) – Bangladesh University of Engineering & Technology, Bangladesh, 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.13163.86567. Acesso em: 11 nov. 2024.

ARAUJO, L. S.; RAMOS, H.; COELHO, S. T. Pressure control for leakage minimization in water distribution systems management. **Water resources management**, v. 20, p. 133-149, 2006.

BAGHEL, Malti; AGRAWAL, Shikha; SILAKARI, Sanjay. Survey of metaheuristic algorithms for combinatorial optimization. **International Journal of Computer Applications**, v. 58, n. 19, 2012.

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

BEHESHTI, Zahra; SHAMSUDDIN, Siti Mariyam Hj. A review of population-based meta-heuristic algorithms. **Int. j. adv. soft comput. appl**, v. 5, n. 1, p. 1-35, 2013.

BELLOUM, Farid; HOUICHI, Larbi; KHEROUF, Mazouz. The Performance of Spectral Clustering Algorithms on Water Distribution Networks: Further Evidence. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 12, n. 4, p. 9056-9062, 2022.

BIANCHOTTI, Jezabel D. et al. Sectorization for water distribution systems with multiple sources: A performance indices comparison. **Water**, v. 13, n. 2, p. 131, 2021.

BLONDEL, Vincent D. et al. Fast unfolding of communities in large networks. **Journal of statistical mechanics: theory and experiment**, v. 2008, n. 10, p. P10008, 2008.

BLUM, Christian; ROLI, Andrea. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. **ACM computing surveys (CSUR)**, v. 35, n. 3, p. 268-308, 2003.

BRAGALLI, Cristiana et al. On the optimal design of water distribution networks: a practical MINLP approach. **Optimization and Engineering**, v. 13, p. 219-246, 2012.

BRENTAN, Bruno M. et al. Social network community detection for DMA creation: criteria analysis through multilevel optimization. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2017, 2017a.

BRENTAN, Bruno M. **Sistema de abastecimento de água inteligentes**: previsão de demanda e controle ótimo em tempo real. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017b.

BRENTAN, Bruno et al. Hybrid SOM+ k-Means clustering to improve planning, operation and management in water distribution systems. **Environmental modelling & software**, v. 106, p. 77-88, 2018.

BRENTAN, Bruno et al. Improving water age in distribution systems by optimal valve operation. **Journal of water resources planning and management**, v. 147, n. 8, p. 04021046, 2021.

BRENTAN, Bruno M. et al. District metered area design through multicriteria and multiobjective optimization. **Mathematical methods in the applied sciences**, v. 45, n. 6, p. 3254-3271, 2022.

BRENTAN, Bruno M. et al. Enhancing explainable AI with graph signal processing: Applications in water distribution systems. **Water Research**, p. 124022, 2025.

BUI, Xuan Khoa; MARLIM, Malvin S.; KANG, Doosun. Optimal design of district metered areas in a water distribution network using coupled self-organizing map and community structure algorithm. **Water**, v. 13, n. 6, p. 836, 2021.

BUI, Xuan Khoa; JEONG, Gimoon; KANG, Doosun. Adaptive DMA Design and Operation under Multiscenarios in Water Distribution Networks. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3692, 2022.

CAMPBELL, Enrique et al. A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-objective optimization. **Journal of Hydroinformatics**, v. 18, n. 1, p. 62-76, 2015.

CASTRO-GAMA, M. E. et al. A graph theoretical sectorization approach for energy reduction in water distribution networks. **Procedia engineering**, v. 154, p. 19–26, 2016.

CHATZIVASILI, Stavroula; PAPADIMITRIOU, Katerina; KANAKOUDIS, Vasilis. Optimizing the formation of DMAs in a water distribution network through advanced modelling. **Water**, v. 11, n. 2, p. 278, 2019.

CHOWDHURY, Tonoy Kanti; BISWAS, Shaikat. Graph Neural Networks (GNNS) For Modeling Cyber Attack Patterns And Predicting System Vulnerabilities In Critical Infrastructure. **American Journal of Interdisciplinary Studies**, v. 3, n. 04, p. 157-202, 2022.

CHUNG, Fan RK. **Spectral graph theory**. American Mathematical Soc., 1997.

CIAPONI, Carlo; MURARI, Enrico; TODESCHINI, Sara. Modularity-based procedure for partitioning water distribution systems into independent districts. **Water resources management**, v. 30, n. 6, p. 2021-2036, 2016.

