



**NOVA**

NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA DO  
AMBIENTE**

**AMÍLCAR MANUEL FERNANDES MARROCANO**

Licenciado em Energia e Ambiente

# OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DA MODELAÇÃO HIDRÁULICA

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE, PERFIL DE ENGENHARIA  
SANITÁRIA

Universidade NOVA de Lisboa  
Dezembro, 2023





DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA DO  
AMBIENTE

# OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DA MODELAÇÃO HIDRÁULICA

AMÍLCAR MANUEL FERNANDES MARROCANO

Licenciado em Energia e Ambiente

**Orientador:** Prof. Doutor António Pedro Macedo Coimbra Mano  
Professor auxiliar, FCT-NOVA

## Júri:

**Presidente:** Prof.<sup>a</sup> Doutora Leonor Miranda Monteiro do Amaral  
Professora Associada, FCT-NOVA

**Arguente:** Prof. Doutor Pedro Manuel Hora dos Santos Coelho  
Professor Associado, FCT-NOVA

**Vogal:** Prof. Doutor António Pedro Macedo Coimbra Mano  
Professor auxiliar, FCT-NOVA

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE, PERFIL DE ENGENHARIA SANITÁRIA

Universidade NOVA de Lisboa

Dezembro, 2023



## **Otimização de Sistemas de Abastecimento de Água através da Modelação Hidráulica**

Copyright © Amílcar Manuel Fernandes Marrocano, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

A presente dissertação marca o final de mais uma importante etapa académica que agora se cessa. Assim, agradeço a todos os que me acompanharam e contribuíram para o meu melhor desempenho académico e profissional, em especial:

Ao Orientador Professor António Pedro Macedo Coimbra Mano por todo conhecimento e rigor técnico transmitido durante o mestrado e pela fundamental disponibilidade, dedicação, paciência e apoio na revisão da dissertação. Um especial agradecimento à Professora Leonor Miranda Monteiro do Amaral pela insistência e preocupação, que, durante estes últimos 5 anos, foi preponderante para que eu não abdicasse da conclusão do mestrado.

A toda a comunidade da EPAL e Águas do Vale do Tejo, em especial à Direção de Operações de Abastecimento de Água, que tão bem me acolheu nesta minha carreira profissional, onde, juntos, trabalhamos arduamente para cumprir a nossa missão, em torno de um bem tão precioso, que é a água.

Ao meu pai, por todo empenho e esforço para que eu conseguisse alcançar os meus sonhos. *Não estás presente mas estás orgulhoso e de coração cheio, eu sei!*

À minha mãe, por tudo, em especial, por toda a determinação, educação e incentivo.

Às minhas irmãs, por estarem sempre comigo quando preciso e pela nossa união, carinho e amizade.

À minha namorada, pela fundamental presença na minha vida.



## RESUMO

A modelação matemática é uma ferramenta cada vez mais importante para uma gestão eficiente das entidades gestoras, onde os modelos de simulação hidráulica são usados num conjunto de atividades, incluindo o planeamento, projeto, operação, otimização e manutenção.

Os sistemas de abastecimento de água são geralmente complexos, o que fundamenta a criação e a aplicação de modelos de simulação hidráulica de modo a permitir a visualização do comportamento real de uma rede de abastecimento.

Como caso de estudo, foi efetuada a simulação hidráulica de uma parte da rede de abastecimento do subsistema de abastecimento da Senhora do Desterro / Captações da Serra, com o objetivo de se proporem melhorias operacionais de modo a mitigar alguns dos problemas que se colocam no transporte de água e regularização de pressão nas condutas adutoras e no funcionamento em automático de estações elevatórias. Foi apresentado o desenvolvimento do modelo de simulação bem como a metodologia aplicada tendo-se, posteriormente, submetido o modelo de simulação a três diferentes cenários com o objetivo de avaliar o funcionamento e a adaptabilidade do sistema de abastecimento de água aos pressupostos definidos, bem como a sua resiliência aos cenários tipificados. Para o desenvolvimento deste trabalho, o programa informático de simulação hidráulica selecionado foi o EPANET 2.0.

**Palavras-chave:** Otimização, Sistemas de Abastecimento de Água, Modelação Hidráulica, EPANET.



## ABSTRACT

Mathematical modeling is an increasingly important tool for efficient management of management entities, where hydraulic simulation models are used in a range of activities, including planning, design, operation, optimization and maintenance.

The water supply systems are generally complex, which is the basis for the creation and application of hydraulic simulation models to allow visualization of the real behavior of a water supply network.

As a case study, a hydraulic simulation was made with a part of the supply subsystem of the Senhora do Desterro / Captações da Serra, with the aim of proposing operational improvements in order to mitigate some of the problems that arise in transport of water and regulation of pressure in pipelines and automatic operation of pumping stations. In this study, the development of the simulation model was presented as well as the methodology applied and the simulation model was subsequently subjected to three different scenarios with the aim of evaluating the functioning and adaptability of the water supply system to the defined presuppositions, as well the resilience to typified scenarios. For the development of this work, the hydraulic simulation computer program selected was EPANET 2.0.

**Keywords:** Optimization, Water Supply Systems, Hydraulic Modeling, EPANET.



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Estrutura da dissertação .....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Sistemas de Abastecimento de Água.....	5
2.1.1.	Componentes dos SAA.....	7
2.1.2.	Operação e otimização dos SAA .....	11
2.2	Modelação hidráulica em SAA .....	15
2.2.1.	Seleção do programa de simulação hidráulica.....	20
2.2.2.	EPANET 2.0 .....	22
<b>3</b>	<b>CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>27</b>
3.1	Águas do Vale do Tejo, S.A .....	27
3.2	Subsistema de Abastecimento em Alta da Senhora do Desterro/Captações da Serra	30
3.2.1.	Enquadramento .....	30
3.2.2.	Caracterização da área de estudo .....	32
3.3	Aplicação do modelo de simulação hidráulica EPANET 2.0 .....	36
3.3.1.	Metodologia .....	36
3.3.2.	Definição do modelo .....	36

<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
4.1	Análise e melhorias aplicadas no modelo.....	49
4.1.1.	Setor 1 .....	49
4.1.2.	Setores 2 e 3 .....	52
4.2	Criação e avaliação de cenários .....	53
4.2.1.	Resultados da simulação do Cenário 1.....	53
4.2.2.	Resultados da simulação do Cenário 2.....	54
4.2.3.	Resultados da simulação do Cenário 3.....	55
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribuição geográfica das entidades gestoras de serviços de abastecimento de água em alta, em Portugal Continental.....	6
Figura 2.2: Distribuição geográfica das entidades gestoras de serviços de abastecimento de água em baixa, em Portugal Continental .....	7
Figura 2.3: Representação esquemática dos diferentes tipos de redes.....	10
Figura 2.4: Principais elementos dos sistemas de abastecimento de água, com os componentes do balanço hídrico e localização dos pontos de medição de caudal.....	11
Figura 2.5: Atividades, planeamento e gestão operacional dos SAA.....	13
Figura 2.6: Desafios futuros para os estudos de otimização de sistemas de abastecimento de água .....	14
Figura 2.7: Períodos aproximados de concentração de pesquisas relativas à simulação de SAA, com base em publicações científicas .....	16
Figura 2.8: Cronograma dos autores que promoveram alterações significativas nos métodos de simulação de SAA.....	16
Figura 3.1: Empresas pertencentes ao grupo Águas de Portugal e área de influência	27
Figura 3.2: Municípios servidos pela Águas do Vale do Tejo.....	28
Figura 3.3: Delimitação dos setores na área em estudo .....	34
Figura 3.4 Exemplo de introdução das propriedades de um reservatório .....	38
Figura 3.5: Exemplo de introdução das propriedades relativas a um ponto de entrega .....	38

Figura 3.6: Exemplo de introdução de dados relativos a uma curva de funcionamento de uma bomba .....	39
Figura 3.7: Exemplo de introdução de dados relativos a uma válvula de controlo de rede .....	39
Figura 3.8: Exemplo de introdução de dados relativos a um nó na rede.....	40
Figura 3.9: Representação da altimetria do SAA em estudo .....	41
Figura 3.10: Exemplo da evolução de caudal e pressão obtido no WONE .....	42
Figura 3.11: Evolução padrão de consumo anual, considerando os volumes mensais do ano 2018, 2019 e 2020.....	43
Figura 3.12: Exemplo da evolução diária de consumo após cálculo de padrões de consumo .....	44
Figura 3.13: Exemplo de configuração de Padrões de Consumo no EPANET .....	44
Figura 3.14: Exemplo do resultado de variação de consumo em um Ponto de Entrega no projeto EPANET .....	45
Figura 3.15: Válvula Flucon 200.....	46
Figura 3.16: Controlos programados inseridos no modelo EPANET .....	47
Figura 4.1: Mapa da pressão na rede de adução em isolinhas.....	49
Figura 4.2: Pressão no Nó N481 .....	50
Figura 4.3: Pressão no Nó N481, após os ajustes.....	51
Figura 4.4: Nível do reservatório de jusante, após os ajustes.....	51
Figura 4.5: Alteração dos controlos programados inseridos no modelo EPANET .....	52
Figura 4.6: Evolução do nível do reservatório Curral do Negro para as condições do cenário 1 .....	54
Figura 4.7: Variação do nível do reservatório Curral do Negro para as condições do cenário 2 .....	55
Figura 4.8: Caudal de bombagem da EEAA São Julião para as condições do cenário 2 .....	55
Figura 4.9: Evolução do nível do reservatório Curral do Negro para as condições do cenário 3 .....	56

Figura 4.10: Variação do nível do reservatório Curral do Negro (linha verde) e Cerca Novo (linha vermelha) para as condições do cenário 3 com o fecho da entrada de água no reservatório Cerca Novo..... 57

Anexo 1: Esquema do Sistema de Abastecimento da Senhora do Desterro /Captações da Serra, em termos altimétricos..... 66

Anexo 2: Traçado da rede em AutoCAD ..... 67

Anexo 3: Resultado da importação do mapa da rede ..... 68

Anexo 4: Projeto do modelo no EPANET após introdução dos elementos físicos do SAA em estudo ..... 69



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação de modelos de programas para simulação hidráulica .....	21
Tabela 3.1 Coeficientes da Fórmula de Perda de Carga, C, de Hazen-Williams, para tubagens novas .....	37



## ABREVIATURAS

AdP	Águas de Portugal
AdVT	Águas do Vale do Tejo
APDA	Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas
CPC	Câmara de Perda de Carga
EEAA	Estação Elevatória de Abastecimento de Água
ERSAR	Entidade Reguladora de Serviços de Águas e Resíduos
ETA	Estação de Tratamento de Água
FFD	Ferro Fundido Dúctil
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
m c.a	Metro Coluna de Água
PNSE	Parque Natural da Serra da Estrela
PVC	PoliCloreto de Vinilo
R	Reservatório
RASAR	Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variável
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SIG	Sistema de Informação Geográfica
VRP	Válvula Redutora de Pressão
WONE	Water Optimization for Network Efficiency
ZMC	Zona de Monitorização e Controlo



# INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A água é essencial para o desenvolvimento de uma sociedade, pelos seus diversos usos, garantindo que as necessidades básicas sejam atendidas e promovendo a saúde pública, a energia, a agricultura, a indústria e a manutenção dos ecossistemas. Em termos de abastecimento de água para consumo humano, as populações dependem diretamente de um bom sistema de abastecimento de água (SAA) visando o fornecimento de água com boa qualidade, em quantidade e em segurança, desde a origem até ao consumidor final. Neste contexto é importante o desenvolvimento de SAA mais eficientes, resilientes e sustentáveis.

A análise do comportamento de SAA para consumo humano, no que respeita às suas deficiências e particularidades, apresenta por vezes dificuldades, nomeadamente quando a sua complexidade aumenta. Os aspetos vulgarmente associados a deficiências funcionais destes sistemas, incluem a deteção de condições anómalas de pressão (déficit ou excesso), limitações nos caudais abastecidos, perdas de água significativas, eventualmente com o surgimento de água à superfície do solo e, também, problemas qualitativos, como por exemplo a ocorrência de episódios de turvação ou cor na água abastecida (Coelho et al., 2006).

A caracterização e o diagnóstico pormenorizados da evolução de um SAA através da monitorização direta é muito dispendiosa, preconizando-se, deste modo, o recurso a modelos matemáticos que permitam simular, analisar e diagnosticar aquele tipo de sistemas, independentemente da sua complexidade. Por outro lado, no que se refere à conceção de novos SAA, ou a intervenções em SAA existentes, os elevados custos das infraestruturas e a variabilidade das condições de operação, concorrem igualmente para que o processo de planeamento e de cálculo hidráulico seja igualmente objeto de avaliação e validação através daquele tipo de modelos (Coelho et al., 2006).

A modelação hidráulica de SAA é atualmente entendida como uma mais-valia que pode contribuir, de um modo muito significativo, para uma gestão mais eficiente da água e otimização de sistemas, incluindo a redução das perdas de água, a minimização dos

consumos energéticos (redução da pegada ambiental) e, conseqüentemente, dos custos financeiros associados.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação teve como o principal objetivo a revisão dos principais benefícios da modelação hidráulica aplicada aos SAA, tendo-se desenvolvido e aplicado um modelo a um sistema pertencente à entidade gestora Águas do Vale do Tejo, S.A.

Para a prossecução deste objetivo utilizou-se o programa EPANET 2.0, por ser de utilização livre, gratuita e de fácil acesso, e, também, bastante fiável, sendo um dos principais modelos de simulação hidráulica atualmente utilizado, quer pela comunidade científica, quer pelas entidades gestoras. Com base da modelação desenvolvida, foi efetuada a análise hidráulica de vários cenários com o objetivo de contribuir para a otimização operacional do SAA.

## 1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está organizado em quatro capítulos, que de seguida se resumem:

**1. Introdução** – neste capítulo é realizado um enquadramento do tema abordado, sendo igualmente apresentados os objetivos propostos, bem como a estrutura adotada;

**2. Revisão bibliográfica** – neste capítulo descrevem-se, genericamente, os SAA, bem como os seus diferentes componentes, salientando-se igualmente os aspetos relativos à sua operação e, também, a evolução dos processos de otimização. No que se refere à modelação hidráulica dos SAA, são referidos os benefícios da reprodução da realidade física daqueles sistemas e as respetivas metodologias, utilizando modelos computacionais de simulação hidráulica. Com base na análise efetuada, foi selecionado o programa EPANET 2.0 para aplicação ao caso de estudo apresentado no capítulo seguinte, tendo-se resumido as suas principais características e funcionalidades bem como as principais vantagens que decorrem da sua utilização;

**3. Caso de estudo** – neste capítulo apresenta-se a empresa Águas do Vale do Tejo, SA, e é efetuada a caracterização do caso de estudo, designadamente de parte do sistema adutor do subsistema da Senhora do Desterro/Captações da Serra, que por sua vez se divide em três setores. Apresenta-se o desenvolvimento do modelo de simulação hidráulica, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior.

**4. Resultados** – neste capítulo apresenta-se a análise hidráulica do SAA em estudo, que permitiu efetuar alterações no modelo hidráulico base de modo a mitigar os constrangimentos verificados em cada setor. Posteriormente, com base no modelo desenvolvido, foram analisados três cenários, tendo sido avaliados os respectivos resultados;

**4. Conclusões** – por fim, apresentam-se em síntese as conclusões do trabalho desenvolvido.



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sistemas de Abastecimento de Água

Os Sistemas de Abastecimento de Água podem apresentar elevada complexidade, incluindo infraestruturas e equipamentos capazes de produzir, transportar, armazenar e distribuir um bem essencial para o consumo humano, que é a água, para além de um elevado valor comercial intrínseco. A conceção e a materialização de um SAA têm por objetivo garantir o fornecimento de água em quantidade, com qualidade, de forma contínua e em segurança, a um custo reduzido. De um modo transversal, as entidades gestoras procuram o desenvolvimento sustentável dos SAA em termos sociais, económicos e ambientais (Marques & Sousa, 2011).

A atividade de abastecimento de água constitui um serviço público de carácter estrutural que vincula o meio hídrico a um utilizador final. Esta atividade subdivide-se em sistemas em alta, que incluem as infraestruturas a montante da rede de distribuição, designadamente a captação, o tratamento, a adução e, por fim, o armazenamento de água e, por outro lado, os sistemas em baixa, que são constituídos pelas infraestruturas que garantem a distribuição de água aos consumidores. Estes sistemas podem ser integrados quando a ligação entre o meio hídrico e o consumidor é assegurada pelo mesmo sistema e entidade gestora (Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos [ERSAR], 2023; Olaia, 2012).

No ano de 2022, em Portugal Continental o serviço de abastecimento em alta era efetuado, na maior parte do território, por entidades gestoras concessionárias, que cobriam 72% da população e 78% dos municípios, e o abastecimento de água em baixa era caracterizado por um elevado número de entidades gestoras (232), na sua maioria com uma área de intervenção igual ou inferior ao da área municipal. As entidades como Associações de Municípios, Serviços Municipalizados ou Intermunicipais e Serviços Municipais, são as que mais se destacam, uma vez que abrangem 61% do total dos municípios e 48% da população, conforme se observa nas Figura 2.1 e Figura 2.2 (ERSAR, 2023).

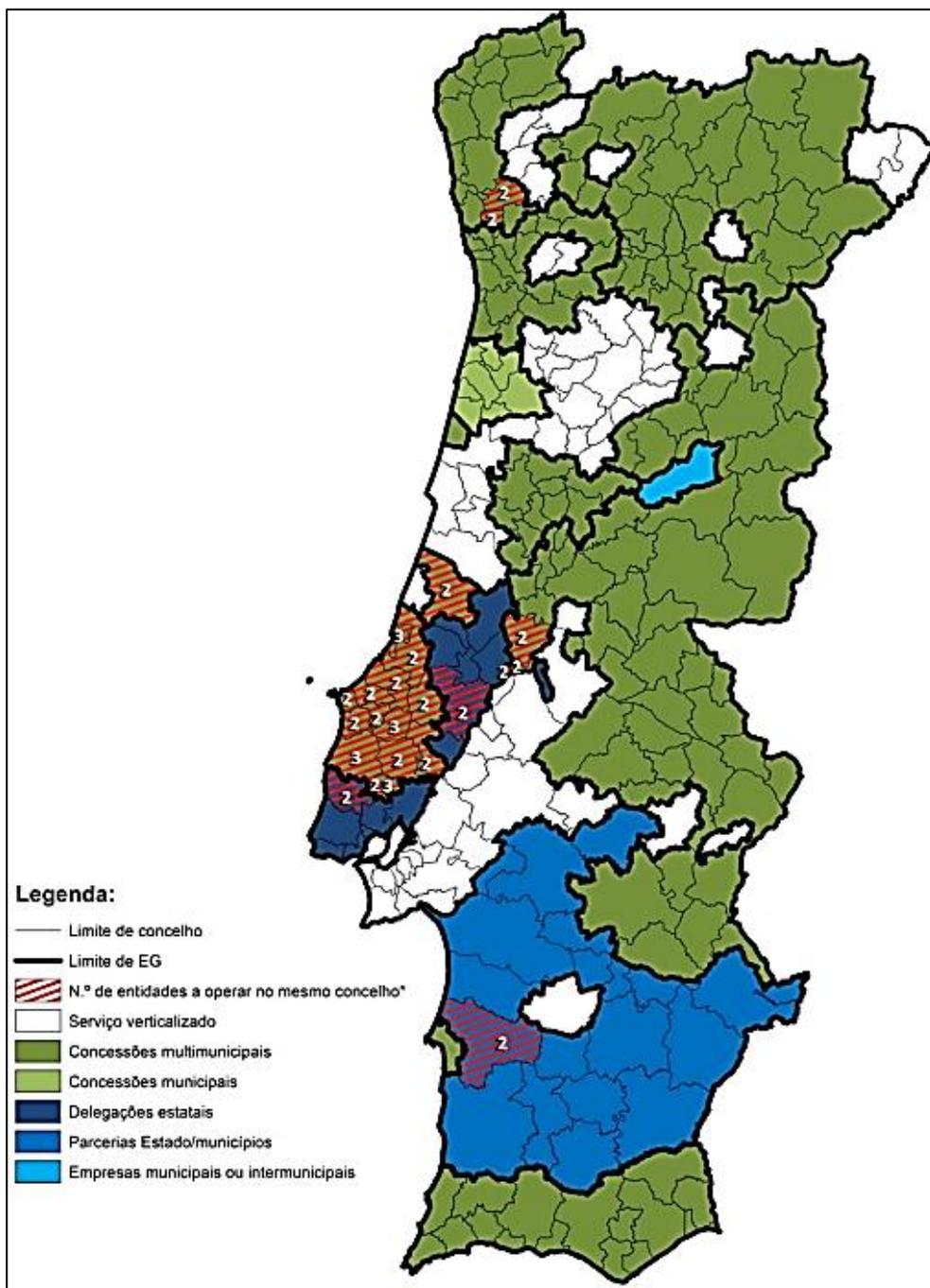


Figura 2.1: Distribuição geográfica das entidades gestoras de serviços de abastecimento de água em alta, em Portugal Continental (ERSAR, 2023)

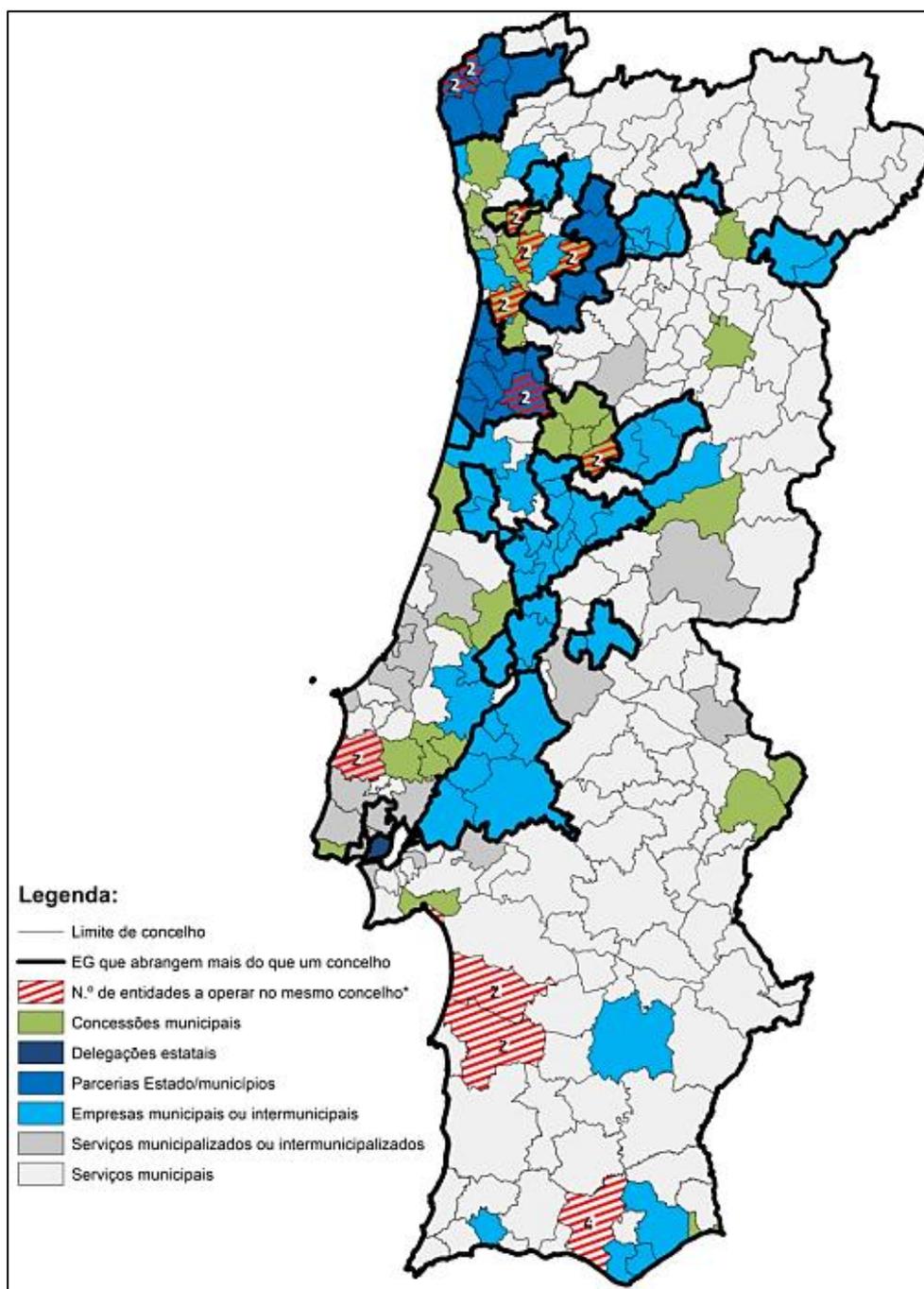


Figura 2.2: Distribuição geográfica das entidades gestoras de serviços de abastecimento de água em baixa, em Portugal Continental (ERSAR, 2023)

### 2.1.1. Componentes dos SAA

No que respeita a origens de água, Portugal Continental apresenta uma disponibilidade média de água suficiente para suprir as necessidades para os diferentes usos. Face às assimetrias regionais e temporais de disponibilidade de água, foi necessário criar reservas de água para ultrapassar os períodos de escassez, razão pela qual o abastecimento com origem

superficial garante cerca de 70% do volume de água que entra nos SAA, dada a sua fiabilidade. No entanto, as origens superficiais exigem um tratamento mais complexo, contrariamente às captações de água subterrânea que, na sua generalidade, necessitam apenas de um tratamento de desinfeção e estão normalmente associados a sistemas de pequena e média dimensão (ERSAR, 2023).

