



**Marcos Túlio Cirilo  
Dultra**

**TÍTULO DA TESE (MÁXIMO 130 CARACTERES)**

**THESIS TITLE (MAX 130 CHARACTERS)**

# **DOCUMENTO PROVISÓRIO**



**Marcos Túlio Cirilo  
Dultra**

**TÍTULO DA TESE (MÁXIMO 130 CARACTERES)**  
**THESIS TITLE (MAX 130 CHARACTERS)**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computadores e Telemática, realizada sob a orientação científica do Doutor (Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos), Professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, do Doutor (co-orientador), Professor auxiliar convidado do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro, da Doutora (co-orientadora), Professora associada c/ agregação do Departamento de Biologia da Universidade de Aveiro, e do Doutor (co-orientador), Professor auxiliar convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Texto Apoio financeiro do POCTI  
no âmbito do III Quadro Comuni-  
tário de Apoio.

(if applicable- Portuguese manda-  
tory)

Texto Apoio financeiro da FCT e  
do FSE no âmbito do III Quadro  
Comunitário de Apoio.

(if applicable- Portuguese manda-  
tory)

**o júri / the jury**

presidente / president

Prof. Doutor João Antunes da Silva  
professor associado da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Prof. Doutor João Antunes da Silva  
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João Antunes da Silva  
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João Antunes da Silva  
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João Antunes da Silva  
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João Antunes da Silva  
professor associado da Universidade de Aveiro

**agradecimentos /  
acknowledgements**

Agradeço toda a ajuda a todos os meus colegas e companheiros.

**palavras-chave**

texto livro, arquitetura, história, construção, materiais de construção, saber tradicional.

**resumo**

Um resumo é um pequeno apanhado de um trabalho mais longo (como uma tese, dissertação ou trabalho de pesquisa). O resumo relata de forma concisa os objetivos e resultados da sua pesquisa, para que os leitores saibam exatamente o que se aborda no seu documento.

Embora a estrutura possa variar um pouco dependendo da sua área de estudo, o seu resumo deve descrever o propósito do seu trabalho, os métodos que você usou e as conclusões a que chegou.

Uma maneira comum de estruturar um resumo é usar a estrutura IMRaD. Isso significa:

- Introdução
- Métodos
- Resultados
- Discussão

Veja mais pormenores aqui:

<https://www.scribbr.com/dissertation/abstract/>

**keywords**

textbook, architecture, history, construction, construction materials, traditional knowledge.

**abstract**

An abstract is a short summary of a longer work (such as a thesis, dissertation or research paper).

The abstract concisely reports the aims and outcomes of your research, so that readers know exactly what your paper is about.

Although the structure may vary slightly depending on your discipline, your abstract should describe the purpose of your work, the methods you've used, and the conclusions you've drawn.

One common way to structure your abstract is to use the IMRaD structure. This stands for:

- Introduction
- Methods
- Results
- Discussion

Check for more details here:

<https://www.scribbr.com/dissertation/abstract/>

**acknowledgement of use of  
AI tools**

**Recognition of the use of generative Artificial Intelligence  
technologies and tools, software and other support tools.**

I acknowledge the use of [insert AI system(s) and link] to [specific use of generative artificial intelligence or other tasks]. I acknowledge the use of [software, codes or platforms] to [specific use software, codes or platforms or to other tasks].

Example 1: I acknowledge the use of ChatGPT 3.5 (Open AI, <https://chat.openai.com>) to summarise the initial notes and to proofread the final draft and the use of Office365 (Microsoft, <https://www.office.com>) for text writing and productivity.

Example 2: No content generated by AI technologies has been used in this Thesis.

# Contents



# List of Figures

# List of Tables

# Glossário

# Introduction

*A short description of the chapter.*

*A memorable quote can also be used.*

## 1.1 BACKGROUND

Um recurso finito e essencial para existência humana é a água. Por tratar-se de um item de extrema importância, é necessário que haja um controle e monitoramento eficaz de seu uso. Mas não só do seu uso mas da energia e custos relacionados ao seu fornecimento à população.

Hoje temos acesso a diversas tecnologias que podem ser utilizadas para otimizar o uso da água e reduzir custos, como por exemplo, algoritmos de Machine Learning para prever o consumo de água, a utilização de sensores para monitorar o consumo, a calibração dos modelos hidráulicos, entre outros.