CLAUSET, Aaron; NEWMAN, Mark EJ; MOORE, Cristopher. Finding community structure in very large networks. **Physical review E**, v. 70, n. 6, p. 066111, 2004.

CLIMATE TRANSPARENCY. **Climate Transparency Report**. 2022. Disponível em: <<https://www.climate-transparency.org/g20-climate-performance/g20report2022>>.

CONGRAM, Richard K.; POTTS, Chris N.; VAN DE VELDE, Steef L. An iterated dynasearch algorithm for the single-machine total weighted tardiness scheduling problem. **INFORMS Journal on Computing**, v. 14, n. 1, p. 52-67, 2002.

CREACO, Enrico; CUNHA, Maria; FRANCHINI, Marco. Using heuristic techniques to account for engineering aspects in modularity-based water distribution network partitioning algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 12, p. 04019062, 2019.

CREACO, Enrico; HAIDAR, Hatem. Multiobjective optimization of control valve installation and DMA creation for reducing leakage in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 10, p. 04019046, 2019.

CSARDI, Gabor; NEPUSZ, Tamas. The igraph software. **Complex syst**, v. 1695, p. 1-9, 2006.

DAO, Vinh Loc; BOTHOREL, Cécile; LENCA, Philippe. Community structure: A comparative evaluation of community detection methods. **Network Science**, v. 8, n. 1, p. 1-41, 2020.

DAWKINS, Richard. **The selfish gene**. Oxford, U.K.: Oxford Univ., 1976.

DEB, Kalyanmoy et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In: **Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI: 6th International Conference Paris, France, September 18–20, 2000 Proceedings 6**. Springer Berlin Heidelberg, 2000. p. 849-858.

DEB, Kalyanmoy. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. Kanpur, India: Wiley, 2009.

DEB, Kalyanmoy et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DE FREITAS ANCHIETA, Thomaz Felipe; MEIRELLES, Gustavo; BRENTAN, Bruno Melo. Optimal district metered areas design of water distribution systems: A comparative analysis among hybrid algorithms. **Journal of Water Process Engineering**, v. 63, p. 105472, 2024.

DEO, Narsingh. **Graph theory with applications to engineering and computer science**. Prentice-Hall, 1974.

DESALE, Sachin et al. Heuristic and meta-heuristic algorithms and their relevance to the real world: a survey. **Int. J. Comput. Eng. Res. Trends**, v. 351, n. 5, p. 2349-7084, 2015.

DI NARDO, Armando; DI NATALE, Michele. A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks. **Engineering Optimization**, v. 43, n. 2, p. 193-211, 2011.

DI NARDO, Armando et al. An automated tool for smart water network partitioning. **Water resources management**, v. 27, p. 4493-4508, 2013.

DI NARDO, Armando et al. Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices. **Journal of water resources planning and management**, v. 140, n. 5, p. 620–629, 2014.

DI NARDO, Armando et al. Weighted spectral clustering for water distribution network partitioning. **Applied Network Science**, v. 2, n. 1, p. 1-16, 2017a.

DI NARDO, Armando et al. Economic and energy criteria for district meter areas design of water distribution networks. **Water**, v. 9, n. 7, p. 463, 2017b.

DI NARDO, Armando et al. Applications of graph spectral techniques to water distribution network management. **Water**, v. 10, n. 1, p. 45, 2018.

DI NARDO, Armando et al. An advanced software to design automatically permanent partitioning of a water distribution network. **Urban Water Journal**, v. 17, n. 3, p. 259-265, 2020.

DORIGO, Marco; MANIEZZO, Vitorrio.; COLORNI, Alberto. Positive feedback as a search strategy. **Technical report**, n. 91-016, 1991.

EL-GHANDOUR, Hamdy A.; ELBELTAGI, Emad. Comparison of five evolutionary algorithms for optimization of water distribution networks. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 32, n. 1, p. 04017066, 2018.

ELIADES, Demetrios G. et al. EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB. In: **Proc. 14th international conference on computing and control for the water industry (ccwi)**. 2016.

EUSUFF, Muzaffar M.; LANSEY, Kevin E. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. **Journal of Water Resources planning and management**, v. 129, n. 3, p. 210-225, 2003.

FAGHIHINEJAD, Fereshteh et al. Evaluating social and spatial equity in public transport: A case study. **Transportation Letters**, v. 15, n. 10, p. 1420-1429, 2023.