De acordo com o Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos (RASAR) de 2022, em Portugal as entidades gestoras do serviço de abastecimento de água reportaram um total de 6079 captações de água subterrânea e de 251 captações de água superficial.

Atualmente, a qualidade da água para consumo humano atinge níveis de excelência, devido ao investimento nas Estações de Tratamento de Água (ETA) por parte das entidades gestoras, que podem incluir operações e processos de pré-oxidação, correção de pH, coagulação/floculação, doseamento de carvão ativado, decantação, filtração e desinfeção. Em termos quantitativos, existem 3459 instalações de tratamento, das quais 223 são Estações de Tratamento de Água e 3236 são instalações que efetuam apenas operações de desinfeção e/ou correção de pH/agressividade da água (ERSAR, 2023).

Após o tratamento, quer na adução quer na distribuição, a água é transportada, em geral, em infraestruturas subterrâneas com um reduzido número de elementos sob controlo físico. O transporte de água é efetuado em condutas sob pressão por gravidade ou por elevação através de estações elevatórias. Para dar continuidade às condutas estas dispõem de inúmeros dispositivos designados por elementos acessórios, incluindo, válvulas, juntas de ligação, curvas, tês, etc. Os elementos que permitem condicionar o escoamento de água nas condutas, e que carecem de minuciosa análise hidráulica, seja por diminuição ou aumento de pressão ou regulação de caudal, incluem os reservatórios, as estações elevatórias de água, as sobressoras, as válvulas de controlo de pressão e caudal, as válvulas de retenção e as válvulas de seccionamento (Marques & Sousa, 2011).

As condutas para pequenos e médios diâmetros são, na sua generalidade, de fibrocimento, fibra de vidro, Policloreto de Vinilo, Ferro Fundido ou Polietileno de alta, média e baixa densidade. Para condutas adutoras de diâmetro superior a 500 mm e pressão de serviço até 200 metros coluna de água (m c.a) poder-se-ão utilizar condutas em betão pré-esforçado. Para condições muito especiais, nomeadamente de elevadas pressões, são utilizadas condutas em aço, uma vez que têm maior resistência mecânica, apesar do seu elevado custo (Marques & Sousa, 2011). Em Portugal, estão registados 116733 km de condutas, dos quais 10388 km pertencem às entidades gestoras em alta, e um total de 2518 estações elevatórias, das quais 1859 são geridas por entidades gestoras em baixa (ERSAR, 2023).

Os reservatórios de um SAA são uma componente fundamental, pois garantem o armazenamento de água de uma forma segura, flexível e eficiente. Quanto à sua implantação, os reservatórios podem ser classificados como enterrados, semienterrados, elevados e apoiados e, quanto à sua função podem ser (Decreto Regulamentar nº 23/95, 1995; Marques & Sousa, 2011; Monteiro et al., 2021):

- Reservatórios de distribuição: Têm como principal função o armazenamento de água abastecendo diretamente as redes de distribuição. Também podem ter como finalidade a regularização de bombagem de água, armazenamento do excedente de água, quando o caudal de consumo for inferior ao de adução e garantir nas horas de ponta o abastecimento os caudais máximos consumo, e estabilizar as pressões na rede de distribuição. Estes devem garantir um volume de água de reserva destinada à ocorrência de possíveis interrupções na adução, tais como, falha de energia, roturas e avarias a montante, e combate a incêndios;
- Reservatórios de regularização de transporte (ou intermédios): Têm como objetivo servir de “volantes de regularização” aos diferentes regimes de funcionamento, ou de regularização de transições entre condutas elevatórias e gravíticas, entre estações de tratamento de água ou troços adutores.

De acordo com a informação disponível, relativa a 2021, em Portugal Continental, a capacidade de reserva de água tratada é de aproximadamente 5,3 milhões de metros cúbicos distribuídos por 9030 reservatórios de água, o que equivale globalmente, a 1,4 dias de água de reserva. Esta reserva permite o abastecimento de água à população durante igual período em caso de anomalias, como as anteriormente referidas (ERSAR, 2023). Na sua generalidade, os pontos de entrega são os locais de fronteira entre o serviço em alta e o serviço em baixa e constituem um local físico onde é efetuada a entrega de água para consumo humano (Regulamento de Relações Comerciais dos Serviços de Águas e Resíduos, 2018). Como mencionado anteriormente, as redes de distribuição asseguram o transporte de água entre os reservatórios até aos utilizadores finais e, quanto ao traçado em planta, podem classificar-se em redes ramificadas, redes malhadas ou redes mistas, de acordo com a Figura 2.3.

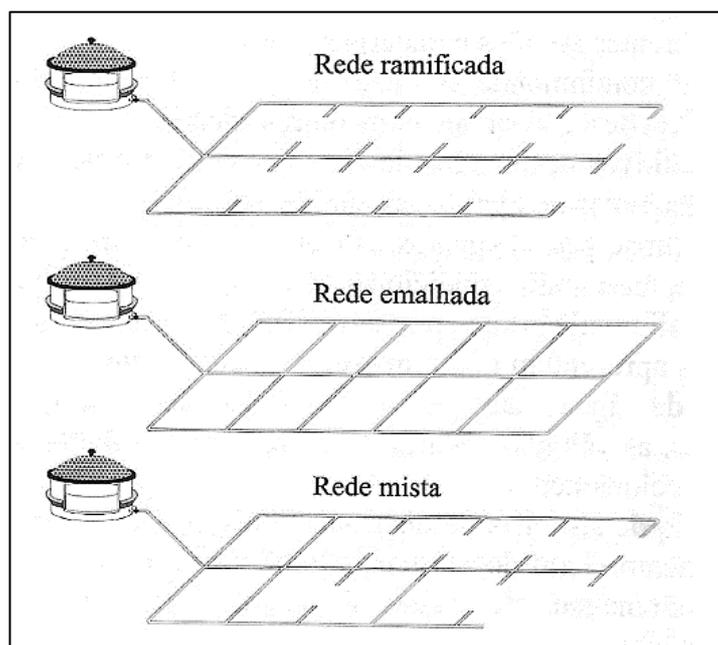


Figura 2.3: Representação esquemática dos diferentes tipos de redes (Marques & Sousa, 2011)

Em geral, as redes de abastecimento em alta são concebidas como redes ramificadas e as redes de abastecimento em baixa como redes mistas.

Um dos principais indicadores que permite caracterizar a eficiência e o desempenho de um sistema de abastecimento é o que se refere às perdas de água. Estas têm origem na captação, na adução de água bruta e tratada, no tratamento, no armazenamento e na distribuição, e são quantificadas através do cálculo da diferença entre o volume de água que entra no sistema de abastecimento e o consumo autorizado (Alegre et al., 2005).

A quantificação do volume de água perdido nos SAA é também um indicador que avalia o desempenho de uma entidade gestora que, normalmente, efetua os respetivos balanços hídricos. O balanço hídrico realizado de acordo com o preconizado pela Associação Internacional da Água (IWA) é atualmente o método mais utilizado para a análise de todos os componentes de um SAA, recomendando-se que o cálculo do balanço hídrico tenha como base um período de 12 meses, para que sejam minimizados os inevitáveis desfasamentos entre os intervalos de leituras dos medidores de caudal (Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas [APDA], 2014; Alegre et al., 2005) .

A Figura 2.4 apresenta um esquema simplificado de um sistema de abastecimento de água, em alta e em baixa, e os elementos físicos de ligação e de medição de volumes de água.

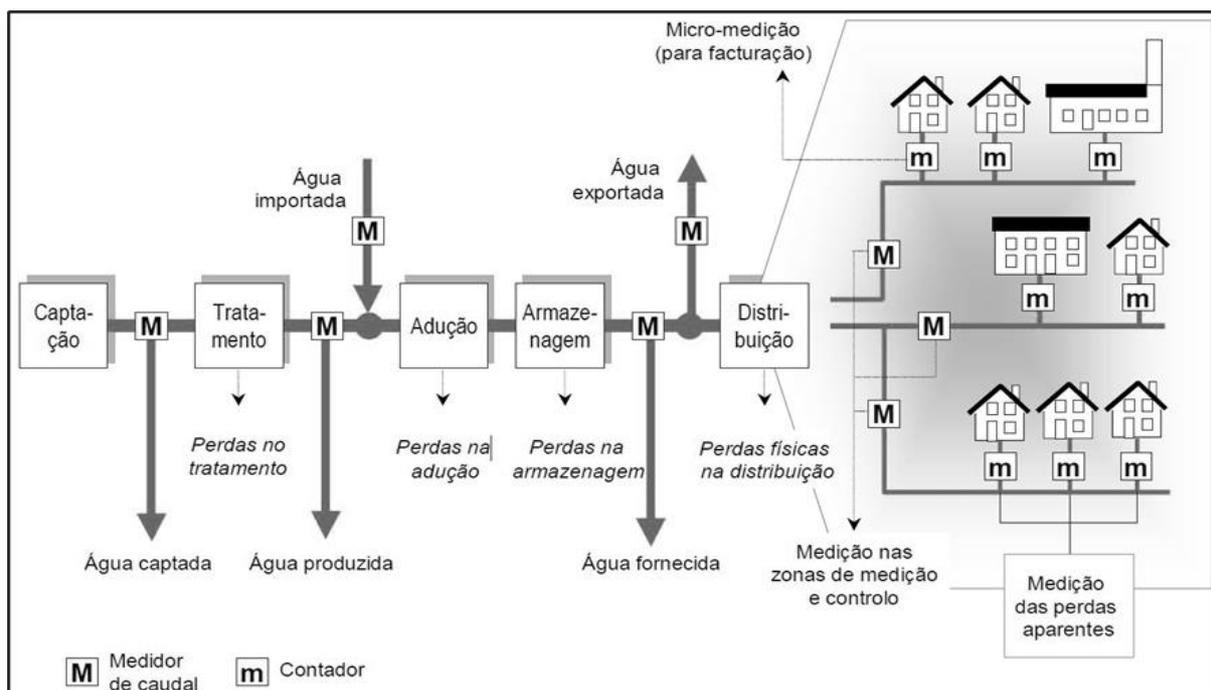


Figura 2.4: Principais elementos dos sistemas de abastecimento de água, com os componentes do balanço hídrico e localização dos pontos de medição de caudal (Alegre et al., 2005)

## 2.1.2. Operação e otimização dos SAA

Existe uma grande pressão sobre as entidades gestoras por forma a que estas garantam que o abastecimento de água é contínuo, em quantidade e com a qualidade exigida, sendo necessário um elevado nível de flexibilidade e adaptabilidade dos SAA (Mala-Jetmarova et al., 2017).

Para os diversos componentes dos sistemas de abastecimento de água, nomeadamente captação, tratamento, transporte, armazenamento e distribuição, o planeamento, gestão e execução das tarefas inerentes à operação dos SAA conta, normalmente, com a participação de diversos profissionais e especialistas pertencentes às entidades gestoras. Estes recebem os dados de monitorização, analisam, preveem as necessidades e ações futuras para que o fornecimento de água não seja comprometido (Obradović D. & Lonsdale P, 1998). Estes autores basearam-se na escala temporal para classificar e definir as atividades, planeamento e gestão operacional nos SAA em três níveis distintos, designadamente curto, médio e longo prazo:

- Curto prazo: resume-se à definição das ações e tarefas operacionais que serão adotadas nas próximas horas ou nos próximos dias, considerando as previsões e as variações instantâneas de consumo, qualidade ou pressão dos sistemas, e a análise é realizada com base nos dados fornecidos em tempo real e os procedimentos

operacionais devem possibilitar a ação imediata. Os recursos humanos operacionais devem ter a capacidade de reagir aos eventos de falhas e anomalias no sistema de abastecimento;

- Médio prazo: consiste na análise dos sistemas em operação, procurando a definição de melhorias ou alterações operacionais e económicas. Como envolve principalmente a análise das capacidades dos equipamentos e infraestruturas existentes propõe, geralmente, alterações que podem contemplar algumas beneficiações e adaptações. As suas análises são essencialmente realizadas com base em padrões e custos médios de operação e podem definir regras operacionais de nível estratégico;
- Longo prazo: é a atividade sustentada na definição de novos sistemas de abastecimento e de ações que envolvem obras de engenharia consideráveis, desenvolvem indicadores de eficiência operacional e financeira e gerem clientes e custos. Os dados são, normalmente, oriundos de planos diretores e estratégicos e têm como referência os horizontes finais de projeto. As suas análises definem critérios, regras e planos.

Conforme se pode observar na Figura 2.5, adaptada de Obradović D. & Lonsdale P, (1998), a administração/gestão de topo das entidades gestoras de SAA mantêm o controlo geral, mas permitem que certas tarefas fiquem a cargo dos operacionais locais, com base nos procedimentos definidos.

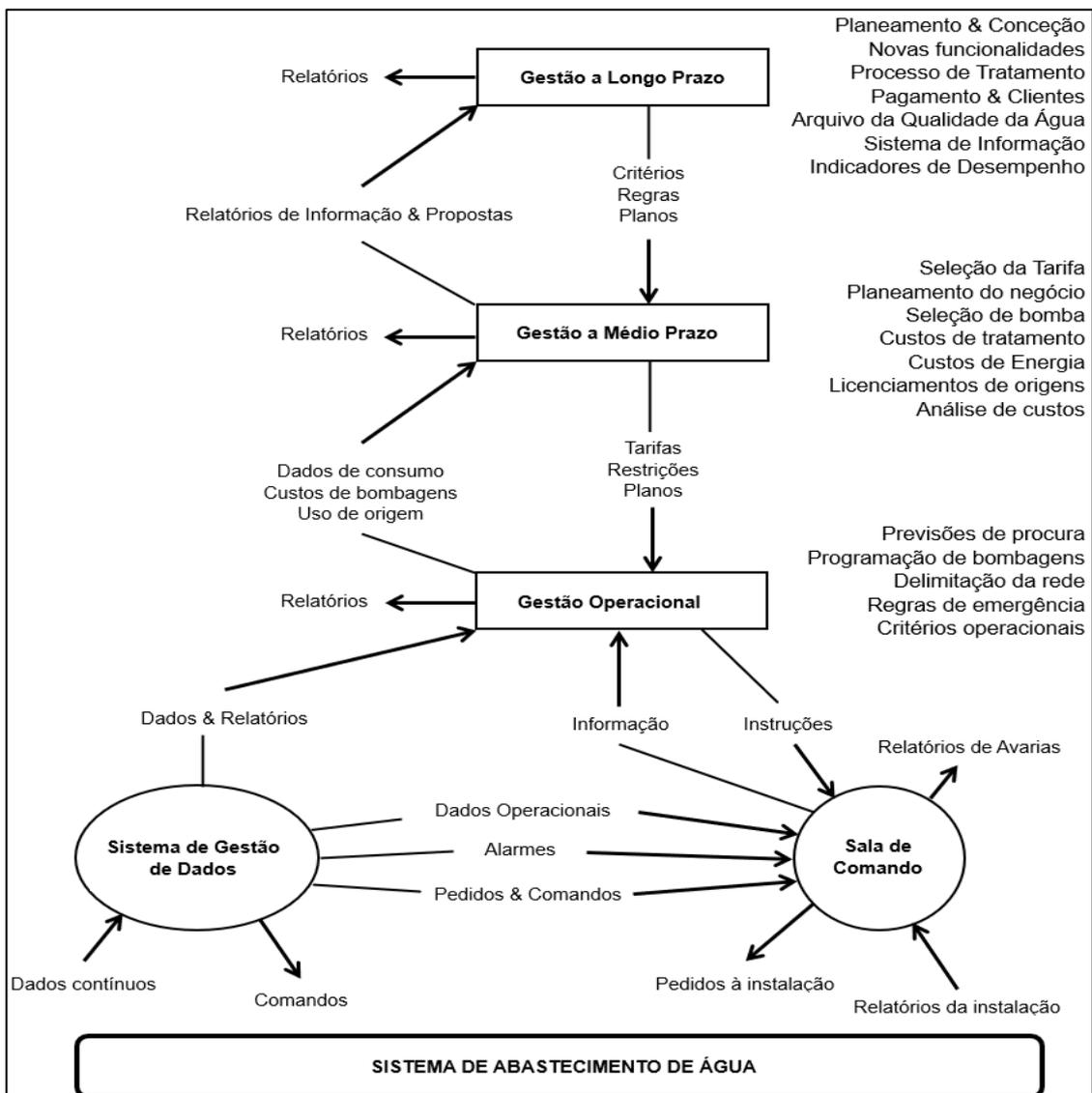


Figura 2.5: Atividades, planeamento e gestão operacional dos SAA (Adaptada de Obradović D. & Lonsdale P, 1998)

Através do recurso à modelação matemática e com a introdução de novas tecnologias, é possível o acesso a informações de controlo e funcionamento para todos, quase em tempo real. A eficácia desta gestão operacional está intrinsecamente ligada à forma de controlo do sistema de abastecimento, dependendo da estrutura de transmissão de dados e do nível de automação implantado (Obradović D. & Lonsdale P, 1998).

As características e componentes dos sistemas de abastecimento de água permitem inúmeras combinações de funcionamento, o que gera várias possibilidades de acionamentos e funcionamento de bombas e de válvulas do controlo e níveis de reservatórios, visando as diversas formas de fornecimento de água à população. Face à complexidade dos sistemas de distribuição de água, colocam-se dificuldades na análise operacional fundamental por

forma a procurar alcançar um equilíbrio entre a redução dos custos de eletricidade e a manutenção a níveis aceitáveis de eficiência. Deste modo a utilização de modelos hidráulicos versáteis, que se adaptam facilmente a diversas situações, são essenciais (Menegotto & Righetto, 2016).

Desde a década de 1970 que se realizam inúmeros estudos que abordam a operação e otimização de sistemas de abastecimento de água. Uma revisão bibliográfica de Mala-Jetmarova et al. (2017) sobre estudos e investigação de métodos de otimização de um SAA com foco na operação de sistemas de bombagem, controlo de rede de abastecimento e qualidade da água para consumo humano, concluí que, tendencialmente, a operação e otimização de sistemas de bombagem tem uma abordagem significativa para as entidades gestoras, devido aos custos de consumo de energia associados. Os mesmos autores referem que os estudos de otimização de sistemas de abastecimento de água têm de ter como base quatro conceitos, que se resumem na figura seguinte.