Nos WSS (Water Supply Systems), a otimização de custos é um desafio, pois é necessário considerar diversos fatores, como a topologia da rede, a demanda de água, a localização dos reservatórios. Outra dificuldade está na consideração da incerteza dos dados devido a muitos casos, os dados coletados são imprecisos ou incompletos.

No campo computacional, a complexidade de cálculos ou a falta de dados gerados na fonte não são grandes desafios como eram a alguns anos atrás. Com a IoT (Internet of Things) e a computação em nuvem, é possível coletar e processar uma grande quantidade de dados em tempo real. Esta quantidade de dados (Big Data) pode ser utilizada para treinar algoritmos de Machine Learning e otimizar custos em WSS.

Diante destes desafios, a tecnologia é uma aliada nestes vários aspectos a serem tratados.

## 1.2 AIM

Na literatura, encontram-se implementações no uso de diversos algoritmos de Machine Learning para simular e otimizar custos de sistemas de abastecimento de água.

A proposta do presente artigos é utilizar o algoritmo DC3 (Deep Constraint Completion and Correction), como forma de apresentar um novo método para simulação e otimização e

comparar os resultados obtidos com os algoritmos já existentes, utilizando como fontes de dados os sistemas de abastecimento de água de Fontinha e Ronqueira.

# State of the Art

## 2.1 HYDRAULIC SIMULATION

Atualmente no mercado existem diversos simuladores hidráulicos que são utilizados para modelar sistemas de abastecimento de água. Dentre eles, podemos citar o EPANET, WaterGEMS, WaterCAD, entre outros. A simulação permite oferecer soluções rápidas e precisas para equações algébricas diferenciais usadas para desenvolver a representação matemática de um sistema de abastecimento de água[1]. O EPANET é um dos mais reconhecidos aplicativos na área de distribuição de água[2], amplamente utilizado e com muito sucesso[3] há mais de 20 anos[4] e é esta ferramenta a ser utilizada na simulação para obtenção dos dados necessários para a otimização.

## 2.2 DEEP LEARNING IN WSS

A crescente demanda por eficiência e sustentabilidade nos sistemas de abastecimento de água tem impulsionado o uso de Machine Learning (ML) e Deep Learning (DL) como ferramentas inovadoras para otimização, monitoramento e controle dessas redes. Com os dados obtidos por ferramentas como EPANET, é possível treinar modelos de aprendizado de máquina para prever o comportamento do sistema e otimizar o uso de recursos.

Há diversos papers abordando o uso de Deep Learning em sistemas de abastecimento e distribuição de água para prever detecção de anomalias[5], prever pressão na rede de suprimento de água[6], detecção de vazamentos[7], agendamento inteligente para ligar e desligar a bomba, de acordo com o monitoramento em tempo real[8] entre outros.

## 2.3 OPTIMIZATION IN WSS

Estações de bombeamento de abastecimento de água são um elemento indispensável de qualquer sistema de abastecimento de água. Elas fornecem não apenas o suprimento de água para cada recipiente, mas também a pressão necessária na rede de abastecimento de água

para fins de combate a incêndio. O custo da energia é um dos componentes mais importantes do preço da água tratada.[9]

O principal objetivo para otimização é o custo operacional, que compreende o custo da energia elétrica e o custo de manutenção das bombas.[10] Os sistemas de bombeamento consomem a maior quantidade de energia em sistemas de abastecimento de água, geralmente respondendo por mais de 80% do consumo total de energia.[11]

A otimização do custo de energia em sistemas de abastecimento de água pode ser alcançada por meio de várias medidas, como substituição de bombas, mudança na operação da estação de bombeamento, modernização do sistema de tubulações, modelagem computacional de mudanças na operação da rede e seleção de soluções que garantam os melhores efeitos econômicos e técnicos.[9]

A otimização dos WSS apresenta inúmeras aplicações, mas é crucial enfatizar a importância da otimização do agendamento de bombas devido ao considerável consumo de energia associado a este componente essencial do WSS (Cost efficiency in water supply systems: An applied review on optimization models for the pump scheduling problem)

Os sistemas de bombeamento têm um potencial significativo para melhorias de eficiência energética. Em muitos casos, a otimização das operações consideram a velocidade d'água da bombas e a economia de custos pode ser obtida utilizando o padrão de variação do custo da tarifa de energia elétrica ao longo do dia.[11]

As variações horárias na demanda de água durante o dia são muito maiores em comparação à demanda média diária. Para um consumidor doméstico, a necessidade de água é maior durante as horas da manhã e da noite do que a demanda do meio-dia. Durante os horários de pico, o custo de energia é 2 a 3 vezes mais caro do que durante os horários de consumo mínimo.