FANG, QianSheng et al. Detection of multiple leakage points in water distribution networks based on convolutional neural networks. **Water Supply**, v. 19, n. 8, p. 2231-2239, 2019.

FANG, Qiansheng et al. A method for water supply network DMA partitioning planning based on improved spectral clustering. **Water Supply**, v. 23, n. 8, p. 3432-3452, 2023.

FARLEY, Malcolm et al. **Leakage management and control: a best practice training manual**. World Health Organization, 2001.

FARMANI, R.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. **Engineering Optimization**, v. 37, n. 2, p. 167-183, 2005.

FARMANI, Raziye; WALTERS, Godfrey; SAVIC, Dragan. Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality. **Journal of hydroinformatics**, v. 8, n. 3, p. 165-179, 2006.

FERREIRA, Bruno et al. NSGA-II parameterization for the optimal pressure sensor location in water distribution networks. **Urban Water Journal**, v. 20, n. 6, p. 738-750, 2023.

FEO, Thomas A.; RESENDE, Mauricio GC. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of global optimization**, v. 6, p. 109-133, 1995.

FONSECA, Carlos M. et al. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation discussion and generalization. In: **icga**. 1993. p. 416-423.

FORTUNATO, Santo. Community detection in graphs. **Physics reports**, v. 486, n. 3-5, p. 75-174, 2010.

FU, Minglei et al. Graph neural network for integrated water network partitioning and dynamic district metered areas. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 19466, 2022.

GANDOMI, Amir Hossein et al. Metaheuristic algorithms in modeling and optimization. **Metaheuristic applications in structures and infrastructures**, v. 1, p. 1-24, 2013.

GENG, Weimin et al. Study on Gamma selection in the optimal operation of secondary water supply system based on deep Q-learning network. **Water Supply**, v. 23, n. 8, p. 2986-2998, 2023.

GIBELLINI, Silvia et al. Electric energy consumption (EEC) in groundwater-based drinking water supply systems: analysis and comparison of seven Italian case studies. **Water Supply**, v. 24, n. 10, p. 3456-3466, 2024.

GIUDICIANNI, Carlo et al. Topological taxonomy of water distribution networks. **Water**, v. 10, n. 4, p. 444, 2018.

GIUDICIANNI, Carlo et al. Automatic multiscale approach for water networks partitioning into dynamic district metered areas. **Water Resources Management**, v. 34, n. 2, p. 835-848, 2020a.

GIUDICIANNI, Carlo et al. Zero-net energy management for the monitoring and control of dynamically-partitioned smart water systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119745, 2020b.

GIUSTOLISI, O.; RIDOLFI, Luca. A novel infrastructure modularity index for the segmentation of water distribution networks. **Water Resources Research**, v. 50, n. 10, p. 7648-7661, 2014.

GLOVER, Fred. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & operations research**, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986.

GRAYMAN, Walter M.; MURRAY, Regan; SAVIC, Dragan A. Effects of redesign of water systems for security and water quality factors. In: **World environmental and water resources congress 2009: great rivers**. 2009. p. 1-11.

HAGBERG, Aric; SWART, Pieter; CHULT, Daniel. **Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX**. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 2008.

HAN, Rui; LIU, Jun. Spectral clustering and genetic algorithm for design of district metered areas in water distribution systems. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 152-159, 2017.

HASANBEIG, Mohammadhosein; PAVEL, Lacre. On synchronous binary log-linear learning and second order Q-learning. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 8987-8992, 2017.

HERRERA, Manuel. et al. An approach to water supply clusters by semi-supervised learning. In: **2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada**. David A. Swayne, Wanhong Yang, A. A. Voinov, A. Rizzoli, T. Filatova, 2010. p. 1925-1932.

HOLLAND, John. Adaptation in natural and artificial systems, univ. of mich. press. **Ann Arbor**, v. 7, p. 390-401, 1975.

IZQUIERDO, Joaquín et al. Division of water supply systems into district metered areas using a multi-agent based approach. In: **Software and Data Technologies: 4th International Conference, ICSOFT 2009, Sofia, Bulgaria, July 26-29, 2009. Revised Selected Papers 4**. Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 167-180.

JAIN, Meetu et al. An overview of variants and advancements of PSO algorithm. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8392, 2022.

JOHNS, Matthew B.; KEEDWELL, Edward; SAVIC, Dragan. Knowledge-based multi-objective genetic algorithms for the design of water distribution networks. **Journal of Hydroinformatics**, v. 22, n. 2, p. 402-422, 2020.