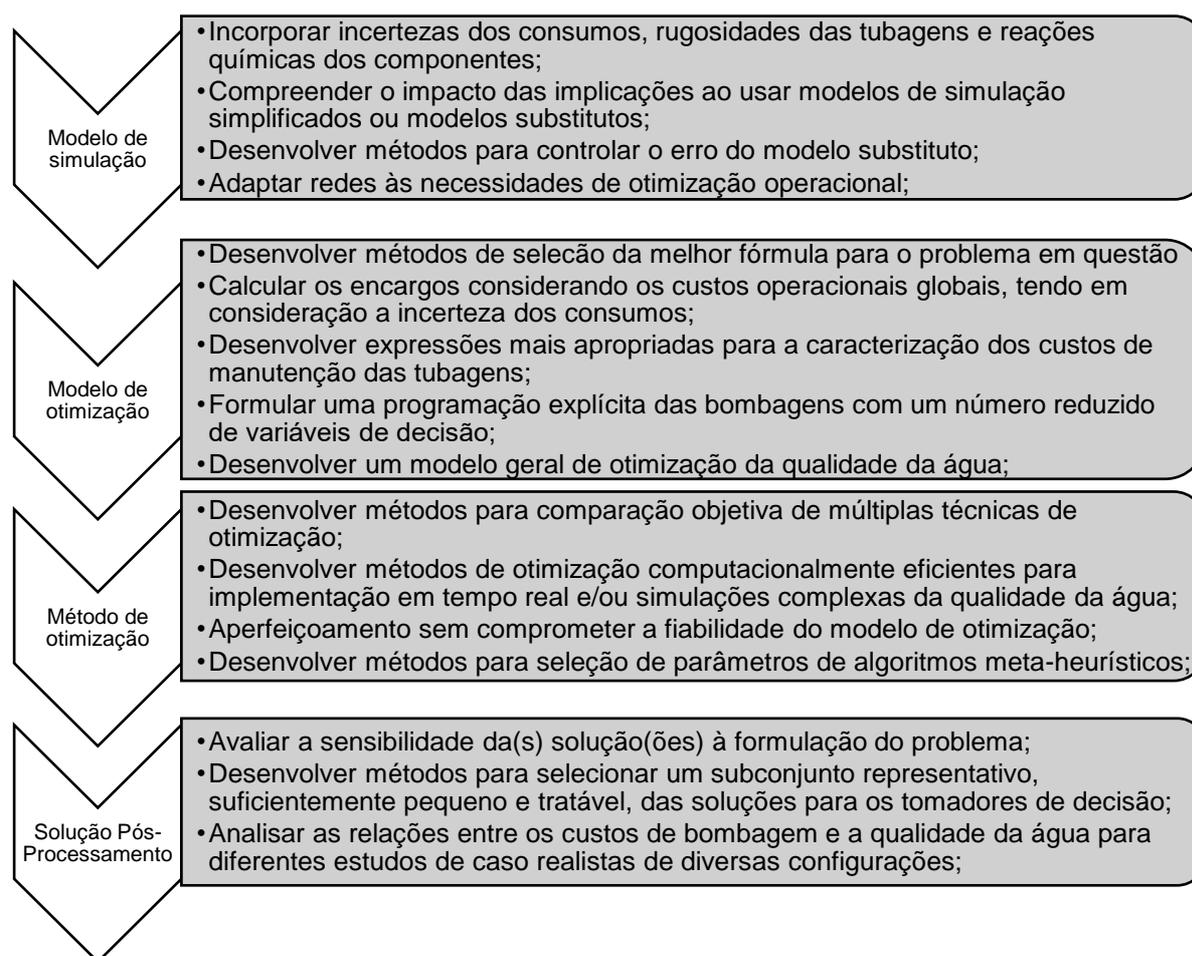


Figura 2.6: Desafios futuros para os estudos de otimização de sistemas de abastecimento de água (Adaptado de Mala-Jetmarova et al., 2017)

## 2.2 Modelação hidráulica em SAA

O recurso à modelação hidráulica de SAA constitui uma ferramenta que permite simular matematicamente o comportamento daqueles sistemas (Walski et al., 2001). De facto, a modelação permite, com uma margem de erro reduzida, prever e analisar o comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento bem como da qualidade da água, a partir das suas características físicas, dos consumos e da forma como é operado. Os modelos têm múltiplas aplicações nos domínios do planeamento, projeto, operação, manutenção, reabilitação e diagnóstico de sistemas adutores e de distribuição (Coelho et al., 2006, 2007).

Para a utilização das capacidades e a interpretação dos resultados obtidos resultantes da simulação de sistemas de distribuição da água é necessário compreender os fundamentos dos princípios físicos envolvidos, nomeadamente as leis da conservação de massa, energia e de resistência ao escoamento em regime permanente e uniforme. De facto, quando ocorre escoamento no interior de uma conduta ocorrem perdas de energia, denominadas por perdas de carga, que incluem (Marques & Sousa, 2011; Walski et al., 2001):

- Perdas de carga contínuas: por fricção ao longo das paredes das condutas;
- Perdas de carga localizadas: por turbulência e alterações bruscas das condições dos escoamentos uniformes, através de acessórios (curvas, tês, reduções, etc.) e dispositivos de controlo de escoamento (válvulas, bombas, etc.).

Desde o início do século XX que estão disponíveis diversas formulações matemáticas que, apesar de empíricas e de aplicação restrita, permitem estimar o coeficiente de resistência e, conseqüentemente, as perdas de carga contínuas e localizadas. Com o desenvolvimento dos meios informáticos deixou de se justificar o recurso a fórmulas empíricas, exceto em situações particulares em que é necessário efetuar cálculos manuais (Marques & Sousa, 2011).

Lansey (2006) apresenta cronogramas com a evolução na aplicação de métodos de otimização dos sistemas de distribuição de água, bem como o relacionamento dos tipos de problemas que promoveram as mudanças, os avanços ao longo das décadas e os autores que promoveram as alterações significativas, conforme se pode observar na Figura 2.7 e Figura 2.8.

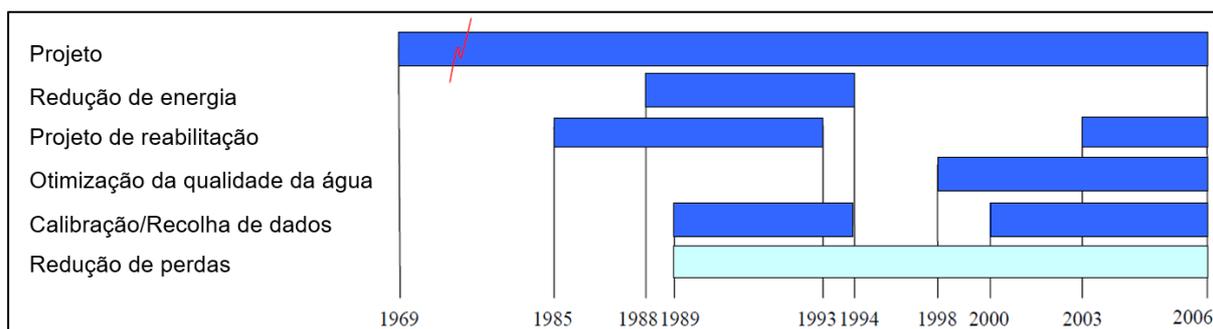


Figura 2.7: Períodos aproximados de concentração de pesquisas relativas à simulação de SAA, com base em publicações científicas (Lansey, 2006)

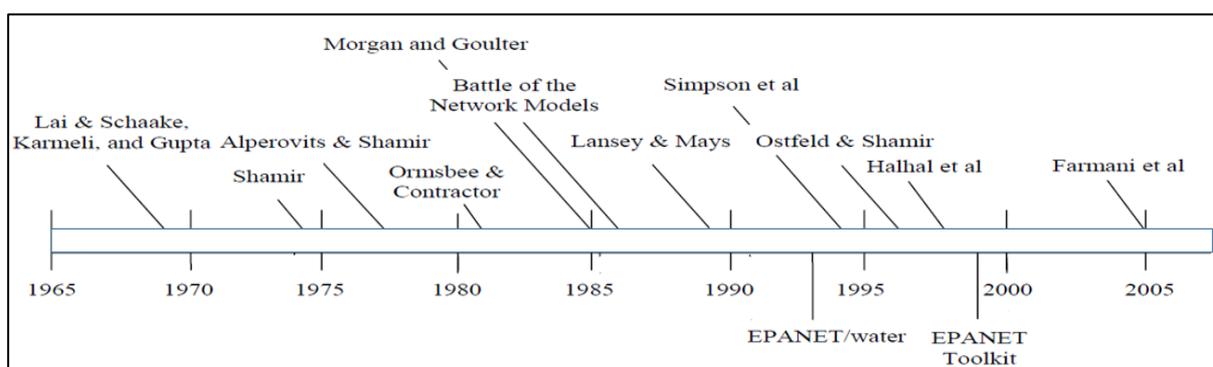


Figura 2.8: Cronograma dos autores que promoveram alterações significativas nos métodos de simulação de SAA (Lansey, 2006)

Atualmente, os modelos de simulação permitem uma análise de sensibilidade rápida e eficiente e uma simulação suficientemente exata de um vasto número de cenários, sem perturbar o sistema e sem introduzir modos de funcionamento desconhecidos. Os modelos de simulação são a ferramenta computacional mais utilizada e comprovada para conceber e diagnosticar o desempenho dos sistemas de transporte e distribuição de água e são um complemento importante na análise. As simulações do comportamento do sistema permitem prever as respostas a um vasto conjunto de condições operacionais e ambientais, permitindo igualmente antecipar problemas e avaliar decisões antes do investimento (Olaia, 2012).

Anteriormente aos programas de modelação e simulação hidráulica, os engenheiros concebiam e geriam os sistemas de abastecimento através de cálculo manual ou através da experiência prática, sendo recorrente o recurso a ábacos e expressões e cálculos simplificados. Ao longo do tempo, com a evolução informática, surgiram os primeiros programas de modelação e simulação hidráulica para estudos de sistemas de abastecimento e distribuição de água, construídos através do recurso a métodos numéricos de resolução de sistemas de equações, sendo estes mais antigos que os computadores (Olaia, 2012). No entanto, devido à complexidade e à inércia computacional inerente, estes modelos só se

tornaram ferramentas viáveis e úteis para modelar eficientemente sistemas em uma grande variedade de ambientes quando são utilizados computadores.

Os resultados do modelo são apresentados em condições de variáveis de estado e aproximam-se do funcionamento do sistema real, possibilitando a observação das condições atuais, previstas ou cenários tipificados (Coelho et al., 2007). Por outro lado, os modelos de qualidade da água complementam os modelos hidráulicos com equações que descrevem o transporte, a mistura e as alterações de concentração dos solutos na água (Coelho et al., 2006).

Genericamente, os modelos são constituídos pelos seguintes elementos (Coelho et al., 2006):

- Um conjunto de dados que descrevem as particularidades físicas do sistema, a procura, designadamente o consumo de água, e as condições de funcionamento;
- Um conjunto de equações matemáticas (geralmente não lineares) que representam o comportamento hidráulico de cada componente e do sistema como um todo, expressas em termos de variáveis de estado básicas, como o caudal nas condutas ou a pressão nos pontos críticos, e contidas nos dados que definem acima;
- Os algoritmos numéricos necessários para solucionar as referidas equações matemáticas.

Os dados de entrada são fundamentais para o sucesso do modelo, sendo necessário procurar garantir a maior precisão possível na caracterização e descrição física e condições de funcionamento do modelo. A informação recolhida para a caracterização do modelo, inclui (Vilas-Boas, 2008):

- Parâmetros do modelo: representam as características constantes e incluem dados como o comprimento, diâmetro, rugosidades das condutas e cotas dos nós;
- Variáveis de controlo: representam as variáveis que apresentam alterações ao longo do tempo, como por exemplo os consumos dos nós, que variam consoante o cenário de análise.

A qualidade dos parâmetros inseridos inicialmente depende largamente da qualidade da informação recolhida. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foram concebidos para registar e armazenar todas as informações descritivas disponíveis sobre cada elemento do sistema, sem analisar o desempenho da rede. Deste modo, um SIG pode armazenar a maior parte das informações necessárias para a modelação e pode ser transferido para um programa de modelação (Coelho et al., 2006).

O programa de modelação pode, em complemento à descrição física do sistema, descrever em pormenor o seu funcionamento, incluindo a procura, quantidade de água utilizada ou consumida, e as condições criadas pela ligação a albufeiras vizinhas e a outros sistemas de abastecimento. Com base nesta informação, o programa de modelação pode calcular o equilíbrio hidráulico do sistema e apresentar os valores das variáveis de estado, numérica e graficamente, tais como (Coelho et al., 2007):

- Pressão e altura manométrica em cada ponto da rede, incluindo o nível de água no reservatório;
- Caudal e perdas de carga nas tubagens, válvulas e bombas;
- Estado e regulação de válvulas e bombas.

A modelação pode incluir a modelação em estado fixo, a chamada modelação estática, que corresponde a uma única imagem do sistema, e a modelação a longo prazo, que é baseada no tempo, designada por modelação dinâmica. Esta pode ser comparada a um filme constituído por várias imagens separadas, isto é, uma sequência de simulações estáticas em que as condições de fronteira se alteram entre dois períodos sucessivos (Moura, 2006).

No que respeita à metodologia e planeamento da construção do modelo, existem várias fases a definir para que não se comprometa a correta evolução do processo sendo, deste modo, necessário adotar uma abordagem cuidada e sistemática (Gameiro, 2014). Coelho et al. (2006) resume o faseamento adequado ao desenvolvimento de um modelo, de modo a permitir o melhor aproveitamento possível do modelo considerando os principais objetivos das diferentes fases envolvidas:

#### **Fase A – Planeamento do desenvolvimento do modelo**

- Definição do sistema a estudar, do âmbito e dos objetivos da modelação;
- Levantamento de dados de cadastro e projetos;
- Definição das convenções e opções básicas a adotar na modelação;

#### **Fase B – Construção do modelo – descrição da infraestrutura física**

- Recolha de elementos necessários para a descrição física do sistema – cadastro das redes, de reservatórios, de instalações elevatórias, de válvulas utilizadas para operação e outros elementos físicos;
- Estruturação dos dados físicos e criação do modelo;

#### **Fase C – Construção do modelo – Descrição de consumos e caudais**

- Recolha e formatação de dados de medição de caudal/consumo na rede;

- Análise estatística de dados de caudal, produção de padrões de consumo ou utilização de padrões empíricos e criação de cenários;
- Recolha de elementos relativos à distribuição espacial de consumos na rede;
- Estimativa e afetação de consumos nos nós da rede;
- Processamento dos dados para introdução no modelo;

#### **Fase D – Construção do modelo – Controlo operacional**

- Levantamento dos procedimentos e regras de operação do sistema de abastecimento, nomeadamente: níveis de operação de reservatórios, regulações de válvulas e bombas, e modos de operação do sistema;
- Refinamento da tipificação de cenários, baseado na nova informação recolhida;
- Processamento dos dados para carregamento no modelo;

#### **Fase E – Implementação da solução-base**

- Compilação dos ficheiros completos correspondentes aos cenários modelados, e estabelecimento da respetiva solução-base proveniente da modelação;
- Eliminação dos erros detetáveis e afinação de opções de modelação;
- Exploração das capacidades de simulação oferecidas;

#### **Fase F – Calibração do modelo**

- Identificação das necessidades de calibração e realização de campanhas de medição de rede (caudais e pressões) e de ensaios de perda de carga;
- Calibração iterativa do modelo por comparação com os resultados de campo;

#### **Fase G – Exploração do modelo e planeamento de gestão futura**

- Estabelecimento do modelo em ambiente de utilização final;
- Estabelecimento de procedimentos de utilização do modelo;
- Desenvolvimento continuado do modelo.

Em termos das utilizações dos modelos, Coelho et al. (2007) destacam as mais comuns:

- Dimensionamento dos sistemas, através da escolha dos melhores elementos associados, tais como escolha das melhores topologias, materiais e diâmetros e restantes componentes, e do dimensionamento de reservatórios e instalações elevatórias;

- Apoio à elaboração de planos de desenvolvimento estratégico, com recurso à simulação de grandes opções, com projeções no tempo implicando consumos;
- Simulação de cenários e problemas de operação, tais como situações de emergência de falha de grupos elevatórios, combate a incêndios, gestão dos níveis em sistemas com múltiplos reservatórios em serviço ou consumos de ponta sazonal excessivos;
- Treino de operadores em sistemas de operação complexa, evitando riscos diretos para o sistema e para os consumidores;
- Otimização e controlo de parâmetros de qualidade da água, tais como escolha do local de equipamentos de recloração, manutenção do residual de cloro, os tempos de percurso e escolha de pontos de amostragem;
- A reabilitação de sistemas problemáticos e a programação de intervenções com menor impacto para o consumidor;
- Eficiência e otimização energética dos grupos elevatórios e no controlo de perdas de água.

### **2.2.1. Seleção do programa de simulação hidráulica**

Encontram-se disponíveis no mercado uma ampla variedade de programas de modelação de sistemas de abastecimento de água. A generalidade dos programas de simulação hidráulica contêm capacidades adequadas e bastante semelhantes em termos de cálculo hidráulico e de qualidade da água. A escolha do programa para simulação de um sistema de abastecimento de água deve ter em conta, prioritariamente, o fim a que se destina, o que determina o tipo de análise a efetuar, nomeadamente uma simulação estática, dinâmica ou de qualidade.

Encontram-se disponíveis vários modelos para trabalhos de modelação e simulação hidráulica e de qualidade da água. Os modelos Hidrocad, Watercad, EPANET 2.0, Strumap e Synergee Water são os mais utilizados para modelação e simulação hidráulica. Na tabela seguinte resume-se uma síntese das principais características dos modelos referenciados por Chaveiro (2018):

Tabela 2.1: Comparação de modelos de programas para simulação hidráulica (Chaveiro, 2018)

Modelos	Análises hidráulicas	Análise de qualidade	Gestão de dados			Gratuidade
			Entradas	Saídas	Interface	
Hidrocad	Análise estática; Método iterativo Newton/Rapson; Modelação de rede de incêndio e de emergência.	-	Com ou sem CAD; Numera automaticamente nós e troços; Padrões de consumos variados	Tabular; Ligações ao Word, Excel e Autocad	Importa e exporta dados em dxf e txt	Não
Watercad	Análise estática e dinâmica; Perdas de carga de DarcyWeisbach, HazenWilliams e ManningStrickler; Resolução: método gradiente; Modelação da rede de emergência e de incêndio	Determina idade da água; Determinação do percurso da água; Resolução: MDVE; Cinética de reações no seio da água e nas paredes das condutas	Autocad; Numera automaticamente nós, troços, bombas e reservatórios; Padrões de consumo variados; Regras de controlo de bombas e válvulas; Curva de bombas; Modelo de teste de dados	Tabular ou gráfica; Saída para fax, plotter ou impressora; Calibração de consumos e rugosidade; Ligação ao Word, Excel, Access, Autocad e ArcView (SIG)	Click-dragdropmove"; Interface gráfica para Windows 95, 98, 2000, NT, Autocad; Função de mapa;"Query"; Guias "pop-up"; Interativo para várias operações	Não
Epanet	Análise estática e dinâmica; Perdas de carga: Darcy – Weisbach, Hazen -Williams e Manning -Strickler; Resolução: método gradiente; Modelação de bombas com velocidade constante e variável; Modelação de reservatório de qualquer forma; Modelação de vários tipos de válvulas	Várias origens; Determinação da idade da água; Identificação do percurso da água Resolução: métodos comandados pelo tempo; Cinética das reações no seio da água e parede da tubagem	Com ou sem autocad; Padrões de consumo variados; Regras de controlo de bombas e válvulas; Curvas de bombas; Modelo de teste de dados	Tabular ou gráfica; Calibração de consumos e rugosidade; Ligações ao Word, Excel, Access, Autocad, Arcview (SIG); Permite personalizar relatórios e filtrar resultados	Sistema: "point. click dagdrop move" Função de mapa query; Guias "popup", "wizard" e tutoriais interativos para várias operações; Visão animada no tempo	Sim
Strumap	Análise estática e dinâmica; Análise de fugas; Relatório de desempenho configurável; Balanço Hídrico	Várias origens; Determinação da idade da água; Determinação de percurso da água	Gráficos, mapas, linhas e dados de lógica; Integra informação georreferenciada; Capacidade de manipular grandes conjuntos de dado a partir de muitas fontes	Tabular, gráficos ou gráfica; Permite personalizar relatórios e filtrar resultados	Base de dados: Oracle 9i; Visual Basic; SIG; Importa e exporta: Excel e modelos em rede	Não
Synergee water	Análise estática e dinâmica; Perdas de carga: Darcy – Weisbach, HazenWilliams e ManningStrickler;; Módulo de delimitação de zonas	Várias origens; Determinação da idade da água; Determinação de percurso da água; Determinação da concentração de 2 substâncias em simultâneo	Padrões de consumo variados; Regras de controlo de bombas e válvulas; Curvas de bombas; Módulo de gestão de clientes; Extração de subsistemas	Tabular ou gráfica; Permite várias vistas simultâneas; Módulo Geo Background para imagens raster ou vetoriais; Filtração dos resultados	Sistema: "point -klik-dragdrop move"; Importa ou exporta dados do ACCESS e gráficos: DXF, DGN, MIF, SHP, TIF, BMP; Pode permutar dados com SCADA	Não

O modelo de simulação hidráulica selecionado para aplicação no caso de estudo foi o **EPANET 2.0**, uma vez que é uma das aplicações informáticas mais utilizadas por toda a comunidade técnica e científica na modelação hidráulica de sistemas de abastecimento, sendo capaz de executar simulações estáticas ou dinâmicas e avaliar a qualidade da água (Silva, 2008). As maiores vantagens desta seleção são:

- O programa adapta-se às necessidades atuais de simulação de sistemas e foi traduzido para português;
- É fidedigno, está bem documentado e dispõe de importantes recursos de aconselhamento e utilização;
- É gratuito e a sua utilização não é restrita;
- A capacidade de simular a qualidade da água em rede através de algoritmos publicados;
- Os modelos criados com este programa podem ser facilmente transferidos para outros.

### **2.2.2.EPANET 2.0**

O EPANET versão 2.0 é um programa de simulação de abastecimento de água potável concebido pela U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), dos Estados Unidos, e está disponível gratuitamente juntamente com um conjunto de documentos de apoio, tendo sido traduzido e adaptado para a língua portuguesa pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Consiste num modelo de simulação hidráulica de uma rede de água que fornece valores de pressão pontual, níveis de reservatório, custos de energia de bombagem e parâmetros de qualidade da água para toda a rede num determinado período (Rossman, 2004).

Por ser um programa de acesso público, este modelo tem sido amplamente utilizado e suportado em artigos científicos e é um dos modelos de simulação hidráulica mais utilizado em muitos países, nomeadamente em Portugal (Castro, 2022). Atualmente, o EPANET 2.0 é um dos programas de investigação mais fidedigno e pode fornecer resultados em diferentes situações, incluindo modelação hidráulica estática ou dinâmica e avaliação da qualidade da água em redes pressurizadas, permitindo projetar e gerir adequadamente as redes de abastecimento (Rossman, 2004). Por outro lado, não tem capacidade de modelação hidráulica para sistemas de abastecimento intermitentes, isto é, que não garantem o fornecimento de água todos os dias ou 24 horas por dia (Sarisen et al., 2022).

Uma rede é constituída por condutas, ramais (ligações), bombas, válvulas e reservatórios de armazenamento de água e, durante a simulação, este programa permite estimar o caudal de água em cada conduta, a pressão em cada ligação, o nível de água em cada reservatório. No que respeita à qualidade da água, pode ser simulado o decaimento de alguns produtos químicos, a idade da água e a previsão de potenciais problemas de degradação da qualidade da água (Coelho et al., 2006).