Uma solução técnica para essa redução pode ser uma diminuição na potência de bombeamento (mesmo parando bombas se for possível) durante os horários de pico, juntamente com uma entrega extensiva fora desses horários. Consequentemente, os sistemas de distribuição devem ser equipados com tanques de armazenamento.

## 2.4 HARD CONSTRAINTS

Hard constraints é um termo utilizado para verificar se certas propriedades são satisfeitas para resolução de problemas de otimização.[12] São como regras não negociáveis.

A satisfação das restrições corresponde à aplicação dos limites de segurança operacional e à adesão às leis físicas, sendo de suma importância[13].

Algoritmos de aprendizado baseados em gradiente permitem otimizar os parâmetros de redes para aproximar qualquer modelo desejado. No entanto, apesar da existência de vários algoritmos avançados de otimização, a questão de impor restrições estritas de igualdade durante o treinamento não foi suficientemente abordada[14].

Aplicar solucionadores tradicionais para otimização geral restrita, como SQP, a redes neurais pode ser não trivial. Como os métodos tradicionais expressam restrições como uma

função de parâmetros aprendíveis, essa formulação se torna extremamente dimensional, não linear e não convexa no contexto de redes neurais[14].

Em operações de sistemas de abastecimento de água é restringida por requisitos mínimos de pressão; limitações de capacidade impostas por bombas, dutos e tanques; e um conjunto de restrições hidráulicas. As restrições hidráulicas que dão origem a complexas formulações mistas inteiras e não lineares. A primeira classe de métodos impõe restrições de pressão e capacidade explicitamente, enquanto as restrições hidráulicas são incluídas implicitamente por meio de ferramentas de simulação de rede de água, como o EPANET. [15]

## 2.5 OPTIMIZATION PROCESS

### 2.5.1 Mathematical Formulation

### 2.5.2 Optimization Methods



# Methodology

## 3.1 PUMP SCHEDULING PROBLEM

Abordagens de otimização: B-GA, RC-SLSQP e DC-SLSQP (Cost efficiency in water supply systems: An applied review on optimization models for the pump scheduling problem)

Como foi feita a otimização (gradiente descendente / equações )

## 3.2 PRESENTING DC3 ALGORITHM

## 3.3 ALGORITHM ARCHITECTURE

## 3.4 EXEMPLOS COM GRAFICO - $x_1$ , $x_2$

# CHAPTER 4

## Results

### 4.1 CASE STUDY 1

# Introdução

*A short description of the chapter.*  
*A memorable quote can also be used.*

## 5.1 ACRÓNIMOS

Primeira e seguintes referências: **h2o!** (**h2o!**), **h2o!**  
 Plural, acrónimo expandido e curto: **h2o!**s, **h2o!**, **h2o!**  
 Com citação<sup>1</sup>: **adsl!** (**adsl!**), **adsl!**

## 5.2 FONTES

- Tiny
- Scriptsize
- Footnotes
- Small
- Normal
- large
- Large
- LARGE
- huge
- Huge

## 5.3 UNIDADES

Utilizando o pacote **siunitx** é possível utilizar unidades do Sistema Internacional. Exemplo: a aceleração da gravidade é de  $9.8\text{ m s}^{-2}$  e um ficheiro ocupa 1 MiB.

---

<sup>1</sup>Necessária entrada na bibliografia

## 5.4 CODE BLOCKS

Uma listagem pode ser apresentada com o ambiente `listing`, que é um float (objeto flutuante, tal como uma figura ou uma tabela).

A listagem em Código ?? mostra um exemplo em C.