JUN, Sanghoon et al. Response surfaces for water distribution system pipe roughness calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 148, n. 3, p. 04021105, 2022.

JUNEJA, Mudita; NAGAR, S. K. Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review. In: **2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)**. IEEE, 2016. p. 1-5.

KAKOUDAKIS, Konstantinos et al. Pipeline failure prediction in water distribution networks using evolutionary polynomial regression combined with K-means clustering. **Urban Water Journal**, v. 14, n. 7, p. 737-742, 2017.

KANG, Doosun; LANSEY, Kevin. Revisiting optimal water-distribution system design: Issues and a heuristic hierarchical approach. **Journal of Water resources planning and management**, v. 138, n. 3, p. 208-217, 2012.

KARYPIS, George; KUMAR, Vipin. A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs. **SIAM Journal on scientific Computing**, v. 20, n. 1, p. 359-392, 1998.

KENNEDY, James; EBERHART, Russell. Particle swarm optimization. In: **Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks**. IEEE, 1995. p. 1942-1948.

KHOA BUI, Xuan; S. MARLIM, Malvin; KANG, Doosun. Water network partitioning into district metered areas: A state-of-the-art review. **Water**, v. 12, n. 4, p. 1002, 2020.

KIM, Taehyeon et al. Evaluation of priority control district Metered area for water distribution networks using water quality-related big data. **Sustainability**, v. 14, n. 12, p. 7282, 2022.

KIRKPATRICK, Scott; GELATT JR, C. Daniel; VECCHI, Mario P. Optimization by simulated annealing. **science**, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

KLISE, Katherine A.; MURRAY, Regan; HAXTON, Terra. An Overview of the Water Network Tool for Resilience (WNTR). 2018.

KNOWLES, Joshua D.; CORNE, David W. Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy. **Evolutionary computation**, v. 8, n. 2, p. 149-172, 2000.

KOKASH, Natallia. An introduction to heuristic algorithms. **Department of Informatics and Telecommunications**, p. 1-8, 2005.

KOWALSKA, B.; SUCHORAB, P.; KOWALSKI, D. Division of district metered areas (DMAs) in a part of water supply network using WaterGEMS (Bentley) software: a case study. **Applied Water Science**, v. 12, n. 7, p. 166, 2022.

KUMAR, Vijendra; YADAV, S. M. A state-of-the-Art review of heuristic and metaheuristic optimization techniques for the management of water resources. **Water supply**, v. 22, n. 4, p. 3702-3728, 2022.

LANCICHINETTI, Andrea; FORTUNATO, Santo. Community detection algorithms: a comparative analysis. **Physical review E**, v. 80, n. 5, p. 056117, 2009.

LENART, Chris et al. Gaze Analysis System for Immersive 360 Video for Preservice Teacher Education. In: **Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia**. 2023. p. 8608-8616.

LI, Hongyan et al. Optimizing District Metered Areas and Associated Pressure Reducing Valves and Pumping Stations for Effective and Efficient Management of Water Distribution Network. **Water Resources Management**, v. 39, p.379-396, 2024.

LIFSHITZ, Ron; OSTFELD, Avi. Clustering for analysis of water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 5, p. 04018016, 2018.

LIU, Haixing et al. Comparing topological partitioning methods for district metered areas in the water distribution network. **Water**, v. 10, n. 4, p. 368, 2018.

LIU, Jun; LANSEY, Kevin E. Multiphase DMA design methodology based on graph theory and many-objective optimization. **Journal of water resources planning and management**, v. 146, n. 8, p. 04020068, 2020.

LLOYD, Stuart. Least squares quantization in PCM. **IEEE transactions on information theory**, v. 28, n. 2, p. 129-137, 1982.

MALA-JETMAROVA, Helena; SULTANOVA, Nargiz; SAVIC, Dragan. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. **Environmental modelling & software**, v. 93, p. 209-254, 2017.

MAMBRETTI, Stefano et al. Graph theory and community detection for elementary DMA design. **Sustainable Water Resources Management XI**, v. 250, p. 121Effective, 2021.

MARCHI, Angela et al. Battle of the water networks II. **Journal of water resources planning and management**, v. 140, n. 7, p. 04014009, 2014.

MEHRBAN, Ali; AHADIAN, Pegah. Malware Detection in IOT Systems Using Machine Learning Techniques. **International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)**, v. 15, n. 6, 2023.