Por outro lado, fornece um ambiente computacional integrado para o processamento de dados da rede do projeto hidráulico e a simulação da qualidade da água, e oferece as seguintes ferramentas computacionais de apoio à simulação (Rossman, 2004):

- As equações de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Chase-Manning podem ser utilizadas para calcular as perdas de carga;
- Considera as perdas de carga singulares de curvas, alargamentos, estreitamentos, etc;
- Pode ser considerada um elevado número de elementos e componentes na rede em análise;

- Modelação básica de diversos modelos de válvulas, tais como: válvulas de seccionamento, válvulas de retenção, válvulas de reguladores de pressão e de caudal;
- Modelação de bombas de velocidade constante e variável;
- Cálculo da energia e respetivos custos nas bombagens;
- Utilização de diferentes valores de consumo e padrões variáveis ao longo do tempo nos nós ou pontos da rede;
- Para os reservatórios de armazenamento de nível variável de configuração geométrica diferentes são utilizadas curvas de volume em função do nível de água existente no reservatório;
- Determinação das condições de funcionamento do sistema através do controlo de apenas uma ou mais condições;
- Possibilidade de modelação da qualidade da água, como por exemplo as reações de degradação do cloro que flui através das condutas e reservatórios.

Pelo facto de trabalhar num ambiente Windows integrado, é possível a apresentação dos resultados em vários formatos. Os resultados são apresentados conforme se segue (Coelho et al., 2006):

- Visualização do mapa da rede a cores;
- Apresentação de tabelas de dados;
- Séries temporais e gráficos personalizados;
- Perfis da rede de condutas.

Os componentes físicos da infraestrutura a ter em conta na definição do modelo são as condutas, as válvulas, as bombas, os nós e os reservatórios. Para desenvolver um primeiro esboço de um modelo adequado, é necessário dispor de todos os dados de base sobre os elementos físicos do sistema. A obtenção dos dados de base e o desenvolvimento de um modelo adequado são processos iniciais que se repetem ao longo das etapas de conceção e calibração (Camacho et al., 2003). A infraestrutura básica implementada no programa é descrita através destes elementos (Rossman, 2004):

- Tubagens – As tubagens são definidas pelas seguintes características: identificador (ou ID), nó inicial, nó final, comprimento, diâmetro e coeficiente de rugosidade. Por outro lado, estão disponíveis igualmente outras características opcionais que caracterizam a conduta, tais como um fator de perda de pressão específico ou a interação com parâmetros de qualidade da água. O comprimento da conduta influencia de um modo relevante o cálculo das perdas de carga, pelo que o valor apropriado deve ser determinado pelo utilizador com a maior exatidão possível, não sendo derivado

dos desenhos da rede. A perda de carga hidráulica nas tubagens pode ser calculada de acordo com uma das seguintes fórmulas Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Chezy-Manning.

A fórmula de Hazen-Williams foi desenvolvida para o cálculo da perda de carga e apenas para a água, sendo esta a mais utilizada. A fórmula de Darcy-Weisbach é aplicável a todos os líquidos e a todos os regimes de escoamento sendo, teoricamente, a mais correta. Usualmente, a fórmula de Chezy-Manning é utilizada em escoamentos em superfície livre;

- Válvulas - Uma válvula é um comprimento zero especializado que provoca uma queda de pressão de acordo com determinadas especificações, limitando assim a pressão ou o caudal na parte a jusante da tubagem. As válvulas podem ser utilizadas como representações dos elementos físicos de um sistema num modelo, ou como elementos artificiais para simular determinadas condições de funcionamento. Os tipos de válvulas que podem ser modelados com o EPANET, incluem: válvulas, válvulas de segurança, válvulas de alívio, válvulas de alívio de pressão e válvulas de controlo de caudal. As propriedades mais importantes das válvulas são: identificação, unidade de entrada, unidade de saída, diâmetro, tipo e parâmetros de controlo;
- Bombas - As bombas são modeladas como uma parte específica da rede que transfere energia para a água e aumenta a carga hidráulica. Os principais dados a introduzir no programa são os pontos de início e fim e as curvas características. Se as características da bomba forem desconhecidas, podem ser representadas por uma potência, o que dá um valor constante para a energia do caudal. No EPANET, o caudal através da bomba é unidirecional, pelo que não é necessário especificar uma válvula antiretorno. Nas bombas de velocidade variável, a funcionalidade "controlo de velocidade" pode ser alterada para definir as melhores condições de operação;
- Nós - Os principais elementos que caracterizam os nós são a identidade e a cota de referência (usualmente o nível médio da água do mar). Os nós que representam pontos de consumo também devem ser caracterizados utilizando o consumo de base e a informação temporal relacionada. O consumo de base é o valor médio ou nominal das principais categorias de consumo de água num nó. O gráfico temporal é o produto do consumo de base e reflete o consumo de água ao longo do tempo. Na modelação,

o consumo num nó em qualquer altura do dia é o produto do consumo de base e do valor do multiplicador de tempo nesse período. Um nó pode ter mais do que um par de consumo de base e o consumo modelado é o resultado da acumulação de duas ou mais categorias de consumo.

- Reservatórios - Um reservatório é modelado de duas formas: reservatório de nível fixo (RNF) e reservatório de nível variável (RNV).

O RNF consiste numa unidade específica em que o valor da dimensão da superfície livre é determinado pelo utilizador e não se modifica no decurso do ciclo de cálculo, ou seja, é um nó especial que representa um volume de armazenamento de água de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante. Normalmente, representam origens ou sumidouros de água exteriores à rede, permitindo simular lagos, rios ou aquíferos ou, mais frequentemente, ligações a outros SAA ou estações de tratamento de água. Os reservatórios de nível fixo podem servir também como pontos de origem de qualidade da água.

Os RNV correspondem a unidades particulares com capacidade condicionada, em que o volume de armazenamento de água é variável consoante o tempo. Os RNV são utilizados para modelar reservatórios em que o volume armazenado e a altura da superfície livre variam devido à quantidade variável de entrada e à saída em cada fase do cálculo. Os dados necessários para a modelação RNV são a definição do reservatório (célula), cota altimétrica, a altura de água máxima e mínima, o diâmetro para reservatórios circulares (ou curva de volume para reservatórios não circulares) e a qualidade da água inicial.



## CASO DE ESTUDO

### 3.1 Águas do Vale do Tejo, S.A

O grupo Águas de Portugal (AdP) presta serviços de abastecimento de água e saneamento de águas residuais em alta e em baixa. Estes serviços englobam as atividades de captação, tratamento e transporte até aos reservatórios municipais da água para consumo público, e do transporte, tratamento e devolução no meio recetor em condições ambientalmente seguras, das águas residuais urbanas. O grupo AdP coopera com um conjunto de empresas associadas, abrangendo 234 municípios, ou seja, 80% da população portuguesa, entre as quais a empresa Águas do Vale do Tejo, S.A (AdVT). Na figura seguinte podem-se observar as empresas pertencentes ao grupo AdP e a respetiva área de influência (Águas de Portugal, 2023).

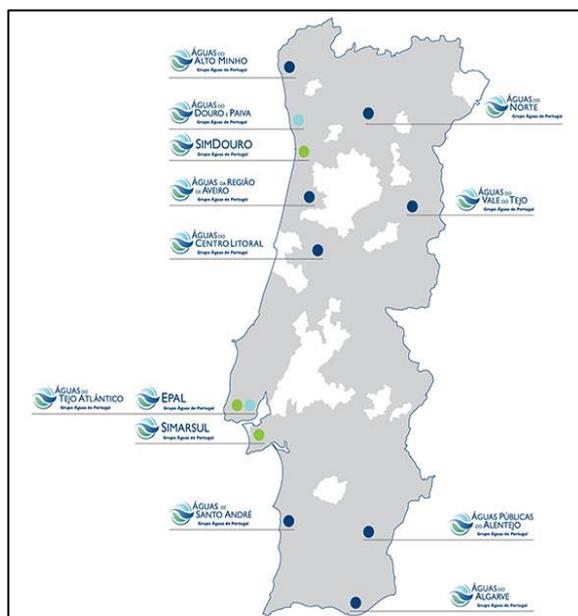


Figura 3.1: Empresas pertencentes ao grupo Águas de Portugal e área de influência (Águas de Portugal, 2023)

A empresa Águas do Vale do Tejo, S.A é uma empresa multimunicipal, que surge na sequência da cisão da Águas de Lisboa e Vale do Tejo, e que resulta da agregação de oito sistemas multimunicipais pertencente ao grupo Águas de Portugal, e atua no setor de abastecimento de água e de águas residuais. A concessão da exploração e da gestão do sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do vale do tejo foi atribuída à Águas do Vale do Tejo e à Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A (EPAL), a sua gestão delegada. Esta entidade gestora abrange 70 municípios na atividade de abastecimento de água e 55 municípios na atividade de saneamento de águas residuais, conforme se pode observar na figura seguinte (Águas do Vale do Tejo, 2023).

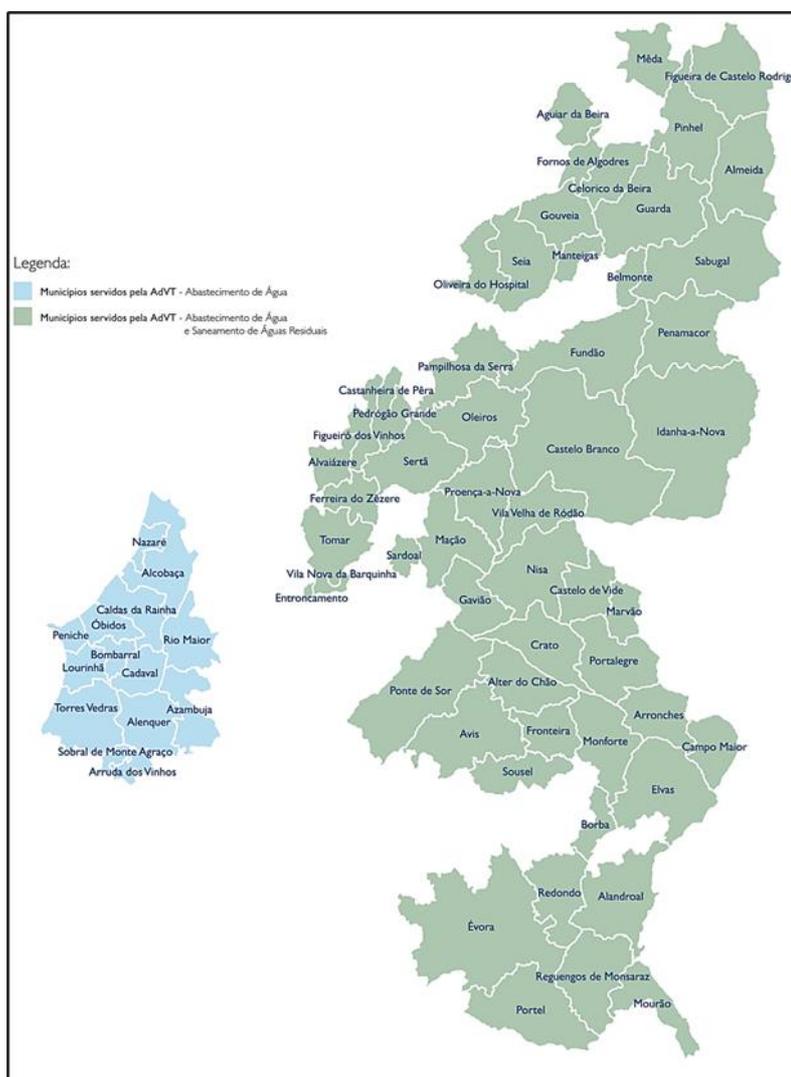


Figura 3.2: Municípios servidos pela Águas do Vale do Tejo (Águas do Vale do Tejo, 2023)

Na atividade de abastecimento de água para consumo humano e saneamento de águas residuais a AdVT, inclui (Águas do Vale do Tejo, 2023):

- Na atividade de abastecimento:
  - Número de utilizadores – 70 municípios;
  - População residente abrangida – 1,1 milhões de habitantes;
  - População residente servida – 0,9 milhões de habitantes;
  - Subsistemas de abastecimento de água - 147;
- Número de Ativos:
  - 435 Captações;
  - 47 Estações de tratamento;
  - 700 Reservatórios;
  - 234 Estações elevatórias;
  - 3609 km de condutas;
- Na atividade de saneamento:
  - Número de utilizadores – 55 municípios;
  - População residente abrangida – 0,6 milhões de habitantes;
  - População residente servida – 0,5 milhões de habitantes;
  - Subsistemas de águas residuais - 411;
- Número de Ativos:
  - 405 Estações de tratamento de águas residuais;
  - 319 Estações elevatórias;
  - 908 km de coletores.

## **3.2 Subsistema de Abastecimento em Alta da Senhora do Desterro/Captações da Serra**

### **3.2.1. Enquadramento**

O Subsistema de Abastecimento em Alta da Senhora do Desterro/Captações da Serra é constituído por um total de duas Estações de Tratamento de Água (ETA), 47 reservatórios, 170 km de condutas adutoras, sete estações elevatórias, três grupos hidropressores, 26 válvulas redutoras de pressão e três camaras de perda de carga, visando o abastecimento a 80 pontos de entrega.

Este subsistema de abastecimento abastece em alta diretamente três municípios, nomeadamente Oliveira do Hospital, Seia e Gouveia, resultando em uma população servida de aproximadamente 50 mil habitantes. Na época de estiagem esta rede de abastecimento pode reforçar o abastecimento de água ao município de Celorico da Beira, sendo este município também abrangido pela empresa Águas do Vale do Tejo S.A. Para uma melhor compreensão do SAA, o Anexo 1, representa genericamente todo o sistema de abastecimento de água.

Na mesma área geográfica a entidade Águas Públicas da Serra da Estrela (APdSE) é a responsável pelo abastecimento de água em baixa.

Neste sentido o presente estudo tem por objetivo a modelação de uma parte sistema de abastecimento com a apresentação de resultados e melhorias para a otimização do sistema de abastecimento em alta de modo que a adução seja operada convenientemente, no que respeita ao controlo de caudais, gestão de níveis de reservatórios ou ao controlo de pressão na rede em alta.

#### **3.2.1.1. Estações de Tratamento de Água**

##### **3.2.1.1.1. ETA da Senhora do Desterro**

A ETA Senhora do Desterro foi dimensionada para uma população de aproximadamente 86 mil habitantes, com capacidade para tratar um caudal máximo de 650 m<sup>3</sup>/h, abastecendo os concelhos de Seia, Gouveia e Oliveira do Hospital. De todo o subsistema, esta ETA dispõe de capacidade para abastecer na totalidade os três concelhos, à exceção da Zona Alta da cidade de Gouveia, que é abastecida unicamente pela ETA Captações da Serra (Águas do Zêzere e Côa & AQUALOGUS, 2005b).

A água bruta da ETA Senhora do Desterro é captada graviticamente no rio Alva, situado na bacia Hidrográfica do Mondego, no açude no sítio da Senhora do Desterro, em pleno Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE). Esta água caracteriza-se por possuir boa qualidade, pH neutro, ser pouco mineralizada e com reduzida alcalinidade, oxidabilidade e condutividade. O tratamento de água inclui a seguinte sequência de operações e processos (Águas do Zêzere e Côa & AQUALOGUS, 2005b):

- Fase líquida:
  - Pré-oxidação com o reagente hipoclorito de sódio;
  - Equilíbrio calco-carbónico, com acidificação da água seguida de remineralização, com recurso ao reagente dióxido de carbono e leite de cal, respetivamente;
  - Coagulação, floculação e adsorção, com adição de um coagulante, uma solução de carvão ativado em pó e floculante;
  - Decantação lamelar;
  - Filtração, através de filtros de areia fechados;
  - Reserva de água filtrada para lavagem dos filtros;
  - Armazenamento e desinfecção final, através da adição de hipoclorito de sódio;
- Fase sólida:
  - Purga das lamas do decantador;
  - Recolha da água de lavagem dos filtros fechados;
  - Espessamento de lamas;
  - Desidratação mecânica de lamas.

#### 3.2.1.1.2. ETA das Captações da Serra

A ETA Captações da Serra tem capacidade para tratar um caudal máximo de 210 m<sup>3</sup>/h. Durante a época de estiagem a ETA Captações da Serra e a ETA Senhora do Desterro reforçam o abastecimento de água ao município de Celorico da Beira, designado pelo subsistema de abastecimento de água de Salgueirais (Águas do Zêzere e Côa & AQUALOGUS, 2005a).

As origens de água, nomeadamente 31 captações, situam-se no maciço da Serra da Estrela, localizado na vertente ocidental do PNSE e correspondem a um grupo de captações de características construtivas e de épocas de construção diversas, que captam águas subterrâneas e também pequenos aproveitamentos superficiais, designadamente dez captações superficiais de pequenas estruturas, nove minas, seis

poços e seis nascentes. O grupo principal de captações distribuem-se por uma área de cerca de 4 km<sup>2</sup>, entre a cota de 900 m e 1500 m, sendo a água conduzida graviticamente para a ETA (Águas do Zêzere e Côa & AQUALOGUS, 2005a).

Em termos de qualidade, a água é agressiva, com pH baixo e muito pouco mineralizada, com alcalinidade e condutividade baixa e, também, baixa oxidabilidade. A linha de tratamento de água inclui a seguinte sequência (Águas do Zêzere e Côa & AQUALOGUS, 2005a):

- Correção do pH com recurso a carbonato de sódio;
- Filtração, através de um filtro de malha;
- Desinfecção final através da adição de hipoclorito de sódio.

### **3.2.2. Caracterização da área de estudo**

O presente estudo incide na vertente norte do município de Seia e no município de Gouveia, nos quais o transporte de água em alta apresenta alguns constrangimentos, nomeadamente no que se refere ao equilíbrio e regularização das pressões, regularização dos caudais e na existência de pressões negativas em pequenos troços, o que condiciona o funcionamento em regime automático de uma estação elevatória. Estes episódios ocorrem, principalmente, devido aos elevados consumos de água nos pontos de entrega, escassez de água bruta proveniente da ETA Captações da Serra, durante o período de estiagem, e da necessidade de reforço do abastecimento de água ao subsistema de abastecimento em alta de Salgueirais.

Operacionalmente, a rede de abastecimento em estudo divide-se em três setores. Para uma melhor compreensão do anteriormente exposto, a Figura 3.3, representa genericamente esta parte do sistema de abastecimento de água em estudo, incluindo a delimitação de cada setor:

- 1º Setor (Linha Adutora de São Julião): o setor que é abastecimento unicamente pela ETA Senhora do Desterro;
- 2º Setor (Zona Alta de Gouveia): o setor é abastecido unicamente pela ETA das Captações da Serra, nomeadamente a zona alta de Gouveia;
- 3º Setor (Linha Adutora Cerca (antigo) - Freixo da Serra - Ribamondegó): o setor pode ser abastecido pela ETA das Captações da Serra e pela ETA Senhora do Desterro.

Resumidamente, o Setor 1 inicia-se em uma Zona de Monitorização e Controlo (ZMC) seguindo-se de uma Válvula Redutora de Pressão (VRP) de Santa Ana, em Seia, e a jusante são aduzidos graviticamente os sete reservatórios. Este setor consegue reforçar o abastecimento de água ao Setor 3 através da estação elevatória de abastecimento de água, EEAA São Julião (EDP), que se encontra na extremidade oposta, onde a água é retirada da célula do reservatório de São Julião (EDP) e é elevada para o Reservatório Cerca (antigo) ou para o Reservatório Cerca (novo). Nos períodos de consumos de água elevados verificam-se constrangimentos no abastecimento de água ao Reservatório Moimenta da Serra.

O Setor 2 é uma pequena zona de abastecimento gravítico, que se caracteriza por ser uma conduta adutora e distribuidora em simultâneo. O fornecimento de água é proveniente da ETA das Captações da Serra.

O Setor 3 inclui cinco reservatórios, e em que durante o período do ano em que existe boa afluência de água bruta à ETA das Captações da Serra, o sistema é explorado manualmente de modo a dar preferência à água tratada proveniente da ETA das Captações da Serra, evitando-se assim os custos associados à elevação de água. Na época de elevado consumo, verifica-se a necessidade do reforço de água ao subsistema de Salgueirais e, com a redução da afluência de água à ETA das Captações da Serra, torna-se necessário o funcionamento da EEAA São Julião (EDP) para que se seja garantido o fornecimento de água à população.

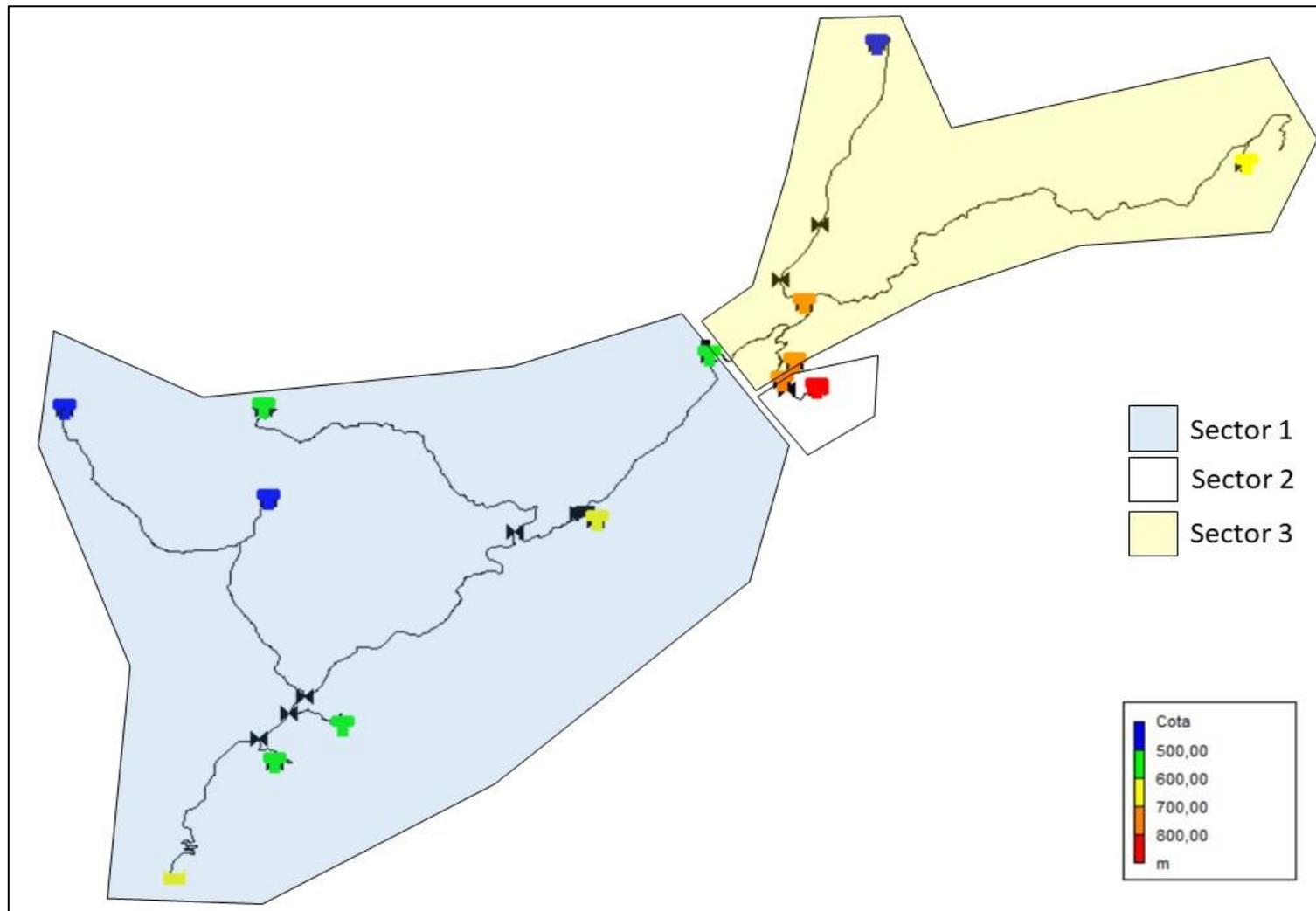


Figura 3.3: Delimitação dos setores na área em estudo

### **3.2.2.1. Conduitas adutoras**

Face à orografia do terreno do sistema adutor em estudo, e como a localização das captações e das Estações de Tratamento de Água se encontram a uma cota altimétrica superior, o escoamento é maioritariamente gravítico.

