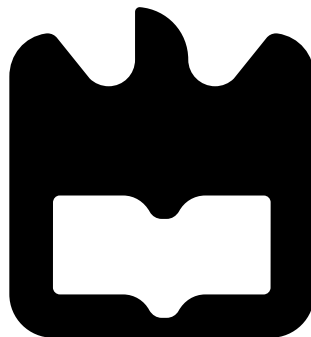




Amílcar Monteiro  
Dos Reis Tavares

Análise Energética e Optimização em Sistemas  
de Abastecimento de Água







**Amílcar Monteiro  
Dos Reis Tavares**

**Análise Energética e Optimização em Sistemas  
de Abastecimento de Água**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor António Gil d'Orey de Andrade Campos, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



**o júri / the jury**

presidente / president

**Professor Doutor Robertt Angelo Fontes Valente**  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

**Professora Doutora Ana Maria Pinto de Moura**  
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor António Gil d'Orey de Andrade Campos**  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro



**Dedicatória /  
Dedication**

Aos meus pais, Eugénia e Fernando  
Aos meus irmãos, Yasser, Fidel, Frantz, Wladimir e Óscar  
À Marzia





## agradecimentos / acknowledgements

É com profunda gratidão que expresso aqui os meus agradecimentos a todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho que culmina uma longa, por vezes tortuosa, por vezes prazeiroza, caminhada:

- Aos meus pais, meus heróis, Fernando Tavares e Eugénia Ana Monteiro, pela educação baseada em regras, princípios e valores que me proporcionaram, pelo amor e apoio incondicional que sempre demonstraram.
- Um agradecimento especial à minha companheira de vida, Marzia Bruno, pelo amor e pela constante presença, auxílio e sacrifício.
- Ao Professor Doutor António Gil d'Orey de Andrade Campos, pela imediata disponibilidade manifestada em orientar este trabalho, pela diligente orientação científica, pelos inspiradores e esclarecedores comentários, e sugestões em todas as fases que levaram à sua concretização.
- Aos meus irmãos, Óscar, Wladimir, Frantz, Fidel e Yasser, por estarem sempre do meu lado e acreditarem sempre em mim.
- Ao Nuno Soares, meu parceiro de muitas batalhas, que sempre me incentivou e deu-me forças quando fraquejava. newline - À Universidade de Aveiro e aos Serviços de Ação Social da Universidade de Aveiro pelo auxílio prestado.
- A todos os meus professores, pelas ferramentas que me transmitiram e que me acompanharão por toda a vida.
- Aos meus colegas do DiMEO-GRIDS, sobretudo a Bernardete e o João, pelos conselhos, esclarecimentos e incentivos.
- Por fim, mas não de somenos importância, aos meus amigos Sandra, Décio, Mário, Luís, Gastão, Mário Lima, João Lopes, Valdemar, Sisenando, Veridiano, Rui, Célia, Sr. Francesco, Emanuela, Paola, Assis, Olga, Sr. Lé, Luísa, Eugénia, Leonildo, João Silva, Carina, Lídia, Mónica, Ulisses, Pedro, Margarida, Fernando, Ângelo, Catarina, Adriana, Jenny, os meus amigos de infância e juventude, e todos aqueles que voluntariamente ou involuntariamente, apoiaram, ajudaram, aconselharam e, porque não, proporcionaram-me estímulo intelectual e emocional nos momentos em que a impotência, a pressão e a frustração eram mais difíceis de suportar. pelos bons momentos passados



## Resumo

Actualmente, em sistemas de distribuição de água é necessário despende energia de forma regular para a acumular sob a forma de energia potencial e utilizá-la quando necessário. O exemplo mais imediato é o do uso das torres de água para criação de pressão na rede ou dos tanques de água para abastecimento de populações. Neste último exemplo, a água é enviada para um ponto de cota mais elevada por meio de bombas. E quando necessário, a água, através da energia potencial gravítica, toma o rumo para o qual é guardada nas torres ou tanques de abastecimento. Nos sistemas actuais é tomado como imperativo a garantia de existência de um nível mínimo de água para qualquer eventualidade. Deste modo, no panorama actual a água é bombeada para as torres ou tanques de abastecimento quando o nível de água dos tanques atinge um valor mínimo. Contudo, esta acção não tem em conta o custo energético que é dependente do ciclo horário. É possível minimizar os recursos energéticos utilizados nestas acções de acordo com o custo energético horário. Quando os sistemas apresentam ramificações e vários equipamentos de bombagem e tanques, a minimização dos recursos energéticos apresenta-se como uma tarefa de elevada complexidade. Este facto é devido ao grande número de variáveis a otimizar e ao comportamento não-linear do sistema. Há uma década, os únicos métodos de optimização utilizados em engenharia eram os métodos clássicos baseados no gradiente. Estes métodos, apesar de serem muito objectivos, são dependentes dos parâmetros iniciais do processo de optimização e só garantem a chegada a mínimos locais. Recentemente, outros métodos de optimização tornaram-se atractivos pela não necessidade da informação do gradiente e porque têm uma grande probabilidade de encontrarem o óptimo global. Desses métodos heurísticos de procura directa destacam-se os métodos inspirados na natureza (Algoritmos Genéticos e Evolucionários, Evolução Diferencial, PSO etc.). Neste trabalho, analisa-se a eficiência de diferentes metodologias de optimização que consigam minimizar os recursos energéticos utilizados nestas acções. Para isso, toma-se como função objectivo a simulação de um ciclo diário actual onde os parâmetros de funcionamento das bombas são as variáveis de optimização e as metodologias de optimização são comparadas de forma a verificar se o valor encontrado é o mínimo global.