MEIJER, Didrik et al. Identifying critical elements in drinking water distribution networks using graph theory. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 17, n. 3, p. 347-360, 2021.

MELGAREJO-MORENO, Joaquín; LÓPEZ-ORTIZ, María-Inmaculada; FERNÁNDEZ-ARACIL, Patricia. Water distribution management in South-East Spain:

A guaranteed system in a context of scarce resources. **Science of the Total Environment**, v. 648, p. 1384-1393, 2019.

MLADENOVIĆ, Nenad; HANSEN, Pierre. Variable neighborhood search. **Computers & operations research**, v. 24, n. 11, p. 1097-1100, 1997.

MOSHTAGHI, Hojatollah R.; ESHLAGHY, Abbas T.; MOTADEL, Mohammad Reza. A comprehensive review on meta-heuristic algorithms and their classification with novel approach. **Journal of Applied Research on Industrial Engineering**, v. 8, n. 1, p. 63-89, 2021.

MOTTA, Renato Gonçalves da. **Importância da setorização adequada para combate às perdas reais de água de abastecimento público**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2010.tde-18082010-171334>. Acesso em: 04 set. 2023.

MURATA, Tadahiko; ISHIBUCHI, Hisao. MOGA: multi-objective genetic algorithms. In: **IEEE international conference on evolutionary computation**. IEEE Piscataway, 1995. p. 289-294.

NAEINI, Ali Bonyadi; MAHDIPOUR, Ali Golbazi; DORRI, Rasam. Using eye tracking to measure overall usability of online grocery shopping websites. **International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications (IJMCMC)**, v. 14, n. 1, p. 1-24, 2023.

NAGAR, A.; HERAGU, S. S.; HADDOCK, J. A meta-heuristic algorithm for a bi-criteria scheduling problem. **Annals of Operations Research**, v. 63, p. 397-414, 1995.

NEGM, Ahmed; MA, Xiandong; AGGIDIS, George. Review of leakage detection in water distribution networks. In: **IOP conference series: earth and environmental science**. IOP Publishing, 2023. p. 012052.

NEWMAN, Mark E.J. Analysis of weighted networks. **Physical review E**, v. 70, n. 5, p. 056131, 2004.

NEWMAN, Mark EJ; GIRVAN, Michelle. Finding and evaluating community structure in networks. **Physical review E**, v. 69, n. 2, p. 026113, 2004.

NOVÁK, Petr; NEUMANN, Pavel; MACAS, Jiří. Graph-based clustering and characterization of repetitive sequences in next-generation sequencing data. **BMC bioinformatics**, v. 11, p. 1-12, 2010.

NOVARINI, Bernardo et al. Mixed computational and hydraulic criteria for DMA creation using hybrid SOM, K-means algorithms. In: **Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería (CMN 2017). Actas**. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2017. p. 1627-1640.

NOVARINI, Bernardo et al. Optimal pressure management in water distribution networks through district metered area creation based on machine learning. **RBRH**, v. 24, 2019.

OYEBODE, Oluwaseun et al. Water demand modelling using evolutionary computation techniques: integrating water equity and justice for realization of the sustainable development goals. **Heliyon**, v. 5, n. 11, 2019.

PERELMAN, Lina; OSTFELD, Avi. Water-distribution systems simplifications through clustering. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 3, p. 218-229, 2012.

PERELMAN, Lina; OSTFELD, Avi. Application of graph theory to sensor placement in water distribution systems. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future**. 2013. p. 617-625.

POHL, Ira. **Bi-directional and heuristic search in path problems**. Stanford Linear Accelerator Center, Calif., 1969.

POLHILL, J. Gary et al. Modelling systemic change in coupled socio-environmental systems. **Environmental Modelling & Software**, v. 75, p. 318-332, 2016.

POLI, Riccardo; KENNEDY, James; BLACKWELL, Tim. Particle swarm optimization: An overview. **Swarm intelligence**, v. 1, p. 33-57, 2007.

PONS, Pascal; LATAPY, Matthieu. Computing communities in large networks using random walks. In: **International symposium on computer and information sciences**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 284-293.

PRASAD, T. Devi; HONG, Sung-Hoon; PARK, Namsik. Reliability based design of water distribution networks using multi-objective genetic algorithms. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 7, p. 351-361, 2003.

PUERTA-ZURITA, Mariangel et al. A Single Water Pipeline Design Considering Pressure-Dependent Consumptions: A New Perspective. **Water**, v. 17, n. 3, p. 307, 2025.