O sistema adutor em estudo é constituído por 60,7 km de conduitas, onde 20,2 são de Ferro Fundido Dúctil (FFD), 16,6 km em PVC, 21,6 km PEAD e 2,3 km de Fibrocimento e o diâmetro das conduitas adutoras varia entre os 63 mm e os 250 mm. As conduitas adutoras são em FFD e PEAD tendo sido construídas aquando da integração das infraestruturas para a entidade gestora em alta no ano 2008, ou seja, têm aproximadamente 15 anos de funcionamento, sendo pouco suscetíveis à ocorrência de anomalias, nomeadamente roturas.

### **3.2.2.2. Reservatórios e Estações Elevatórias**

Na área de estudo existem 13 reservatórios de água, que representam um volume total de armazenamento de 4320 m<sup>3</sup>. Os reservatórios em estudo, apoiados e semienterrados, estão localizados em locais estratégicos por forma a procurar garantir a correta pressão na rede de distribuição.

Para efetuar a elevação da água entre dois reservatórios, em que o reservatório de jusante está a uma cota superior, utilizadas estações elevatórias. No subsistema de abastecimento em estudo são utilizadas bombas de elevação do tipo centrífugas de eixo vertical instaladas a seco. Em duas estações elevatórias do sistema em estudo são utilizadas também bombas do tipo *booster* (em linha) para pressurização da rede a jusante.

### **3.2.2.3. Pontos de Entrega**

Na área de estudo, para efeitos de contabilização do volume de água fornecida e faturação, são utilizados medidores de caudal, correspondentes a pontos de entrega. Os medidores de caudal dos respetivos pontos de entrega encontram-se a montante da rede de distribuição, ou seja, na conduta de saída dos reservatórios, ou diretamente ligados ao adutor em alta nos casos em que ocorrem ligações diretas.

## **3.3 Aplicação do modelo de simulação hidráulica EPANET 2.0**

### **3.3.1. Metodologia**

Os modelos de simulação devem ser desenvolvidos de modo estruturado e sistemático para permitir o melhor benefício possível no que respeita ao esforço e recursos investidos, tanto na formulação da solução inicial, como na conservação do sistema ao longo da sua vida útil (Coelho et al., 2006). O trabalho de desenvolvimento e implementação da modelação hidráulica no programa EPANET 2.0 foi um trabalho desenvolvido em várias fases, conforme aconselhado por Coelho et al. (2006) e Rossman (2004), de acordo com o descrito no capítulo 2.1.

Para cada fase foram fixados objetivos, tendo sido gerados resultados de acordo com a complexidade do modelo e utilização futura, os quais serão avaliados e discutidos, bem como a proposta de melhorias operacionais que visam a otimização do sistema de abastecimento de água em estudo.

### **3.3.2. Definição do modelo**

#### **3.3.2.1. Planeamento do desenvolvimento do modelo**

Conforme já mencionado no capítulo 3.2.2, o sistema em estudo incide na vertente norte do município de Seia e o município de Gouveia e a modelação hidráulica desta parte do sistema de abastecimento tem como objetivo a resolução de constrangimentos no transporte de água e a otimização do sistema de abastecimento, principalmente nos períodos de estiagem.

A AdVT possui o cadastro georreferenciado e a respetiva caracterização de todos os elementos físicos dos sistemas de abastecimento e saneamento, através da plataforma G/Interaqua, desenvolvida pela AQUASIS.

Na definição de convenções hidráulicas e opções básicas a adotar no projeto, foi considerado o caudal médio horário (CMH), as unidades do Sistema Internacional e a fórmula de perda de carga de Hazen-Williams, uma vez que é uma das mais utilizadas para o cálculo da perda de carga (Rossman, 2004). A tabela seguinte apresenta os coeficientes da Fórmula de Perda de Carga de Hazen-Williams, para tubagens novas (Rossman, 2004).

Tabela 3.1 Coeficientes da Fórmula de Perda de Carga, C, de Hazen-Williams, para tubagens novas (Rossman, 2004)

<b>Material</b>	<b>C, Hazen- Williams</b> (adimensional)
Ferro fundido	130 - 140
Betão ou com revestimento de betão	120 - 140
Ferro Galvanizado	120
Plástico	140 - 150
Aço	140 - 150
Grés	110

### **3.3.2.2. Definição do modelo: descrição da infraestrutura física, consumos e caudais**

Conforme anteriormente referido, a recolha dos elementos necessários para a descrição física do sistema foi obtida através da plataforma de cadastro da AdVT e do conhecimento da rede de abastecimento.

Após a compilação e estruturação de todos os dados físicos do sistema, iniciou-se a modelação hidráulica, tendo sido efetuada a importação do mapa da rede de abastecimento, com recurso ao programa DXF2EPA, por forma a importar a rede de abastecimento desenhada em AutoCAD para o EPANET, através da criação de um ficheiro no formato .INP (Elad Salomons, 2005).

Nas figuras do Anexo 2 e Anexo 3, apresenta-se a configuração geométrica do traçado da rede de abastecimento, no AutoCAD, do Subsistema de Abastecimento da Senhora do Desterro / Captações da Serra e o novo projeto EPANET com a respetiva importação do traçado.

A partir desta base, eliminaram-se as condutas e os nós que não pertencem ao modelo de simulação em estudo, tendo sido posteriormente realizada a introdução das propriedades relativas aos elementos físicos do SAA em estudo, como se pode observar, nas figuras seguintes.

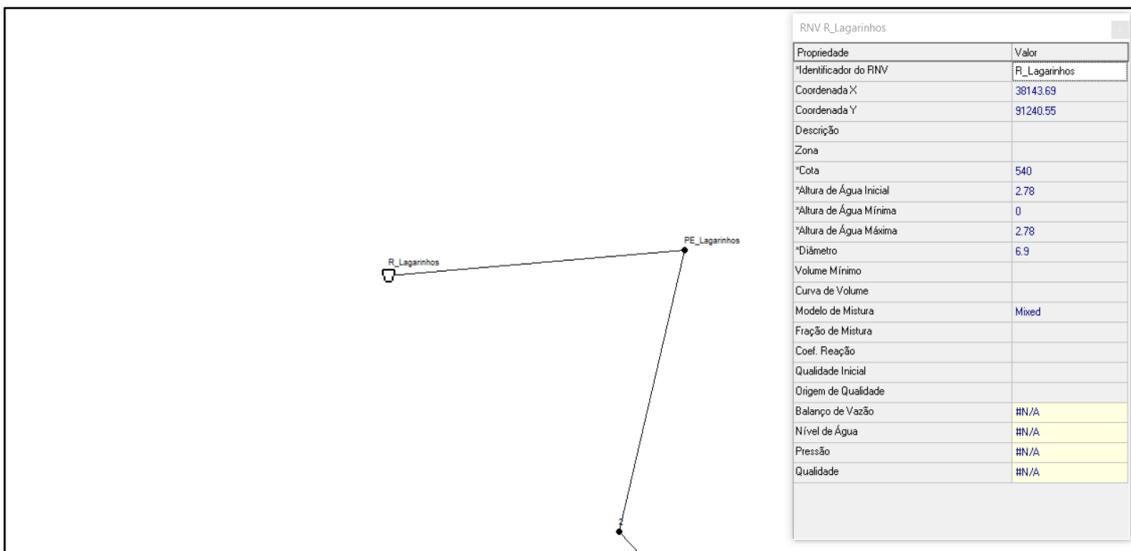


Figura 3.4 Exemplo de introdução das propriedades de um reservatório

Nó PE_Lagarinhos	
Propriedade	Valor
*Identificador do Nó	PE_Lagarinhos
Coordenada X	38167.45
Coordenada Y	91242.58
Descrição	
Zona	
*Cota	540
Consumo-Base	13.89
Padrão de Consumo	P_Lagarinhos
Categorias de Consumo	1
Coef. do Emissor	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	

Figura 3.5: Exemplo de introdução das propriedades relativas a um ponto de entrega

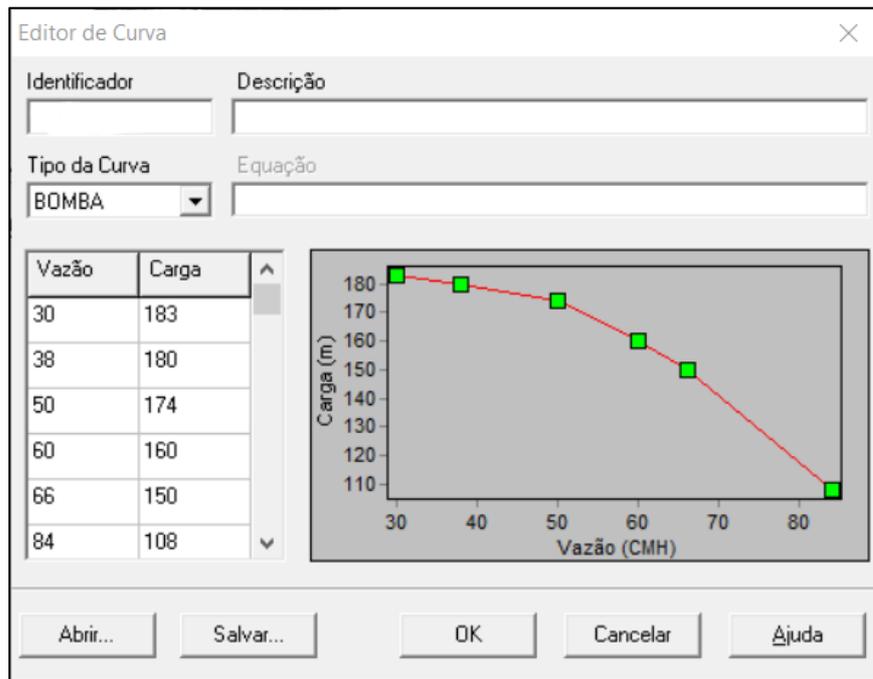


Figura 3.6: Exemplo de introdução de dados relativos a uma curva de funcionamento de uma bomba

Propriedade	Valor
*Identificador da Válvula	VRC_RCercaAntigo
*Nó Inicial	N557
*Nó Final	4
Descrição	
Zona	
*Diâmetro	200
*Tipo	FCV
*Parâmetro de Controle	70
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Fixo	None
Vazão	#N/A
Velocidade	#N/A
Perda de Carga	#N/A
Qualidade	#N/A
Estado	#N/A

Figura 3.7: Exemplo de introdução de dados relativos a uma válvula de controlo de rede

Nó N563	
Propriedade	Valor
*Identificador do Nó	N563
Coordenada X	46151.00
Coordenada Y	91702.00
Descrição	
Zona	
*Cota	736
Consumo-Base	0
Padrão de Consumo	
Categorias de Consumo	1
Coef. do Emissor	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	
Consumo Corrente	#N/A
Carga Hidráulica Total	#N/A
Pressão	#N/A
Qualidade	#N/A

Figura 3.8: Exemplo de introdução de dados relativos a um nó na rede

Após o processo de criação de objetos e introdução das respetivas propriedades de todos os elementos da rede de abastecimento em estudo, designadamente, o cadastro da rede, reservatórios, estações elevatórias e válvulas de controlo de rede, obteve-se o modelo hidráulico que se visualiza no Anexo 4.

A figura 3.9 apresenta o mapa altimétrico retirado do EPANET, representado em isolinhas, com base nas cotas dos nós do SAA.

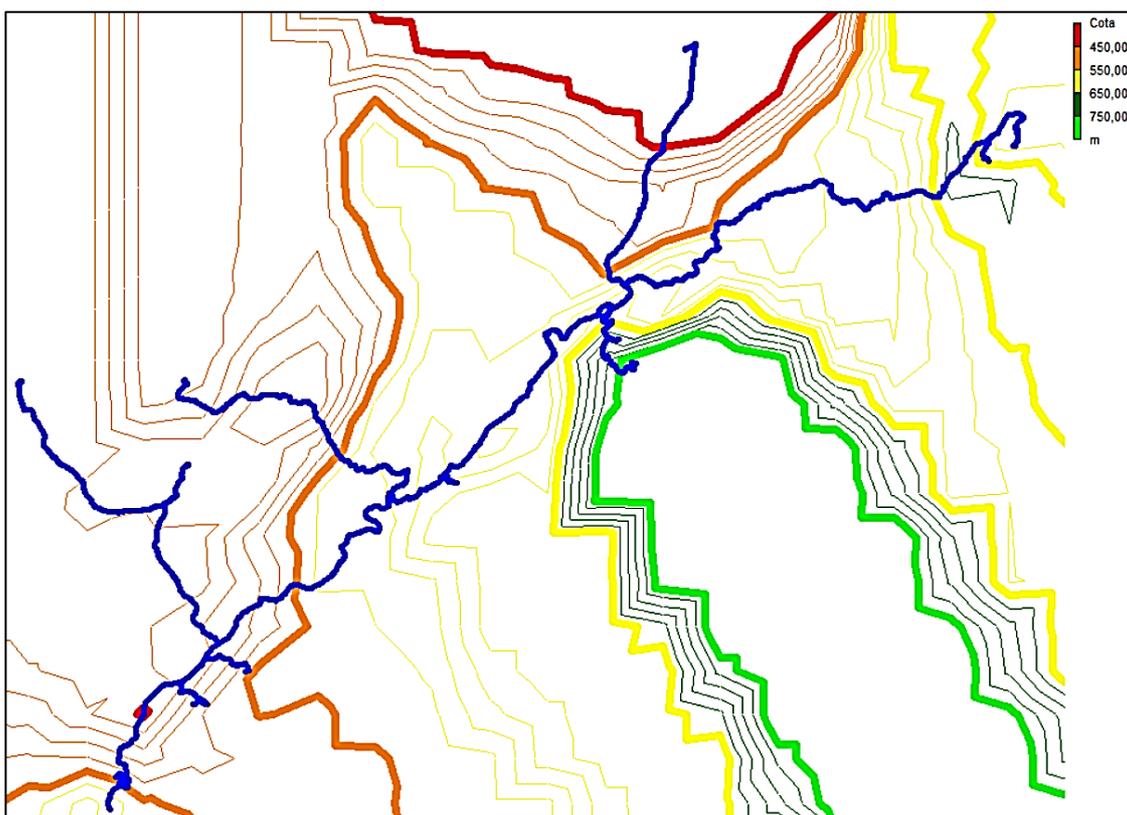


Figura 3.9: Representação da altimetria do SAA em estudo

No que concerne à recolha de dados de volumes mensais de todos os pontos de entrega, estes foram obtidos através de leituras *in loco*, dos anos 2018, 2019 e 2020. Os dados de caudal horário em cada ponto de entrega e a pressão na rede de adução foram obtidas através do sistema de telemetria instalado da rede de abastecimento em estudo.

A entidade gestora AdVT tem todos os registos de dados de caudais e pressão na rede de adução em suporte informático e com possibilidade de exportação dos dados em formato Excel, incluindo: registos de caudal nos pontos de entrega, registos de caudal nos pontos de medição e controlo, pressão a montante dos reservatórios, pressão a montante e jusante nas válvulas de controlo de rede e nas estações elevatórias, os valores da pressão na aspiração e compressão das EEAA. Todos estes dados estão integrados no programa *Water Optimization for Network Efficiency (WONE)*.

O WONE foi desenvolvido pela EPAL e este sistema integra um conjunto de procedimentos e de informação que permitem a concretização de uma estratégia focada na eficiência, na redução de perdas e na otimização do sistema de abastecimento de uma entidade gestora de água, visando a avaliação do desempenho das redes de abastecimento, diagnóstico atempado de anomalias nas redes de abastecimento e define a priorização com critério nas zonas de intervenção (Empresa Portuguesa das Águas Livres, 2023)

Como exemplo, a Figura 3.10, apresenta o exemplo da evolução da pressão e do caudal recolhido diretamente do WONE, em um período de 7 dias, sendo este um exemplo de caudal de saída de um reservatório para a rede de distribuição e os dados de pressão da rede de adução a montante do mesmo reservatório. O eixo da abcissa apresenta a evolução do tempo e no eixo das ordenadas do lado esquerdo, representada a linha a azul, apresenta o caudal de saída de um Ponto de Entrega, e do lado direito, representa a linha a cor de laranja, a pressão da rede de adução a montante do reservatório.

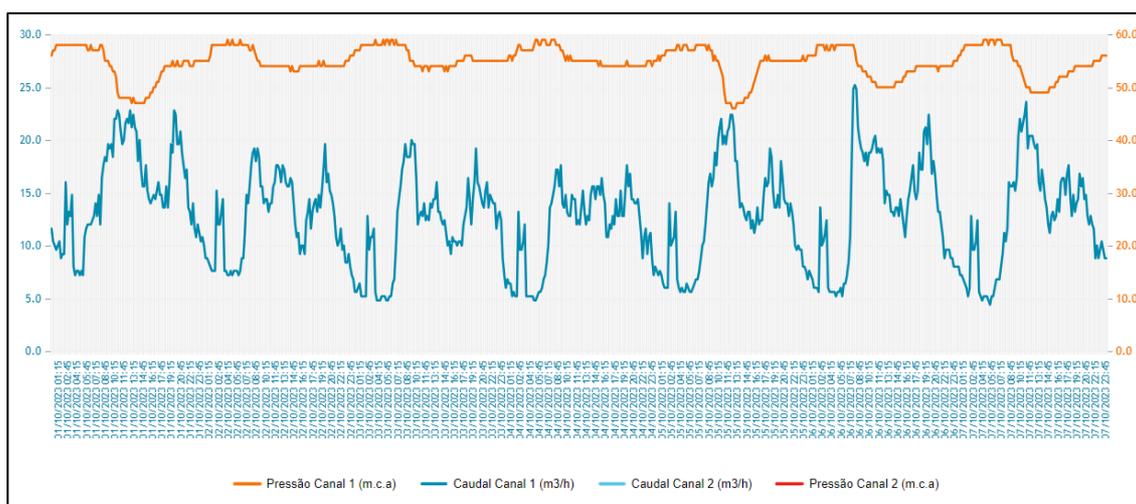


Figura 3.10: Exemplo da evolução de caudal e pressão obtido no WONE

O WONE permite igualmente a exportação dos dados para ficheiros Excel.

### 3.3.2.2.1. Estimativa dos dados de caudal

Para a realização de uma série temporal no EPANET, isto é, realizar simulações dinâmicas, é necessário estimar e/ou calcular os padrões de consumo e dos dados de caudal médios horários, associados a cada ponto de entrega.

No presente estudo efetuou-se a análise das evoluções anuais de consumo, com base no volume médio mensal dos anos 2018, 2019 e 2020, de todo o sistema de abastecimento, com o objetivo de procurar encontrar um padrão de consumo anual, como se pode observar na figura seguinte. Este padrão de consumo anual, considera-se como sendo representativo, uma vez que abrange os volumes mensais de três anos de consumo.

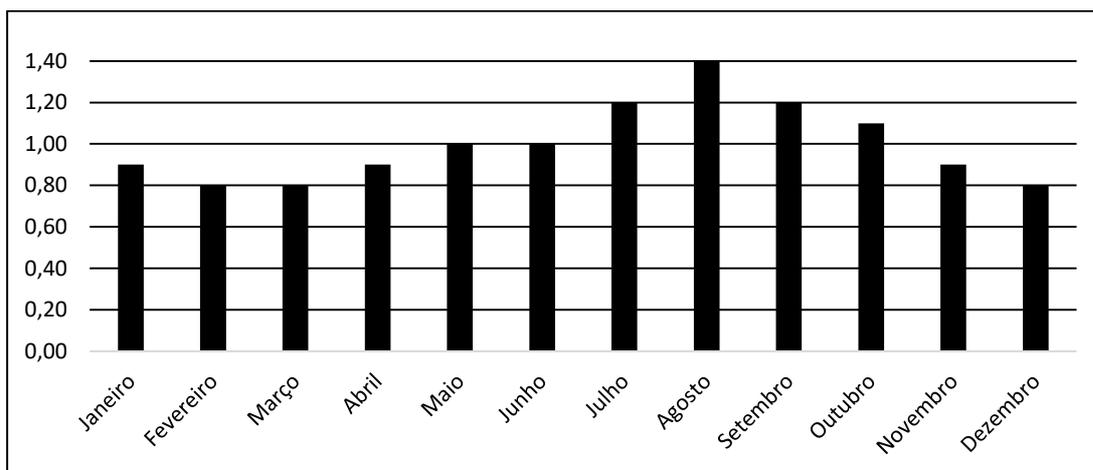


Figura 3.11: Evolução padrão de consumo anual, considerando os volumes mensais do ano 2018, 2019 e 2020

Esta análise permite que, durante a exploração do modelo, o utilizador defina o fator do consumo no EPANET, para a simulação de vários cenários de consumo.