Palavras-Chaves: eficiência energética, sistema de abastecimento de água, optimização, algoritmo evolucionário



## Abstract

At present it is necessary to expend energy in water distribution systems on a regular basis to accumulate in the form of potential energy and use when necessary. The most immediate examples are the use of water towers to create pressure in the system, or of water tanks to supply water to the population. In the latter example, water is sent to a point of higher elevation using pumps. And, when necessary, the water, through gravitational energy, follows its course to be stored in water towers or tanks. In current systems it is imperative to guarantee a minimum level of water to cover every eventuality. In this way, in the current landscape, water is pumped to the towers or tanks when the water level in the tanks reaches the minimum level. However, this action does not take into account the energetic cost, which is dependent on cycle time. It is possible to minimize energy resources used in these actions by scheduling pump operation. When systems have many ramifications and various types of pumps and storage tanks the minimization of energy resources becomes a highly complex task. This is due both to the high number of variables to optimize and to the non-linear behaviour of the system. A decade ago the only methods of optimization used in engineering were classical methods based on gradient. These methods, despite being objective, are dependent on initial parameters in the optimization process and only guarantee arrival to local minima. Recently other optimization methods have become attractive as there is no need for gradient information and also because there is high probability of finding the global optimum. These heuristic methods, which include direct search methods, were inspired by nature (Genetic and Evolutionary Algorithms, Differential Evolution, PSO etc.). In this paper, the efficiency of different optimization methodologies, which are able to minimize energy resources used, are analyzed. For this, simulation of a daily cycle is taken as the target action, where the current pump operating parameters are variables in optimization and optimization methods are compared in order to check whether the value found is the global minimum.

Keywords: energy efficiency, water supply system, optimization, evolutionary algorithm



## Résumé

Actuellement, dans le système de distribution d'eau, il est nécessaire de dépenser de l'énergie de façon régulière pour l'accumuler sous forme d'énergie potentielle afin de l'utiliser quand il est nécessaire. L'exemple dans l'immédiat est l'usage des châteaux d'eau pour permettre de créer de la pression dans les tuyaux ou dans les réservoirs pour l'approvisionnement des populations. Pour ce qui concerne le dernier exemple, l'eau est pompée à partir d'un niveau très élevé. En cas de besoin, elle est acheminée au moyen de l'énergie potentielle gravitique vers les châteaux d'eau ou les réservoirs d'approvisionnement. Les systèmes actuels exigent impérativement de garantir l'existence d'un niveau minimum d'eau pour couvrir les besoins urgents. De ce fait, dans le contexte actuel, l'eau est pompée vers les châteaux d'eau ou dans les réservoirs de distribution quand leur niveau est en baisse. Cependant cette action ne prend pas en compte le coût énergétique qui dépend du cycle horaire. Lorsque les systèmes présentent des ramifications et plusieurs équipements de pompage et de réservoirs, la réduction des ressources énergétiques s'avère une tâche très complexe. Cela est dû à un nombre très élevé de variables à optimiser ainsi que le comportement non-linéaire du système. Depuis une décennie, les seules méthodes d'optimisation utilisées en ingénierie étaient des méthodes très classiques basées sur le gradient. Ces méthodes malgré leur objectivité sont dépendantes des paramètres qui débutent le procédé d'optimisation et ne garantissent qu'un accès local très limité. Récemment d'autres méthodes d'optimisation se sont révélées très attractives par l'absence d'information du gradient parce qu'elles ont démontré dans l'ensemble une importante probabilité dans l'obtention d'un résultat optimal. D'autre part, des méthodes heuristiques de recherche directe se détachent de celles inspirés par la nature (Algorithmes Génétiques et Évolutionnaires, Évolution Différentiel, PSO etc.). La réalisation de ce travail permet d'analyser l'efficacité de différentes méthodologies d'optimalité qui parviennent à réduire les ressources énergétiques utilisées dans les différentes actions. De ce fait, la fonction objective est la simulation d'un cycle actuel au quotidien où les paramètres de fonctionnement des pompes sont des variables d'optimisation ainsi que des méthodologies d'optimisation comparées de façon à vérifier si la valeur retrouvée équivaut au minimum global.