QIU, Mengning; OSTFELD, Avi. Dynamic clustering for water distribution system water quality management. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2020**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 318-328.

RAAD, D. N.; SINSKEY, A.; VAN VUUREN, J. H. Water distribution systems design optimisation using metaheuristics and hyperheuristics. **ORION**, v. 27, n. 1, p. 17-34, 2011.

REICHARDT, Jörg; BORNHOLDT, Stefan. Statistical mechanics of community detection. **Physical review E**, v. 74, n. 1, p. 016110, 2006.

RIYAH, Mohammad Mehdi et al. Coupled multi-objective optimization of water distribution network design and partitioning: a spectral graph-theory approach. **Urban Water Journal**, v. 21, n. 6, p. 745-756, 2024.

ROSSMAN, Lewis A. et al. **EPANET 2.2 User Manual**. 2020.

SABZKOUHI, Adell Moradi; HAGHIGHI, Ali. Uncertainty analysis of pipe-network hydraulics using a many-objective particle swarm optimization. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, n. 9, p. 04016030, 2016.

SALDARRIAGA, Juan et al. Battle of the water networks district metered areas. **Journal of water resources planning and management**, v. 145, n. 4, p. 04019002, 2019.

SANTONASTASO, G. F.; DI NARDO, A.; CREACO, E. Dual topology for partitioning of water distribution networks considering actual valve locations. **Urban water journal**, v. 16, n. 7, p. 469–479, 2019.

SANTONASTASO, Giovanni Francesco et al. Pressure Management of Water Distribution Networks Based on Minimum Ground Elevation Difference of DMAs. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 47, 2020.

SAVIĆ, D.; FERRARI, Giada. Design and performance of district metering areas in water distribution systems. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 1136-1143, 2014.

SCHAFFER, J. David. Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms. In: **Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms**. 1985. p. 93-100.

SCOLA, Luiz Antônio. **Otimização Multiobjetivo Evolutiva de Operação de Sistemas de Reservatórios Multiusos**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-16112021-151456>. Acesso em: 04 set. 2023.

SERAFEIM, Athanasios V. et al. Leakages in Water Distribution Networks: Estimation Methods, Influential Factors, and Mitigation Strategies—A Comprehensive Review. **Water**, v. 16, n. 11, p. 1534, 2024.

SHAFIEE, M. Ehsan et al. Parallel evolutionary algorithm for designing water distribution networks to minimize background leakage. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 5, p. C4015007, 2016.

SHARMA, Aniket N. et al. Multiphase procedure for identifying district metered areas in water distribution networks using community detection, NSGA-III optimization, and

multiple attribute decision making. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 148, n. 8, p. 04022040, 2022.

SHARMA, Aniket Nandkumar; DONGRE, Shilpa R.; GUPTA, Rajesh. Many-objective optimisation tool for the design of district metered areas in pumped water distribution networks. **Water Supply**, v. 23, n. 9, p. 3789-3804, 2023.

SHAW, Paul. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In: **International conference on principles and practice of constraint programming**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998. p. 417-431.

SHEKOFTEH, Mohammad Reza; YOUSEFI-KHOSHQALB, Ehsan; PIRATLA, Kalyan R. An Efficient Approach for Partitioning Water Distribution Networks Using Multi-Objective Optimization and Graph Theory. **Water Resources Management**, p. 1-16, 2023.

SHOKOOHI, Meisam et al. Water quality based multi-objective optimal design of water distribution systems. **Water Resources Management**, v. 31, p. 93-108, 2017.

SIQUEIRA, João Paulo Guardabaxo. **Métodos de partição de rede de abastecimento de água**: um estudo de caso em Pederneiras/SP. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-16112021-151456>. Acesso em: 04 set. 2023.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS (org.). **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral ano de referência 2022**. Brasília, 2023, 107 p.

SMOLA, Alex J.; SCHÖLKOPF, Bernhard. **Learning with kernels**. Berlin, Germany: GMD-Forschungszentrum Informationstechnik, 1998.

SÖRENSEN, Kenneth; GLOVER, Fred. Metaheuristics. **Encyclopedia of operations research and management science**, v. 62, p. 960-970, 2013.

SOUZA, Rui Gabriel et al. Rehabilitation in intermittent water distribution networks for optimal operation. **Water**, v. 14, n. 1, p. 88, 2022.