#### 3.3.2.2.2. Cálculo do consumo base por ponto de entrega

O cálculo do consumo base, por ponto de entrega, foi efetuado de acordo com a fórmula de cálculo que se apresenta de seguida, e que permitiu obter o caudal médio horário anual por cada ponto de entrega, que se considera como sendo representativo, uma vez que abrange um período de três anos de consumo.

$$\text{Consumo Base [m}^3\text{/h]} = \frac{\sum V \text{ ano 2018} + \sum V \text{ ano 2019} + \sum V \text{ ano 2020}}{(3 \times 365 \times 24)}$$

$\sum VM \text{ ano } X$  - Volume anual total do 2018, 2019 ou 2020

#### 3.3.2.2.3. Produção de Padrões de Consumo

A produção de padrões de consumo tem como objetivo a representação da variação periódica dos consumos nos pontos de entrega ao longo do período de simulação dinâmica. O padrão consumo é constituído por um conjunto de fatores multiplicativos que podem ser aplicados ao valor de consumo médio de cada ponto de entrega, por forma a traduzir a sua variação no tempo. No presente projeto foram considerados padrões de consumo de 24 horas.

A produção de padrões de consumo foi efetuada de acordo com os dados de caudal instantâneo recolhidos pelo WONE de cada ponto de entrega, de modo a conferir o maior rigor nas simulações hidráulicas dinâmicas. Os padrões de consumo horário foram obtidos

através da divisão da média do caudal horário, de cada hora do dia, pelo valor do caudal médio diário, obtendo-se os seguintes padrões de consumo, conforme a seguinte figura.

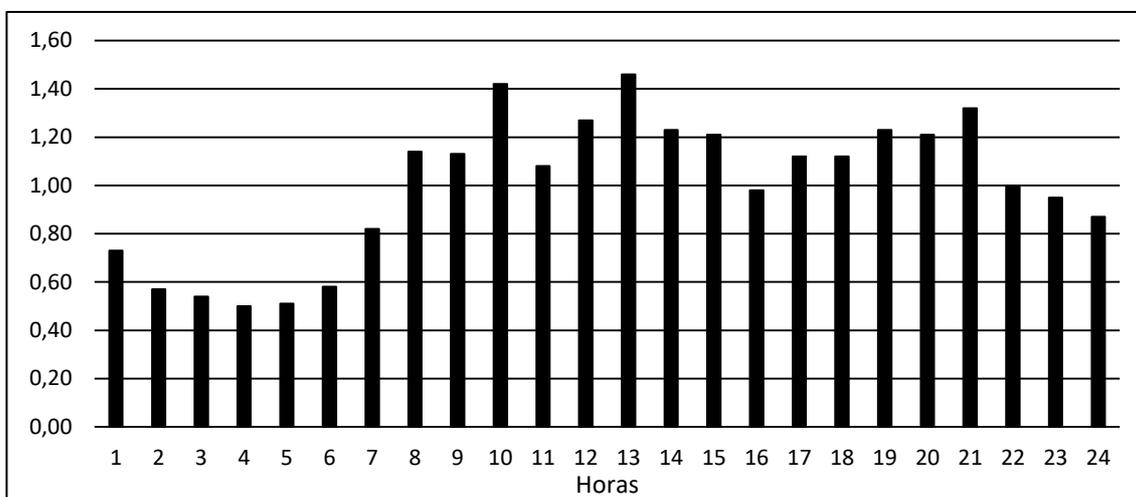


Figura 3.12: Exemplo da evolução diária de consumo após cálculo de padrões de consumo

Após a produção dos padrões de consumo para cada ponto de entrega, estes foram exportados para ficheiros de texto e inseridos no EPANET, como se apresenta na figura seguinte.

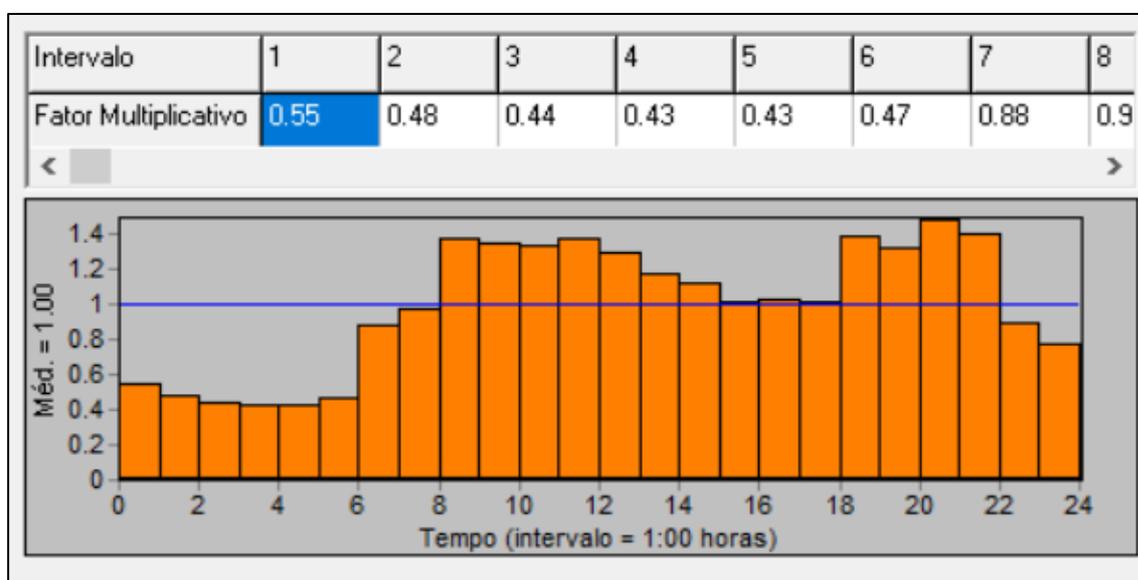


Figura 3.13: Exemplo de configuração de Padrões de Consumo no EPANET

Após execução de simulação hidráulica do EPANET obteve-se a variação de caudal ao longo de 24 horas em cada nó (Ponto de Entrega), considerando o consumo base e o padrão de consumo definido, como se pode observar na Figura 3.14.

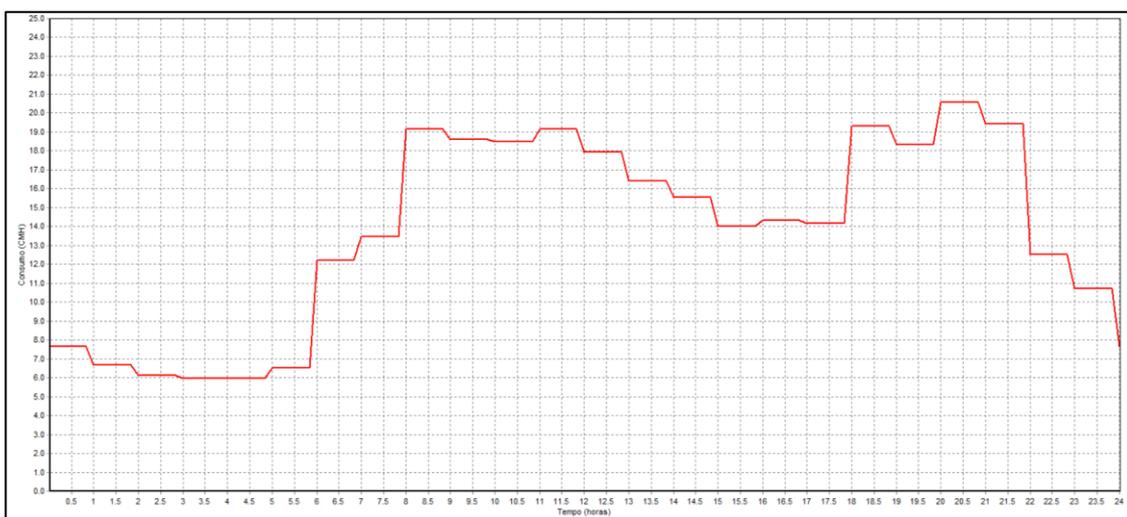


Figura 3.14: Exemplo do resultado de variação de consumo em um Ponto de Entrega no projeto EPANET

Deste modo, obtém-se o ficheiro computacional com o modelo que contem a descrição física completa do sistema de abastecimento, isto é, condutas, nós, reservatórios, válvulas, estações elevatórias e outros elementos físicos, com os respetivos consumos nos locais de pontos de consumo, para os vários cenários temporais.

### 3.3.2.3. Definição do modelo: Controlo operacional

Foi efetuada a recolha dos dados, regras e modos de operação do sistema de abastecimento, nomeadamente níveis de funcionamento dos reservatórios, regulação de válvulas de controlo e sistemas de bombagem e processamento dos mesmos dados.

No presente estudo, quer o controlo do enchimento dos reservatórios, quer o controlo de rede, é efetuado por intermédio de válvulas hidráulicas de controlo, designadamente Flucon 200, Bermad e PAM, com as respetivas pilotagens. Estas válvulas destinam-se a estabilizar pressões, níveis e caudais de um determinado sistema através de controlos hidráulicos, elétricos ou eletrónicos, ou sistemas mistos. As válvulas de controlo, conforme a Figura 3.15, são hidraulicamente operadas e atuadas. A componente principal da válvula, corpo e tampa, permanecem as mesmas para todas as funções de controlo. Esta válvula principal é a base para todas as aplicações e combina diferentes funções de acordo com as necessidades e especificações de cada instalação, designadamente, controlo de pressão, níveis e caudais, de proteção, entre outras (Tecnilab, 2016).



Figura 3.15: Válvula Flucon 200 (Tecnilab, 2023)

O controlo de níveis de enchimento dos reservatórios são efetuados pelas seguintes pilotagens que comandam a válvula principal (Tecnilab, 2016):

- Nível fixo com flutuador - o piloto flutuador abre e fecha a válvula principal mantendo o nível do reservatório constante, repondo o caudal que sai do reservatório;
- Nível altimétrico - o nível é controlado proporcionalmente através da medição da coluna de água no interior do reservatório. A válvula abre quando o nível baixa e fecha quando o nível sobe;
- Nível diferencial com flutuador - Quando o nível mínimo é atingido a válvula abre na totalidade e só fecha quando é repostado o nível máximo. Este diferencial é obtido pelo diferente nível a que se encontram dois flutuadores que acionam a pilotagem.

O controlo de pressão da rede de adução é controlado pelas seguintes pilotagens que comandam uma válvula principal (Tecnilab, 2016):

- Redutor de pressão: reduz automaticamente a pressão alta de montante para uma pressão inferior, independentemente das alterações de caudal e pressão a montante;
- Sustentação de pressão: permite que a válvula abra totalmente ou parcialmente, somente quando a pressão a montante excede a pressão regulada no piloto sustentador. Esta solução evita a entrada de ar na tubagem a montante.

Os valores de pressão das válvulas de controlo da rede de abastecimento, nomeadamente válvulas de redução e de sustentação de pressão, foram obtidos através dos dados obtidos pelo WONE.

Para a representação real do funcionamento e modo de operação do sistema de abastecimento foram inseridos controlos programados, conforme os seguintes exemplos.

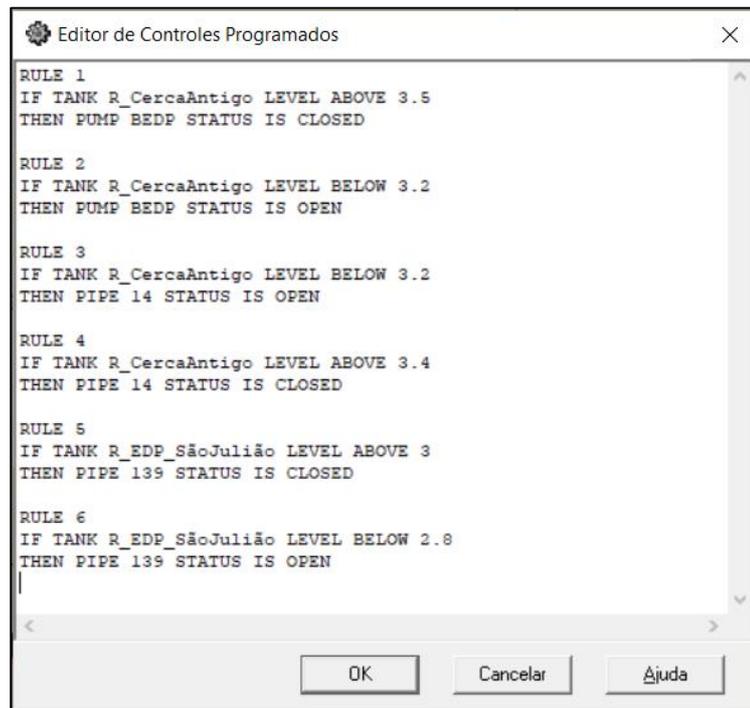


Figura 3.16: Controlos programados inseridos no modelo EPANET

Estes controlos traduzem para o modelo a representação real do funcionamento dos sistemas de bombagem e das válvulas de controlo de nível dos reservatórios com pilotagem de nível diferencial.

#### 3.3.2.4. Projeto base e exploração do modelo

Após a eliminação de erros detetáveis, realizou-se a afinação do modelo hidráulico de modo a responder à realidade do sistema, obtendo-se o projeto base do modelo hidráulico. A calibração do modelo foi efetuada com base na comparação de resultados de medições no sistema físico, essencialmente através de informação obtida no WONE, de modo que o modelo reproduza o comportamento real do sistema de abastecimento, através do método de tentativa erro. Estas tentativas consistiram em mudanças na rede, com a adição, eliminação ou alteração dos objetos e propriedades que alteram a variação de pressão e caudal ao longo da rede adutora.

O processo de construção do modelo termina com a conceção do projeto base do modelo hidráulico, quando este reproduz o funcionamento e desempenho real do sistema de adução em estudo.



## 4 RESULTADOS

A rede de adução devidamente modelada tem como vantagem imediata o aprofundamento do conhecimento sobre o seu funcionamento, ou seja, o ganho da sensibilidade ao seu comportamento. Assim, o modelo hidráulico reúne num único suporte, uma diversidade de informação compilada com o objetivo de entender o seu funcionamento, podendo iniciar-se a sua análise através da realização de simulações.

### 4.1 Análise e melhorias aplicadas no modelo

#### 4.1.1. Setor 1

Na análise ao Setor 1 e conforme identificado no Capítulo 3.2.2, após análise macro de pressões modelo identificou-se a ocorrência de pressões negativas no nó N481, associado a uma zona de ponto alto do perfil da rede adutora, bem como uma zona da rede de adução onde a pressão é superior a 200 m c.a., tal como se pode observar na figura 4.1, que representa a pressão da rede em isolinhas.

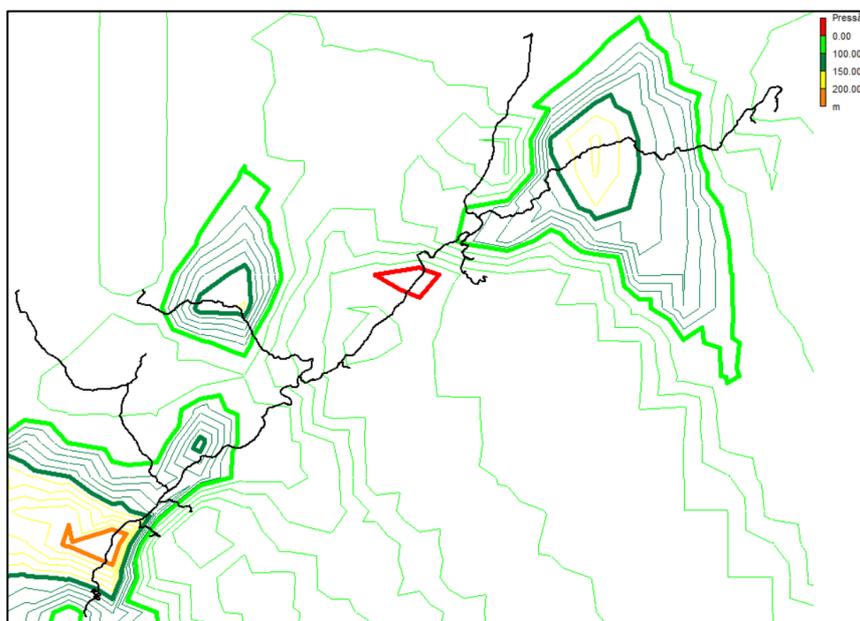


Figura 4.1: Mapa da pressão na rede de adução em isolinhas

Estas duas situações, ambas no mesmo troço adutor, resultam da orografia irregular, podendo, contudo, ser mitigadas com a utilização de equipamentos de redução de pressão e sustentação de pressão, ou melhor afinação destes, conforme já referido no capítulo 3.3.2.3.

Da análise da Figura 4.2, obtida através do EPANET, importa referir que a variação da pressão no Nó N481 é significativa, entre 76 m c.a. e -17 m c.a. (teoricamente), e que estas variações provocam uma fadiga considerável nas tubagens e acessórios deste troço adutor. No modelo de simulação hidráulica verifica-se que a pressão negativa ocorre durante o enchimento do reservatório de jusante e, conforme verificado no local, associado ao Nó N481, dá-se a entrada de ar na conduta adutora através da ventosa de triplo efeito existente.

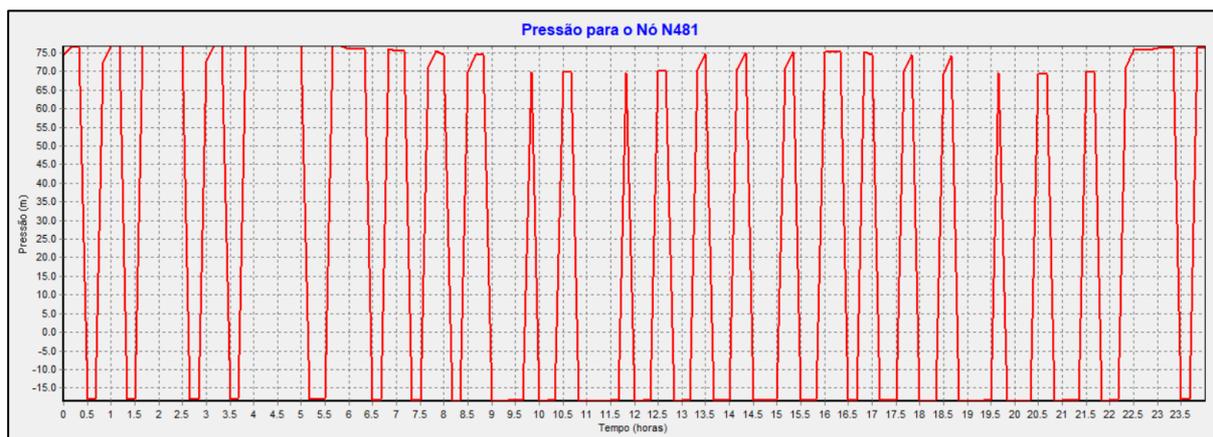


Figura 4.2: Pressão no Nó N481

Nos sistemas de abastecimento as zonas de depressão devem evitar-se, tanto quanto possível. Segundo Marques & Sousa (2011), quando a pressão no interior das condutas é inferior à pressão atmosférica, e em situação de rotura, pode ocorrer a entrada de corpos estranhos no interior da tubagem e, conseqüentemente, a água ficar contaminada.

Uma vez que a pressão negativa não é recomendável nas redes de abastecimento, no modelo foi inserida uma válvula de sustentação a montante do reservatório de jusante, ajustada para o valor de 35 m c.a., e foi reduzida a pressão na válvula redutora de pressão a montante da rede, em 20 m c.a.. Após a simulação hidráulica obteve-se, conforme esperado, o aumento da pressão inferior no Nó N481 para aproximadamente 11 m c.a. e a redução de pressão em, igualmente, 20 m c.a., conforme se pode observar na Figura 4.3. De modo a regularizar a pressão no troço adutor, foi efetuada a alteração do modo enchimento do reservatório no modelo hidráulico, para que este se mantenha preferencialmente o nível máximo. Com a aplicação da sustentação de pressão, em certos períodos, verifica-se a redução do nível de água no reservatório quando o caudal de água das saídas do reservatório é inferior ao caudal de entrada, como se pode observar na Figura 4.4.

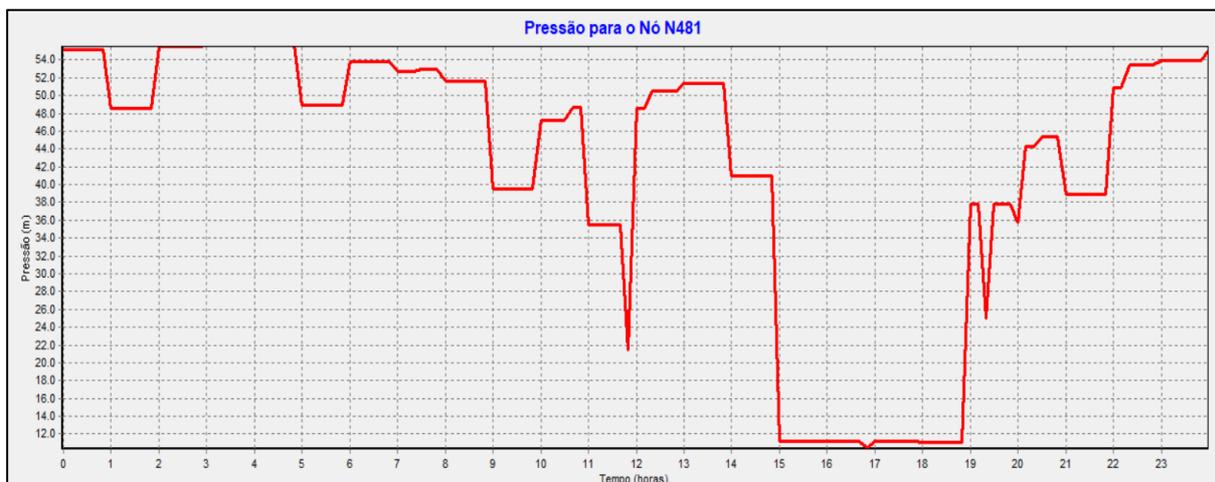


Figura 4.3: Pressão no Nó N481, após os ajustes

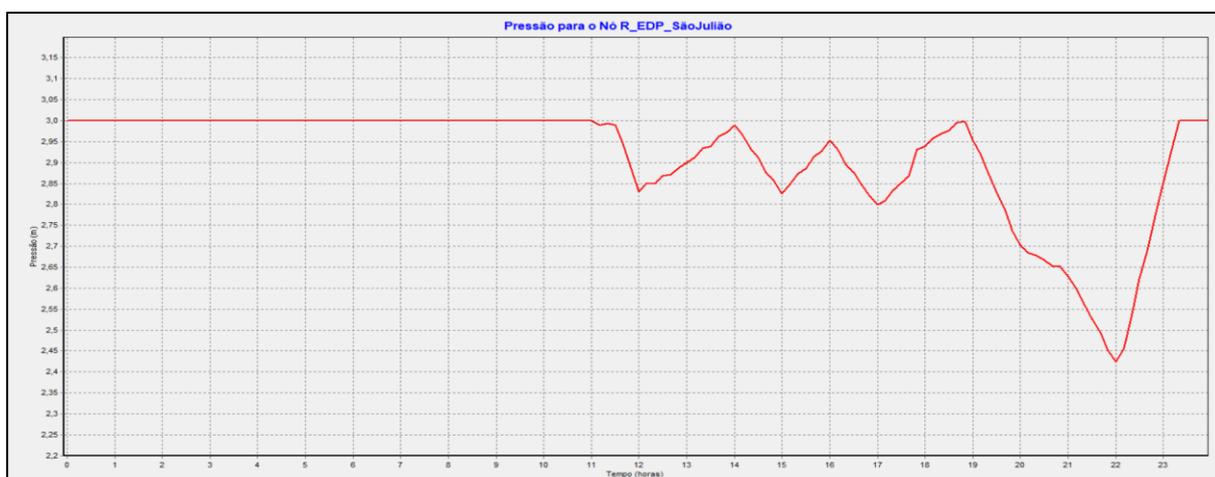


Figura 4.4: Nível do reservatório de jusante, após os ajustes

Após análise global detalhada do Setor 1, verifica-se que o sistema de abastecimento tem capacidade de fornecer água a todos os pontos de entrega, e que os reservatórios têm a capacidade de restituir o nível de água para os níveis máximos após as 24 horas de simulação, para as condições mais elevadas de consumo.