Mots-Clés: efficacité énergétique, système de distribution d'eau, optimisation, algorithme évolutionnaire





## Riassunto

Attualmente, in sistemi di distribuzione d'acqua é necessario utilizzare l'energia in forma regolare per accumularla sotto forma di energia potenziale e utilizzarla quando necessaria. L'esempio piú immediato é l'uso delle torri d'acqua per la creazione di pressione nelle reti o nelle cisterne d'acqua per il rifornimento delle popolazioni. In questo ultimo esempio, l'acqua é inviata per un punto di quota piú alto attraverso le pompe. E quando necessario, l'acqua, attraverso l'energia potenziale di gravitá, assume la direzione che é conservata nelle torri o nelle cisterne di rifornimento. Nei sistemi attuali é considerato come obbligatoria la garanzia dell'esistenza di un livello minimo d'acqua per qualsiasi eventualitá. In questo modo, nella panoramica attuale l'acqua é pompata verso le torri o verso le cisterne di rifornimento quando il livello d'acqua delle cisterne atinge un valore minimo. Nonostante tutto, questa azione non tiene conto il costo energetico che dipende dal ciclo orario. É possibile minimizzare le risorse energetiche utilizzate in queste azioni d'accordo con il costo energetico orario. Quando i sistemi presentano ramificazioni e varie attrezzature di pompaggio e cisterne, la minimizzazione delle risorse energetiche si presenta come un compito di elevata complessitá. Questo fatto é dovuto al grande numero di variabili ad ottimizzare e dal comportamento non lineare del sistema. Da dieci anni, gli unici metodi di ottimizzazione utilizzati in ingegneria erano i metodi classici basati nel gradiente. Questi metodi nonostante siano molto obbiettivi, sono dipendenti da parametri iniziali di un processo di ottimizzazione e solo garantiscono l'arrivo a minimi locali. Recentemente, altri metodi di ottimizzazione sono risultati attrattivi dovuti alla non necessitá di sapere l'informazione del gradiente e perché c'é una grande probabilitá di trovare un ottimo globale. Di questi metodi euristici di procura diretta si evidenziano i metodi ispirati dalla natura (Algoritmi Genetici e Evoluzionari, Evoluzione Differenziale, PSO ecc.). In questo lavoro, si analizza l'efficienza di diverse metodologie di ottimizzazione sono confrontate in modo da verificare se il valore trovato é il minimo globale.

Parole-Chiavi: efficienza energetica, sistema di rifornimento d'acqua, ottimizzazione, algoritmo evolutivo.



# Índice

	Página
Índice de Ilustrações	v
Índice de Tabelas	vii
Índice de Pseudocódigos	ix
Índice de Abreviaturas	xi
<b>I Introdução</b>	<b>1</b>
<b>1 Preâmbulo</b>	<b>3</b>
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução . . . . .	7
2.2 Sistemas de Distribuição de Água . . . . .	14
2.3 Simulação Hidráulica . . . . .	15
2.3.1 Modelação Matemática . . . . .	16
2.3.1.1 Redes Malhadas . . . . .	20
2.3.1.2 Bombas Hidráulicas . . . . .	21
2.4 Fundamentos de Optimização . . . . .	22
2.4.1 Introdução . . . . .	22
2.4.2 Técnicas Clássicas de Optimização . . . . .	24
2.4.2.1 Programação Matemática Linear . . . . .	26
2.4.2.2 Programação Matemática Não Linear . . . . .	28
2.4.3 Técnicas Modernas de Optimização . . . . .	31