SOVACOOOL, Benjamin K.; DWORKIN, Michael H. Energy justice: Conceptual insights and practical applications. **Applied energy**, v. 142, p. 435-444, 2015.

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

SRINIVAS, N.; DEB, Kalyanmoy. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. **Evolutionary computation**, v. 2, n. 3, p. 221–248, 1994.

TAIWO, Ridwan; SHABAN, Ibrahim Abdelfadeel; ZAYED, Tarek. Development of sustainable water infrastructure: A proper understanding of water pipe failure. **Journal of Cleaner Production**, v. 398, p. 136653, 2023.

TAMURA, Hiroyuki et al. An Approximate Solution Method for Combinatorial Optimization Hybrid Approach of Genetic Algorithm and Lagrange Relaxation Method. **Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers**, v. 30, n. 3, p. 329-336, 1994.

TANABE, Ryoji; ISHIBUCHI, Hisao. Non-elitist evolutionary multi-objective optimizers revisited. In: **Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference**. 2019. p. 612-619.

TARJAN, Robert. Depth-first search and linear graph algorithms. **SIAM journal on computing**, v. 1, n. 2, p. 146-160, 1972.

TRAAG, Vincent A.; VAN DOOREN, Paul; NESTEROV, Yurii. Narrow scope for resolution-limit-free community detection. **Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 84, n. 1, p. 016114, 2011.

TRAAG, Vincent A.; WALTMAN, Ludo; VAN ECK, Nees Jan. From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 5233, 2019.

TRATA BRASIL. **Estudo de Perdas de Água do Instituto Trata Brasil de 2023 - SNIS (2021): Desafios para Disponibilidade Hídrica e Avanço da Eficiência do Saneamento Básico no Brasil**. São Paulo. GO Associados, 2023, 68 p.

TRATA BRASIL. **Estudo de Perdas de Água de 2024 (SNIS, 2022): Desafios na Eficiência do Saneamento Básico no Brasil**. São Paulo. GO Associados, 2024, 60 p.

TRATA BRASIL. **Estudo sobre os Avanços do Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil de 2025 (SINISA, 2023)**. São Paulo. GO Associados, 2024, 91 p.

TODINI, Ezio. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. **Urban water**, v. 2, n. 2, p. 115–122, 2000.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goal Report**. Estados Unidos. UN, 2023, 76 p.

VALEJO, Alan Demetrius Baria. **Refinamento multinível em redes complexas baseado em similaridade de vizinhança**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.55.2014.tde-14042015-142526>. Acesso em: 23 out. 2023.

WALSHAW, Chris. Multilevel refinement for combinatorial optimisation problems. **Annals of Operations Research**, v. 131, p. 325-372, 2004.

WALSKI, Thomas M. The wrong paradigm—Why water distribution optimization doesn't work. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 4, p. 203-205, 2001.

WALTMAN, Ludo; VAN ECK, Nees Jan. A smart local moving algorithm for large-scale modularity-based community detection. **The European physical journal B**, v. 86, n. 11, p. 471, 2013.

WANG, Qi et al. Parameterization of NSGA-II for the optimal design of water distribution systems. **Water**, v. 11, n. 5, p. 971, 2019.

WATER AUTHORITIES ASSOCIATION (WAA); WATER RESEARCH CENTRE (WRC). **Leakage control policy and practice**. 1985.

WATER NEWS EUROPE. **Water prices compared in 36 EU-cities**. 2021. Disponível em: <<https://www.waternewseurope.com/water-prices-compared-in-36-eu-cities/>>.

WDSA/CCWI Committee. **Battle of Intermittent Water Supply Instructions**. Disponível em: <<https://wdsa-ccwi2022.upv.es/battle-of-water-networks/#downloads>>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2024: special focus on inequalities**. World Health Organization, 2025.

WRIGHT, Robert et al. Adaptive water distribution networks with dynamically reconfigurable topology. **Journal of Hydroinformatics**, v. 16, n. 6, p. 1280-1301, 2014.

XIN, K. et al. Apparent losses analysis in district metered areas of water distribution systems. **Water resources management**, v. 28, n. 3, p. 683–696, 2014.

XU, Mengjia. Understanding graph embedding methods and their applications. **SIAM Review**, v. 63, n. 4, p. 825-853, 2021.

YANG, Xin-She. **Nature-inspired metaheuristic algorithms**. Luniver press, 2010.

YAZDANI, A.; OTOO, R. Appiah; JEFFREY, Paul. Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1574-1582, 2011.