No que respeita à EEAA Moimenta da Serra, a montante, com constrangimentos de funcionamento em modo automático devido à existência de pressão negativa no adutor, verifica-se que, com as alterações preconizadas, a pressão a montante da bombagem não é inferior a 10 m c.a. pelo que é possível o funcionamento em automático sem comprometer a integridade dos equipamentos. No modelo hidráulico, o arranque e paragem da EEAA será atuado com base no nível de arranque e paragem do reservatório de jusante para um caudal de bombagem predefinido, sendo possível o fornecimento de água a este reservatório graviticamente.

### 4.1.2. Setores 2 e 3

Após análise aos Setores 2 e 3 verifica-se que, em automático, o funcionamento da EEAA que reforça o Setor 3, com água tratada proveniente do Setor 1, é prioritário face a água tratada proveniente da ETA das Captações da Serra. Esta situação ocorre porque o sistema foi concebido para que o arranque e paragem da EEAA fosse controlado pelo nível do reservatório de jusante, isto é, o Reservatório de Cerca (antigo). Deste modo, importa ajustar o funcionamento em automático da EEAA para que este seja acionado apenas quando o nível do reservatório da ETA das Captações da Serra é baixo.

Através da criação de dois controlos programados, apresentados de seguida, foi possível simular o pretendido.

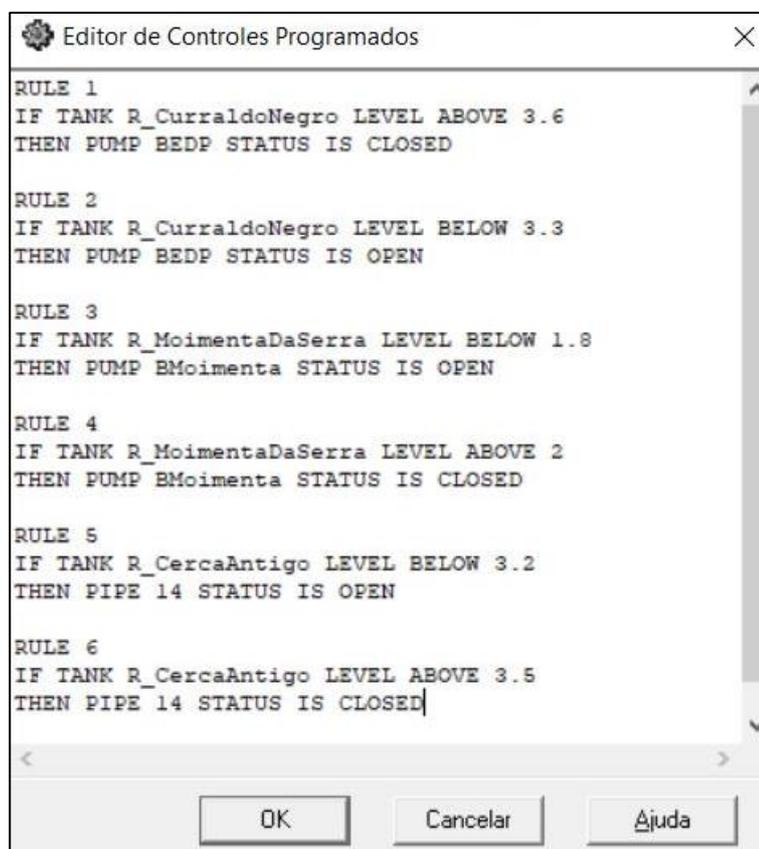


Figura 4.5: Alteração dos controlos programados inseridos no modelo EPANET

Após simulação hidráulica, verifica-se que o modelo hidráulico simulou o abastecimento de água com a prioridade da água tratada proveniente da ETA das Captações da Serra. Deste modo, é possível o aproveitamento total da água tratada com origem gravítica e que resulta de operações e processos unitários de tratamento de água mais simples, dada a boa qualidade de água bruta.

Em termos de velocidade de escoamento de água nas condutas adutoras, não se registaram em todo o SAA valores superiores a 1,5 m/s, contudo existem troços com velocidade máxima inferior a 0,5 m/s. Segundo Marques & Sousa (2011), a reduzida velocidade de escoamento pode dar origem à formação de depósitos e dificultar a acumulação do ar nos pontos altos e, por outro lado, as velocidades elevadas potenciam as condições para a ocorrência de golpes de aríete.

Em resumo, decorre do modelo hidráulico que o SAA tem capacidade de fornecimento de água a todos os pontos de entrega e que os reservatórios têm a capacidade de restituir o nível de água, para os níveis iniciais, após as 24 horas de simulação.

Com os modos de operação anteriormente referidos e simulados, obtêm-se uma mais-valia operacional e económica, bem como a regularização dos caudais e da velocidade de escoamento em todo o sistema adutor.

## **4.2 Criação e avaliação de cenários**

Após as melhorias aplicadas ao modelo em estudo foram elaborados três cenários, com períodos temporais distintos e extrapolando-se para situações que possam ocorrer, por forma a avaliar o desempenho do sistema de abastecimento, designadamente:

- Cenário 1: Simulação de consumos de água no mês de Agosto e simulação de escassez de água proveniente nas Captações da Serra, com o objetivo de estimar o caudal necessário afluente à ETA das Captações da Serra para que se garanta o fornecimento de água em todo o sistema em estudo;
- Cenário 2: Simulação de paragem da produção de água na ETA das Captações da Serra durante 72 horas, em período de consumos médios, com o objetivo de avaliar a resiliência do sistema;
- Cenário 3: Simulação de anomalia na EEAA São Julião (EDP) durante 48 horas, em período de consumos elevados, e produção de água proveniente da ETA das Captações da Serra de 40 m<sup>3</sup>/h, com o objetivo de analisar o comportamento e resiliência do sistema.

### **4.2.1. Resultados da simulação do Cenário 1**

Por forma a procurar simular as condições anteriormente referidas, é necessário inserir nas opções hidráulicas do modelo hidráulico o fator de consumo de 1.4, conforme referido no capítulo 3.3.2.2.3.

Por tentativa erro, e tendo como base o nível do reservatório do Curral do Negro, que está imediatamente a jusante da ETA Captações da Serra, verificou-se que abaixo do caudal horário de 24 m<sup>3</sup>/h já não é possível restituir o nível de água no respetivo reservatório, conforme se pode observar na figura seguinte.

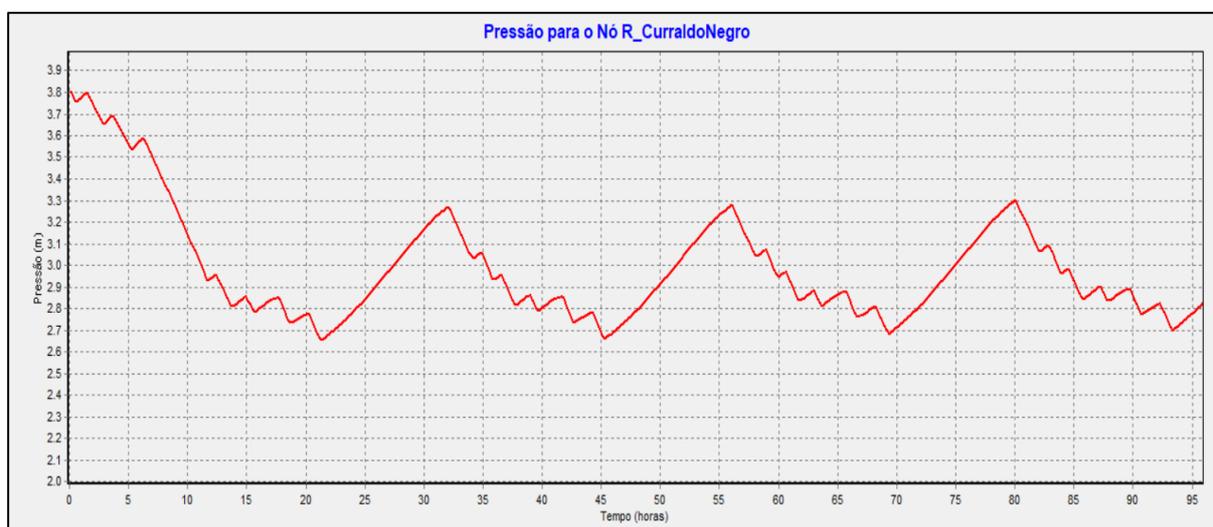


Figura 4.6: Evolução do nível do reservatório Curral do Negro para as condições do cenário 1

Deste modo, podemos concluir que, se na ETA das Captações da Serra o caudal horário produzido for inferior a 24 m<sup>3</sup>/h, o nível do reservatório irá baixar gradualmente sem que o mesmo seja restituído, e o SAA irá ao longo do tempo originar a interrupção do fornecimento água aos pontos de entrega dos Setores 2 e 3.

#### 4.2.2. Resultados da simulação do Cenário 2

Para simular as condições referidas para o Cenário 2 é necessário inserir nas opções hidráulicas do modelo hidráulico o fator de consumo de 1, relativo aos consumos médios, conforme referido no capítulo 3.3.2.2.3, bem como anular a origem de água relativo à ETA Captações da Serra.

Conforme se pode observar na Figura 4.7, em caso de anomalia na produção de água na ETA é possível garantir o abastecimento de água durante pelo menos 96 horas (4 dias), sem efetuar qualquer alteração de modo de funcionamento da rede do SAA, isto porque após as 96 horas o nível de água no R Curral do Negro ainda é de 1 metro.

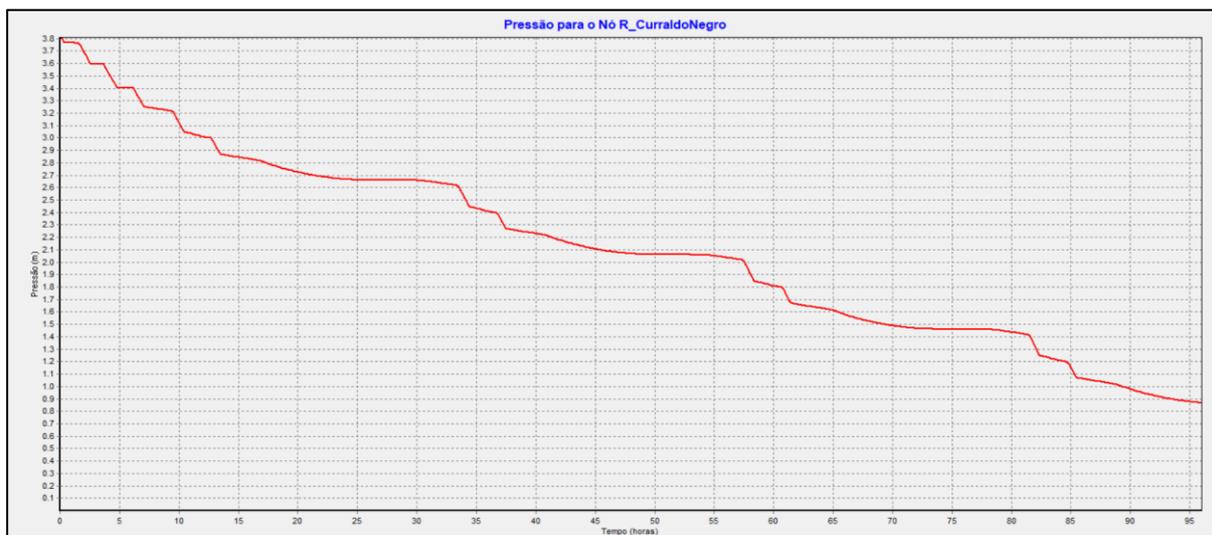


Figura 4.7: Variação do nível do reservatório Curral do Negro para as condições do cenário 2

Para as condições deste cenário, com exceção do Setor 2, a EEAA de São Julião (EDP) consegue, na generalidade, suprir os consumos de água do Setor 3 e o Setor 1 não é comprometido quanto ao seu funcionamento.

Conforme se pode observar na figura seguinte, a EEAA São Julião (EDP) funciona praticamente em contínuo.

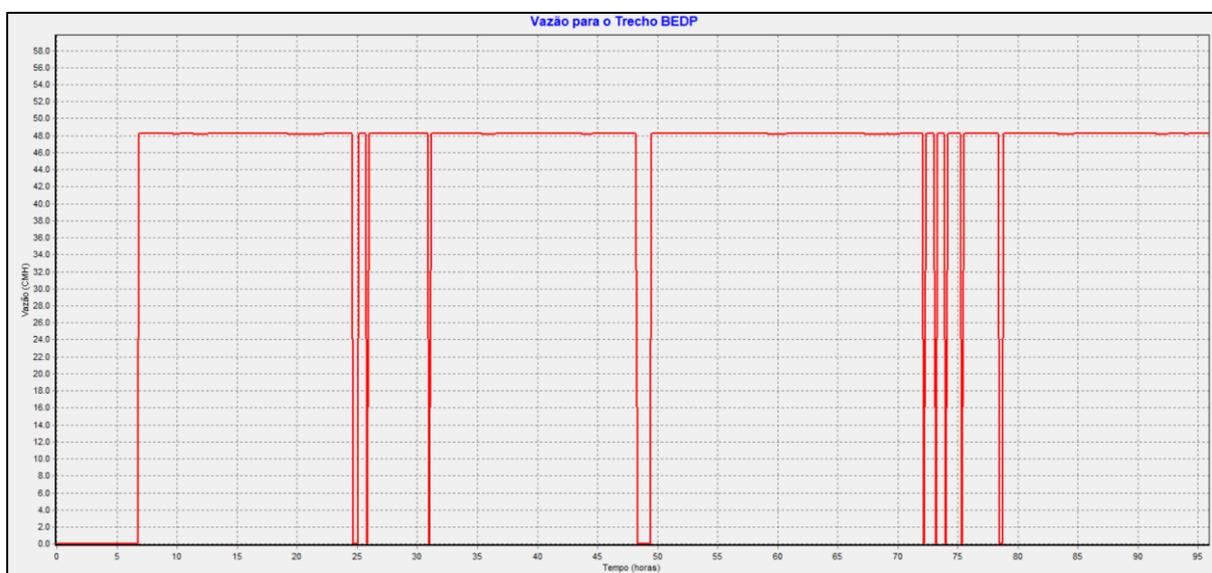


Figura 4.8: Caudal de bombagem da EEAA São Julião para as condições do cenário 2

### 4.2.3. Resultados da simulação do Cenário 3

Para simular as condições referidas para o Cenário 3 é necessário inserir nas opções hidráulicas do modelo hidráulico o fator de consumo de 1,4, relativo aos consumos mais

elevados nos pontos de entrega, conforme referido no capítulo 3.3.2.2.3, bem como inserir o valor de 40 m<sup>3</sup>/h associado à válvula de controlo de caudal que aduz água ao reservatório Curral do Negro e colocar a EEAA São Julião (EDP) fora de serviço.

Após análise ao resultado do modelo foi possível verificar que para as condições do Cenário 3, não é possível garantir o fornecimento de água durante as 48 horas. Conforme se pode observar na figura seguinte, ocorre a interrupção do fornecimento após 47 horas no ponto de entrega da Zona Alta de Gouveia quando o reservatório Curral do Negro atinge o nível mínimo.

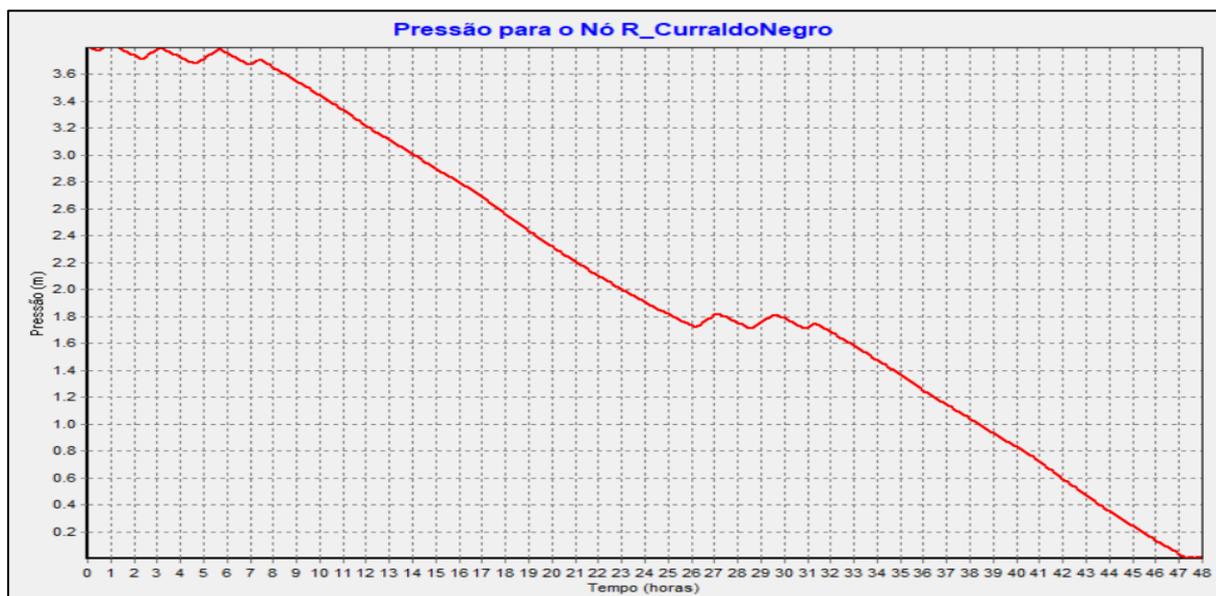


Figura 4.9: Evolução do nível do reservatório Curral do Negro para as condições do cenário 3

No entanto no Setor 3, o reservatório Cerca Novo tem uma elevada capacidade de armazenamento de água, pelo que, com alterações operacionais da rede de adução, nomeadamente o fecho da entrada de água no reservatório Cerca Novo, é possível prolongar o tempo de fornecimento de água à população por um período superior a 48 horas. Conforme se pode observar na figura seguinte, com o fecho de entrada de água no reservatório Cerca Novo após 48 horas o nível de água é de 1,7 metros e 0,7 metros, no reservatório Curral do Negro e Cerca Novo, respetivamente.

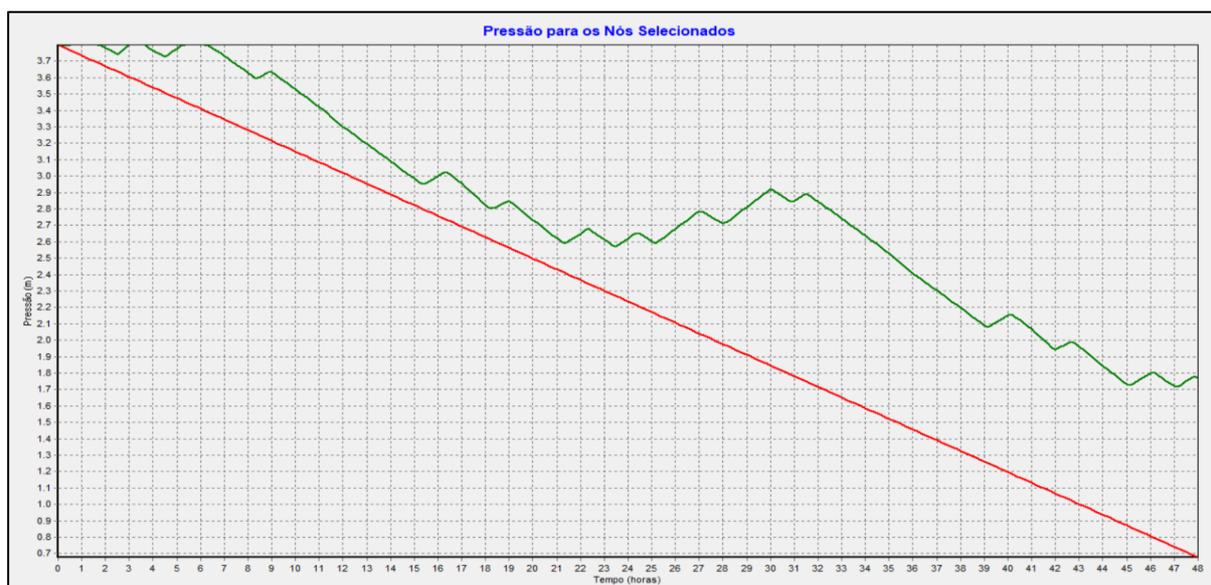


Figura 4.10: Variação do nível do reservatório Curral do Negro (linha verde) e Cerca Novo (linha vermelha) para as condições do cenário 3 com o fecho da entrada de água no reservatório Cerca Novo

Para as condições do Cenário 3 constatou-se que após 47 horas haveria interrupção de água em um ponto de entrega, no entanto com o fecho de entrada de água no reservatório Cerca Novo é possível prolongar o fornecimento de água à população.