**Código 1:** This caption appears below the code.

## 5.5 CITAÇÕES

Algumas formas distintas de citar:

- **Apenas referência:** [1]
- **Apenas data:** 2015
- **Apenas ano:** 2015
- **Apenas autor:** Paluszczyzyn *et al.*
- **Apenas editor:organization**
- **Autor e referência:** Paluszczyzyn *et al.* [1]

# Exemplos

*A short description of the chapter.*  
*A memorable quote can also be used.*

## 6.1 ACRÓNIMOS

Primeira e seguintes referências: **h2o!**, **h2o!**

Plural, acrónimo expandido e curto: **h2o!s**, **h2o!**, **h2o!**

Com citação<sup>1</sup>: **adsl!**, **adsl!**

## 6.2 FONTES

- Tiny
- Scriptsize
- Footnotes
- Small
- Normal
- large
- Large
- LARGE
- huge
- Huge

## 6.3 UNIDADES

Utilizando o pacote **siunitx** é possível utilizar unidades do Sistema Internacional. Exemplo: a aceleração da gravidade é de  $9.8\text{ m s}^{-2}$  e um ficheiro ocupa 1 MiB.

---

<sup>1</sup>Necessária entrada na bibliografia

## 6.4 CODE BLOCKS

Uma listagem pode ser apresentada com o ambiente `listing`, que é um float (objeto flutuante, tal como uma figura ou uma tabela).

A listagem em Código ?? mostra um exemplo em C.

**Código 2:** This caption appears below the code.

## 6.5 CITAÇÕES

Algumas formas distintas de citar:

- **Apenas referência:** [10]
- **Apenas data:** Apr. 2013
- **Apenas ano:** 2013
- **Apenas autor:** Folorunso and Ismail
- **Apenas editor:organization**
- **Autor e referência:**Folorunso and Ismail [10]

# Bibliography

- [1] D. Paluszczyszyn, P. Skworcow, and B. Ulanicki, “Modelling and simulation of water distribution systems with quantised state system methods,” *Procedia Engineering*, vol. 119, pp. 554–563, 2015, Computing and Control for the Water Industry (CCWI2015) Sharing the best practice in water management, ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.908>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815025783>.
- [2] L. A. Rossman, *Epanet user’s manual. version 2.2*, EPA, Risk Reduction Engineering Laboratory. Office of Research and Development. Environmental Protection Agency, 2000.
- [3] M. Davis, R. Janke, and T. Taxon, *Mass imbalances in epanet water-quality simulations*, Apr. 2018. DOI: 10.5194/dwes-11-25-2018.
- [4] M. Hervás, F. Martínez-Alzamora, P. Conejos, and J. C. Alonso, *Advantages of the event method for the simulation of water quality in pressurised water systems*, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/4/599>.
- [5] K. Qian, J. Jiang, Y. Ding, and S. Yang, *Deep learning based anomaly detection in water distribution systems*, 2020. DOI: 10.1109/ICNSC48988.2020.9238099.
- [6] S. Zhao, Z. Li, F. Wang, B. Sun, L. Li, and H. Zhang, *Pressure prediction of water supply network based on 1dcnn-gru-multi-head attention*, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2166/ws.2024.169>.
- [7] H. Yu, S. Lin, H. Zhou, X. Weng, S. Chu, and T. Yu, *Leak detection in water distribution networks based on deep learning and kriging interpolation method*, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.184>.
- [8] Z. Pu, M. Chen, X. Ji, *et al.*, *Intelligent real-time scheduling of water supply network based on deep learning*, Nov. 2023. DOI: 10.2166/aqua.2023.134.
- [9] M. Świętochowska and I. Bartkowska, *Optimization of energy consumption in the pumping station supplying two zones of the water supply system*, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/310>.
- [10] T. Folorunso and F. S. Ismail, “Pump scheduling optimization model for water supply system using awga,” Apr. 2013, pp. 12–17, ISBN: 978-1-4799-0209-5. DOI: 10.1109/ISCI.2013.6612367.
- [11] I. Sarbu, *A study of energy optimisation of urban water distribution systems using potential elements*, 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/8/12/593>.
- [12] Y. Min, A. Sonar, and N. Azizan, *Hard-constrained neural networks with universal approximation guarantees*, 2024. arXiv: 2410.10807 [cs.LG]. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2410.10807>.
- [13] S. Misra, L. Roald, and Y. Ng, *Learning for constrained optimization: Identifying optimal active constraint sets*, 2019. arXiv: 1802.09639 [math.OC]. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1802.09639>.
- [14] F. Zhong, K. Fogarty, P. Hanji, *et al.*, *Neural fields with hard constraints of arbitrary differential order*, 2023. arXiv: 2306.08943 [cs.LG]. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2306.08943>.
- [15] M. K. Singh and V. Kekatos, “Optimal scheduling of water distribution systems,” *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 711–723, 2020. DOI: 10.1109/TCNS.2019.2939651.

# APPENDIX A

## Additional content