YAZDANI, Alireza; JEFFREY, Paul. Water distribution system vulnerability analysis using weighted and directed network models. **Water Resources Research**, v. 48, n. 6, 2012.

YU, Tingchao et al. Optimal design of district metered areas based on improved particle swarm optimization method for water distribution systems. **Water Supply**, v. 22, n. 11, p. 7930-7944, 2022.

ZEIDAN, Mohamad; LI, Pu; OSTFELD, Avi. DMA segmentation and multiobjective optimization for trading off water age, excess pressure, and pump operational cost in water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 147, n. 4, p. 04021006, 2021.

ZHANG, Qingzhou et al. Automatic partitioning of water distribution networks using multiscale community detection and multiobjective optimization. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 9, p. 04017057, 2017.

ZHANG, Kui et al. A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network. **Science of The Total Environment**, v. 656, p. 1401-1412, 2019.

ZHAO, Zhongying et al. A comparative study on community detection methods in complex networks. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, v. 35, n. 1, p. 1077-1086, 2018.

ZHENG, Feifei; ZECCHIN, Aaron C.; SIMPSON, Angus R. Investigating the run-time searching behavior of the differential evolution algorithm applied to water distribution system optimization. **Environmental Modelling & Software**, v. 69, p. 292-307, 2015.

ZITZLER, Eckart; THIELE, Lothar. An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: The strength pareto approach. **TIK report**, v. 43, 1998.

ZITZLER, Eckart; LAUMANNNS, Marco; THIELE, Lothar. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. **TIK report**, v. 103, 2001.

**ARTIGOS PUBLICADOS OU SUBMETIDOS EM PERIÓDICOS INTERNACIONAIS**

- 1) **ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas**; MEIRELLES, Gustavo; BRENTAN, Bruno Melo. Optimal District metered areas design of water distribution systems: A comparative analysis among hybrid algorithms. Journal of Water Process Engineering, v. 63, p. 105472, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105472>.
- 2) **ANCHIETA, Thomaz**; COVAS, Dídía; MEIRELLES, Gustavo; BRENTAN, Bruno. Optimizing District Metered Areas Design for Sustainable Water Supply Management. Urban Water Journal. Submetido em agosto de 2025.
- 3) **ANCHIETA, Thomaz**; COVAS, Dídía, BRENTAN, Bruno. Dynamic District Metered Areas. Journal of Water Process Engineering. Submetido em fevereiro de 2026.
- 4) JACOME, Rair Solis; **ANCHIETA, Thomaz**; BRENTAN, Bruno Melo; HERRERA, Manuel; GALVAN, Xitlali Delgado; NEVAREZ, Jose Antonio Arciniega; RODRIGUEZ, Jesus Mora. Core-periphery structure for district metered area partitioning in urban water distribution systems. Water Science and Engineering, v. 18, pp. 262-273, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2025.04.006>.
- 5) SOUZA, Rui Gabriel; **ANCHIETA, Thomaz**; MEIRELLES, Gustavo; BARROS, Daniel; BRENTAN, Bruno. Optimal partitioning and operation of water distribution networks under intermittent conditions: A case study of Modena network. Water Science and Engineering, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2025.12.002>.

## ARTIGOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS E SIMPÓSIOS

- 1) **ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas**; LIMA, Gustavo Meirelles; BRENTAN, Bruno Melo. Particionamento Dinâmico para Processo de Setorização de Rede de Distribuição de Água: uma abordagem comparativa entre os algoritmos Fast-Greedy e Louvain. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Drenagem e Irrigação. Aracajú, Sergipe: ABRHidro, 2023. p. 1-10.
- 2) **ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas**; LIMA, Gustavo Meirelles; BRENTAN, Bruno Melo. Análise Comparativa entre Algoritmos Híbridos em Otimização Multiobjetivo de Setores em Rede de Distribuição de Água. In: II Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e XVI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Curitiba, Paraná: ABRHidro, 2024. p.1-8.
- 3) **ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas**; COVAS, Dídya Isabel Cameira.; MEIRELLES, Gustavo; BRENTAN, Bruno Melo. Setorização Ótima de Rede de Distribuição de Água: uma perspectiva hidráulica aplicada ao processo de otimização. In: XVIII Congresso Iberoamericano de Sistemas de Abastecimento de Água, Drenagem e Irrigação. João Pessoa, Paraíba: Universidade Federal da Paraíba, 2025. p. 1-10.