Tal como este último cenário, existem inúmeras alterações operacionais que se podem realizar nos SAA de modo a mitigar os eventuais impactos que resultam em constrangimentos no fornecimento de água, tais como avarias, roturas, escassez de água, entre outros. Tal como já referido no capítulo 2.1.2, os modelos de simulação hidráulica a par com o conhecimento pleno dos sistemas de abastecimento são absolutamente benéficos e suportam a decisão para a correta exploração e otimização dos sistemas.



# 5

## CONCLUSÕES

O estudo efetuado permitiu verificar que as variações altimétricas dos traçados adutores e a eventual escassez de água nas captações da serra constituem o principal desafio para a entidade gestora, pelo que a utilização de modelos de simulação hidráulica são benéficos para a exploração, planeamento e gestão do sistema de abastecimento de água, permitindo a obtenção célere de resultados, comparativamente aos que se obtêm como base na informação que decorre do funcionamento real do sistema.

A análise e avaliação hidráulica foi efetuada com base em indicadores de caudal, pressão da rede de abastecimento e níveis de reservatórios. Para a melhoria do desempenho do troço adutor principal no Setor 1 propõe-se a redução da pressão na válvula redutora de pressão a montante do adutor e a afinação do piloto de sustentação da válvula de controlo no reservatório São Julião (EDP), bem como a alteração do modo de enchimento do reservatório. Também se propõe a alteração do modo de funcionamento em automático de duas estações elevatórias, que irão permitir a priorização o funcionamento do escoamento gravítico sem comprometer o funcionamento do fornecimento de água à população. Estas alterações operacionais no transporte de água do SAA em estudo resultaram na regularização do escoamento e das pressões.

Em termos económicos, estas alterações têm como objetivo a priorização da água tratada da ETA das Captações da Serra, de origem gravítica e que resulta de operações e processos unitários de tratamento de água mais simples, bem como a dispensa contínua do funcionamento da EEAA ao Setor 3. Após a simulação hidráulica por um período de 24 horas e para o cenário de consumos de água elevados, os níveis de água de todos os reservatórios foram restituídos, validando-se a sua funcionalidade quando colocado em prática.

A análise hidráulica dos três cenários equacionados permitiu evidenciar a resiliência e adaptabilidade do SAA, designadamente para eventuais anomalias e situações de escassez de água bruta da ETA Captações da Serra, conjugados com épocas de elevado consumo de água.

Todavia, poderiam ter sido gerados mais cenários, pois o modelo de simulação hidráulica permite, em tempo real, a perceção das alterações no sistema adutor, com o objetivo de identificar possíveis problemas, promover o planeamento das atividades de

operação e manutenção, ou das opções operacionais para que se garanta o abastecimento de água.

Neste sentido, a modelação hidráulica das redes de abastecimento de água constitui uma ferramenta essencial para a determinação e suporte à decisão das condições de exploração de um SAA por parte das entidades gestoras, possibilitando ainda a análise e previsão do funcionamento das redes de abastecimento de água, para as mais diversas condições operacionais ou das necessidades futuras, de modo a garantir fiabilidade do abastecimento. O programa EPANET 2.0 revelou-se uma ferramenta flexível, adaptável, intuitiva e simples, dado o modo como são apresentados os resultados das simulações hidráulicas e, no que concerne à interação entre o utilizador, o modelo e a rede em estudo.

Para além das diversas funcionalidades do programa EPANET 2.0 utilizadas, este permite igualmente a análise da qualidade da água, nomeadamente a idade da água e o decaimento de cloro em todos os locais da rede, podendo ser este o próximo passo em futuros desenvolvimentos deste trabalho, bem como o cálculo do benefício económico resultante das alterações operacionais efetuadas no modelo de simulação hidráulica em estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Águas de Portugal. (2023). *Águas de Portugal*. <https://www.adp.pt/pt/sobre-nos/onde-estamos/?id=27>
- Águas do Vale do Tejo. (2023). *Relatório & Contas 2022*. [https://www.advt.pt/files/2916/8010/1722/Relatrio\\_e\\_Contas\\_2022.pdf](https://www.advt.pt/files/2916/8010/1722/Relatrio_e_Contas_2022.pdf)
- Águas do Zêzere e Côa, & AQUALOGUS. (2005a). *Projecto do subsistema da Senhora do Desterro/Captações da Serra e Subsistemas Autónomos: Volume 1 – Memória Descritiva e Justificativa Tomo 2 - Projeto Base da ETA das Captações da Serra* (Vol. 1).
- Águas do Zêzere e Côa, & AQUALOGUS. (2005b). *Projecto do subsistema da Senhora do Desterro/Captações da Serra e Subsistemas Autónomos: Volume 1 – Memória Descritiva e Justificativa Tomo 3 - Projeto Base da ETA da Senhora do Desterro* (Vol. 1).
- APDA. (2014). *Eficiência dos Sistemas de Abastecimento de Água - Balanço Hídrico*.
- Castro, A. R. S. (2021). *Definição das velocidades de escoamento e monitorização da qualidade da água ao longo do Sistema Adutor X/Y (ETA – extremo da rede)*. [Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho]. <https://hdl.handle.net/1822/80958>
- Chaveiro, P. J. D. (2018). *Modelação e calibração hidráulica da rede de abastecimento de água de Reguengos de Monsaraz* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve]. <http://hdl.handle.net/10400.1/12531>
- Coelho, S. T., Loureiro, D., & Alegre, H. (2006). *Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ersar\\_modelacao\\_e\\_analise\\_de\\_sistemas\\_de\\_abastecimento\\_de\\_agua\\_2006.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ersar_modelacao_e_analise_de_sistemas_de_abastecimento_de_agua_2006.pdf)
- Coelho, S. T., Loureiro, D., & Alegre, H. (2007). A INICIATIVA NACIONAL PARA A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (INSSAA): a implementação de capacidades de modelação no seio de entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água. *I Conferência INSSAA – Modelação de Sistemas de Abastecimento de Água*, 1–13. <http://epanet->

- curso.Inec.pt/artigos/Artigo\_INSSAA\_Coelho\_et\_al.pdf
- Decreto Regulamentar nº 23/95, N.º 194 Diário da República - Série 1-B de 23/08/1995 5284 (1995). <https://dre.pt/pesquisa/-/search/488136/details/maximized>
- Salomons, Elad. (2005, junho 3). *DXF2EPA – AutoCad DXF File Conversion Utility for EPANET*. Water Simulation. <http://www.water-simulation.com/wsp/2005/06/03/dxf2epa-autocad-dxf-file-conversion-utility-for-epanet/>
- EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres. (2023). *WONE®*. <https://www.epal.pt/EPAL/menu/produtos-e-servicos/wone>
- Regulamento de Relações Comerciais dos Serviços De Águas e Resíduos, 105 (2018). [https://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/documents/regulamento\\_rela%C3%A7%C3%B5es\\_comerciais.pdf](https://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/documents/regulamento_rela%C3%A7%C3%B5es_comerciais.pdf).
- ERSAR. (2023). *Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2022)* (Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ed.); Vol. 1).
- Gameiro, P. C. R. (2014). *Hydraulic Calibration of Water Networks: Applied to Briela's Water Distribution System*. 1–11.
- Alegre, Coelho, S. T., Almeida, M. do C., & Vieira, P. (2005). *Controlo de Perdas de Água em Sistemas Públicos de Adução e Distribuição*.
- Lansey, K. E. (2006). The evolution of optimizing water distribution system applications. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 20. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)5](https://doi.org/10.1061/40941(247)5)
- Mala-Jetmarova, H., Nargiz Sultanova, & Savic, D. (2017). Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental Modelling and Software*, 0–48. <http://hdl.handle.net/10871/25685>
- Marques, J. A. A. de S., & Sousa, J. J. de O. (2011). *Hidráulica Urbana* (l. da U. de Coimbra (ed.); 3.<sup>a</sup> Edição).
- Menegotto, A. G. F., & Righetto, A. M. (2016). *Controle Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água através de Simulação Numérica*. <https://www.aprh.pt/pt/publicacoes/artigos/controle-operacional-de-sistemas-de-abastecimento-de-agua-atraves-de-simulacao-numerica/>
- Monteiro, L., Pinheiro, A., Carneiro, J., & Covas, D. (2021). Caracterização dos reservatórios de água para consumo humano em Portugal. *Ingeniería Del Agua*, 25(1), 49.

<https://doi.org/10.4995/ia.2021.13659>

Moura, V. M. (2006). *Informação Geográfica Como Suporte Ao Abastecimento De Água - Subsistema Cooprema De Cuiabá / Mt Abastecimento De Água – Subsistema*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso]. [https://pgfa.ufmt.br/index.php/br/component/docman/?task=doc\\_download&gid=82](https://pgfa.ufmt.br/index.php/br/component/docman/?task=doc_download&gid=82)

Obradović D., & Lonsdale P. (1998). *Public water supply: models, data and operational management (1st ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482272031>

Olaia, A. (2012). *Gestão de Sistemas de Abastecimento de Água através de Modelação Hidráulica*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa]. [https://run.unl.pt/bitstream/10362/8228/1/Olaia\\_2012.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/8228/1/Olaia_2012.pdf)

Rossman, L. A. (2004). *Manual do Utilizador EPANET 2.0* (LNEC). [http://www-ext.lnec.pt/projects2013/saa/pdf/Manual\\_EPANET\\_2\\_Portugues.pdf](http://www-ext.lnec.pt/projects2013/saa/pdf/Manual_EPANET_2_Portugues.pdf)

Sarisen, D., Koukoravas, V., Farmani, R., Kapelan, Z., & Memon, F. A. (2022). Review of hydraulic modelling approaches for intermittent water supply systems. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(12), 1291–1310. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.028>

Silva, J. H. F. (2008). *Exploração das potencialidades do programa EPANET na simulação hidráulica de sistemas de abastecimento de água*. [Relatório de Projeto, Universidade do Porto]. <http://hdl.handle.net/10216/58610>

Tecnilab. (2016). *Válvulas automáticas de controlo*.

Tecnilab. (2023). *Válvulas Automáticas de Controlo Hidráulico*. <https://valvulas.tecnilab.pt/conteudo/areas-actuacao/valvulas/vach-flucon-valvula-controlo/vach-fvc-controlo-pessao/flucon-200-sustentacao-pessao/flucon-controlo-pessao-sustentacao-pessao-03s>

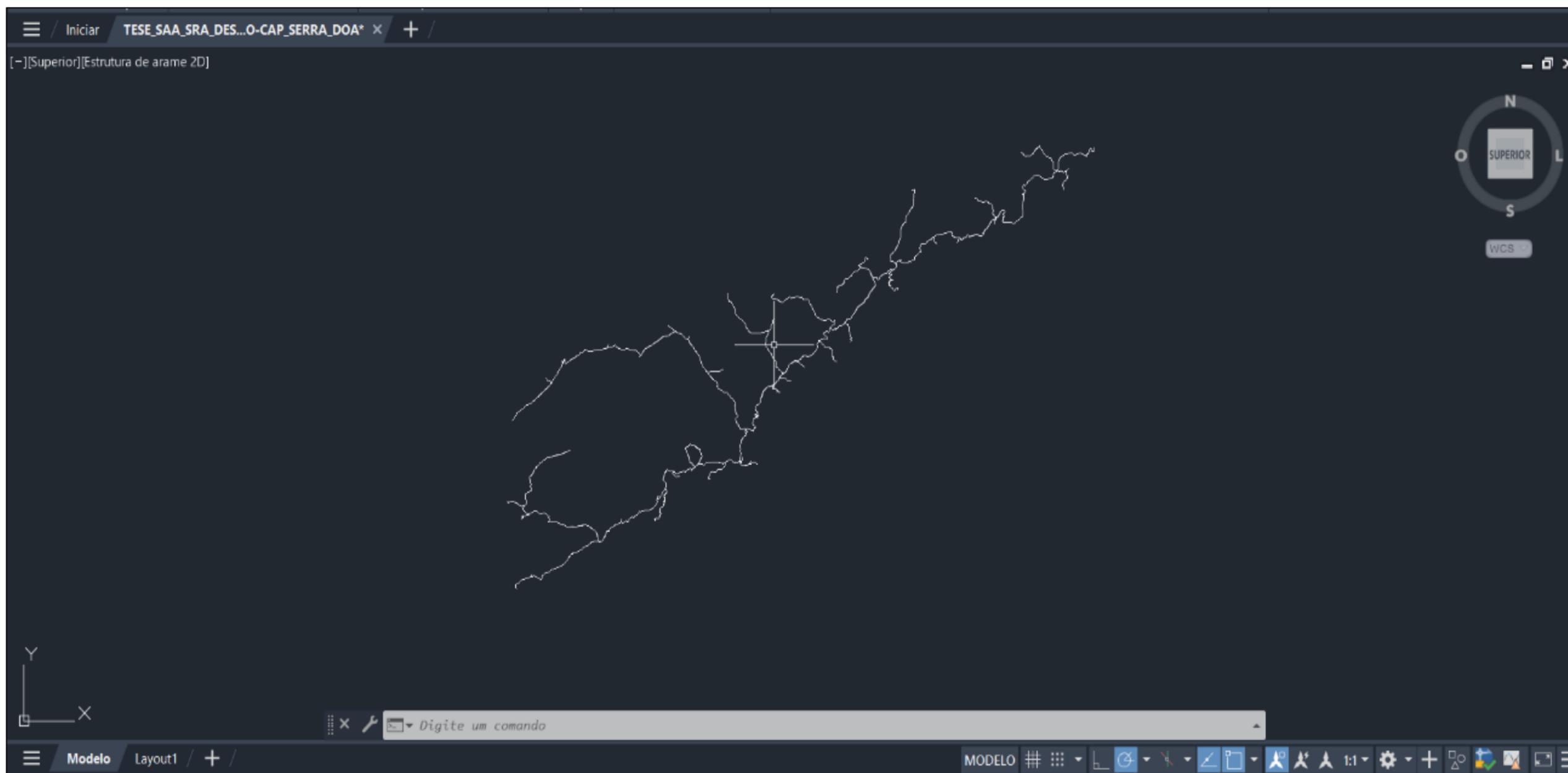
Vilas-Boas, P. R. (2008). *Modelação de uma Rede de Distribuição de Água*. [Relatório de Projeto, Universidade do Porto].

Walski, T. M., Chase, D. V., & Savic, D. A. (2001). *Water Distribution Modeling*. Civil and environmental engineering and engineering mechanics faculty publications. [https://ecommons.udayton.edu/cee\\_fac\\_pub/17/](https://ecommons.udayton.edu/cee_fac_pub/17/)

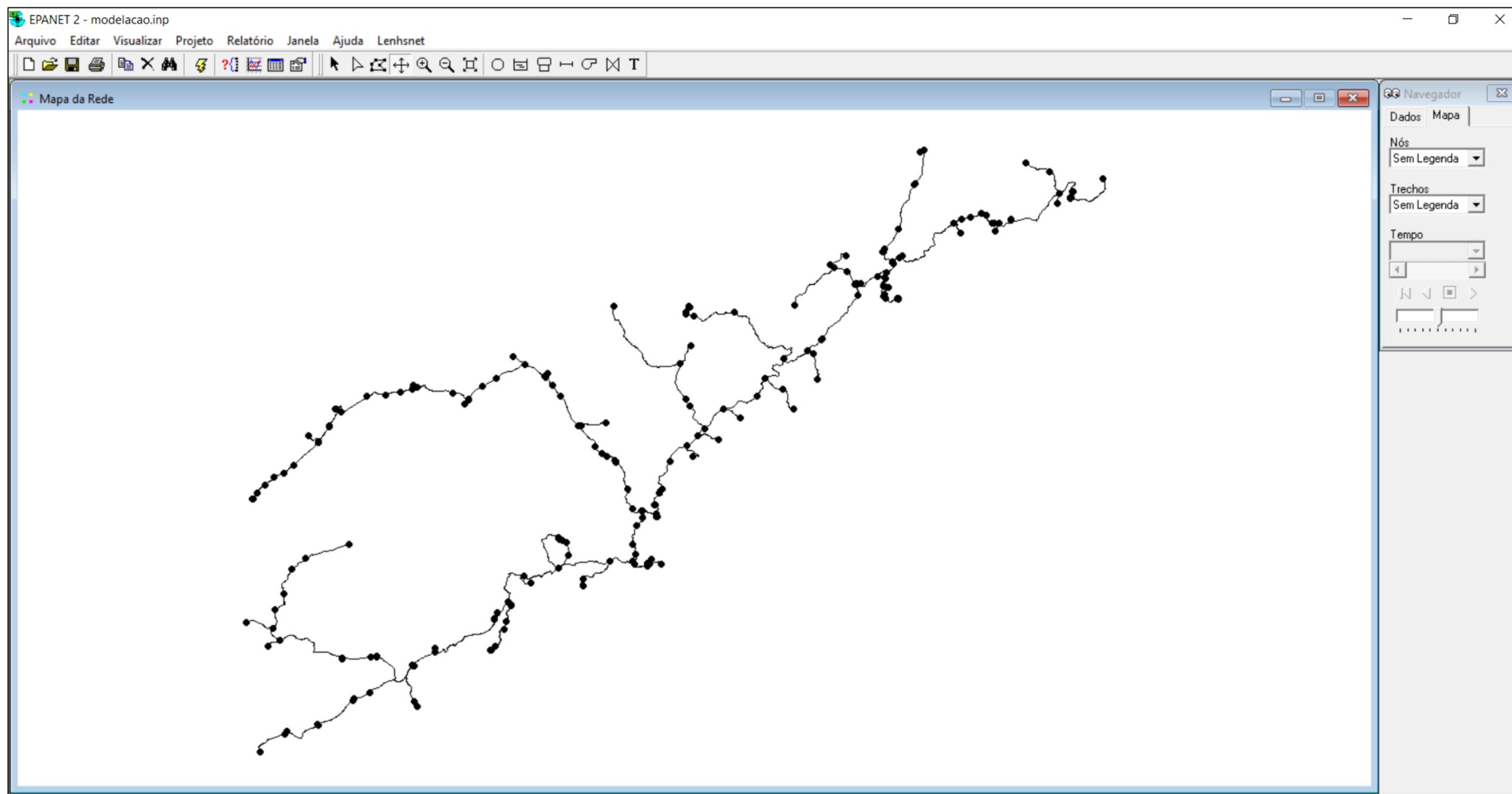


# Anexos

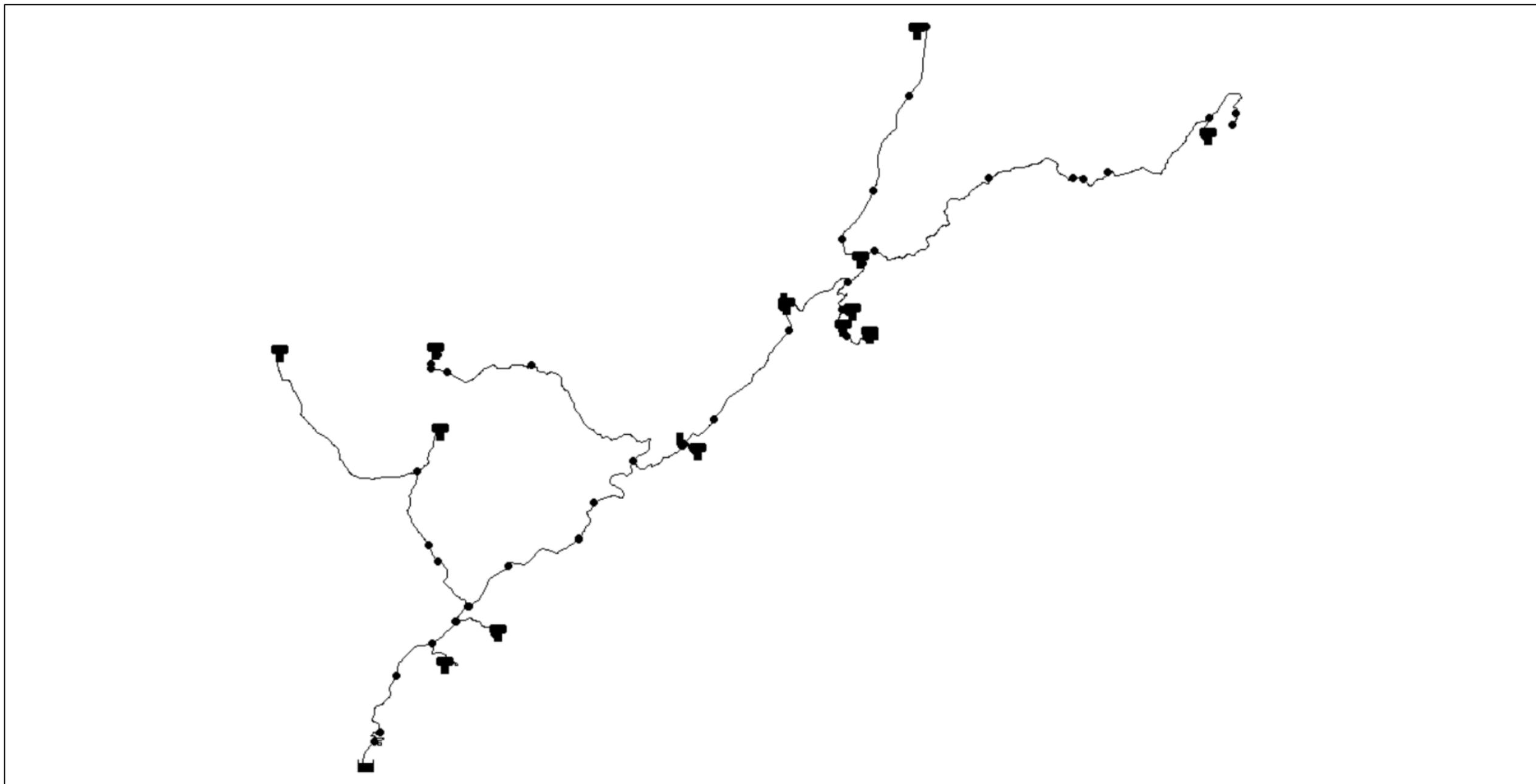




Anexo 2: Traçado da rede em AutoCAD



Anexo 3: Resultado da importação do mapa da rede



Anexo 4: Projeto do modelo no EPANET após introdução dos elementos físicos do SAA em estudo





2023

AMÍLCAR MARROCANOO

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA  
ATRAVÉS DA MODELAÇÃO HIDRÁULICA