## ÍNDICE

---

2.4.3.1	Algoritmo Genético (GA)	32
2.4.3.2	Evolução Diferencial (DE)	34
2.4.3.3	Optimização por Enxame de Partículas (PSO)	35
2.4.3.4	Optimização por Colónia de Formigas (ACO)	37
2.4.3.5	Recozimento Simulado (SA)	39
2.4.3.6	Metaheurísticas	41
2.5	Técnicas de Optimização Multiobjectivo	42
2.6	Optimização por Enumeração Total e Tentativa e Erro	44
2.7	Notas Finais	45
<b>II</b>	<b>Metodologia</b>	<b>47</b>
<b>3</b>	<b>Estudo de Algoritmos Seleccionados</b>	<b>49</b>
3.1	Algoritmos Seleccionados no Âmbito da Dissertação	49
3.1.1	HDEPSO	50
3.1.2	GA-MPC	51
3.2	Funções Matemáticas Para Análise Comparativa	52
3.2.1	Função de Ackley	52
3.2.2	Função de Himmelblau	52
3.2.3	Função de Rastrigin	55
3.2.4	Função de Rosenbrock	55
3.2.5	Função de Salomon	56
3.2.6	Função de Schwefel	57
3.2.7	Avaliação Comparativa de Resultados	57
<b>4</b>	<b>Modelação Matemática e Implementação</b>	<b>59</b>
4.1	Metodologia Geral	59
4.2	Formulação e Representação do Problema Específico	60
4.2.1	Descrição da Função Objectivo	60
4.2.2	Tratamento das Restrições	64
4.3	Método da Caixa Negra	67
4.4	Notas Finais	67

<b>III</b>	<b>Validação e Discussão</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>Apresentação e Interpretação dos Resultados</b>	<b>71</b>
5.1	Modelação das Redes Hidráulicas Propostas . . . . .	71
5.1.1	Apresentação da Rede de Distribuição Primária . . . . .	72
5.1.2	Apresentação da Rede de Distribuição Walski 173 . . . . .	77
5.1.3	Apresentação da Rede de Distribuição Walski 489 . . . . .	82
5.1.4	Apresentação da Rede de Distribuição Walski 492 . . . . .	86
5.2	Resultados Analíticos da Rede Primária . . . . .	91
5.3	Resultados do Algoritmo HDEPSO . . . . .	93
5.3.1	Performance Perante a Rede Primária . . . . .	94
5.3.2	Performance Perante a Rede Walski 173 . . . . .	95
5.3.3	Performance Perante a Rede Walski 489 . . . . .	98
5.3.4	Performance Perante a Rede Walski 492 . . . . .	100
5.4	Resultados do Algoritmo GA-MPC . . . . .	101
5.4.1	Validação do Algoritmo GA-MPC . . . . .	102
5.4.2	Performance Perante a Rede Primária . . . . .	103
5.4.3	Performance Perante a Rede Walski 173 . . . . .	105
5.4.4	Performance Perante a Rede Walski 489 . . . . .	107
5.4.5	Performance Perante a Rede Walski 492 . . . . .	109
5.5	Resumo de Resultados e Comparação . . . . .	110
5.6	Notas Finais . . . . .	112
<b>6</b>	<b>Discussão Final, Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>113</b>
<b>IV</b>	<b>Apêndices</b>	<b>117</b>
	<b>Ficheiros de Input no EPANET</b>	<b>119</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>145</b>
	<b>Índice Remissivo</b>	<b>155</b>

## ÍNDICE

---

# Índice de Ilustrações

3.1	Traçado da Rede “New York Tunnel (NYT)” . . . . .	50
3.2	Função de Ackley. . . . .	54
3.3	Função de Himmelblau . . . . .	54
3.4	Função de Rastrigin . . . . .	55
3.5	Função de Rosenbrock . . . . .	56
3.6	Função de Salomon . . . . .	56
3.7	Função de Schwefel . . . . .	57
4.1	Integração dos Módulos de Otimização e Simulação . . . . .	67
5.1	Traçado da Rede de Distribuição Primária . . . . .	73
5.2	Dados Operacionais da Rede de Distribuição Primária . . . . .	76
5.3	Traçado da Rede de Distribuição Walski 173 . . . . .	77
5.4	Padrões Temporais de Consumos da Rede de Distribuição Walski 173 . . . . .	80
5.5	Dados Operacionais da Rede de Distribuição Walski 173 . . . . .	82
5.6	Traçado da Rede de Distribuição Walski 489 . . . . .	83
5.7	Dados Operacionais da Rede de Distribuição Walski 489 . . . . .	85
5.8	Traçado da Rede de Distribuição Walski 492 . . . . .	87
5.9	Dados Operacionais da Rede de Distribuição Walski 492 . . . . .	91
5.10	Cenário 1 de Otimização da Rede Primária por Tentativa e Erro. . . . .	92
5.11	Cenário 2 de Otimização da Rede Primária por Tentativa e Erro. . . . .	93
5.12	Velocidade de Convergência do HDEPSO na Rede Primária. . . . .	94
5.13	Resultado da Aplicação do HDEPSO na Rede Primária. . . . .	95
5.14	Velocidade de Convergência do HDEPSO na Rede Walski 173. . . . .	96
5.15	Resultado da Aplicação do HDEPSO na Rede Walski 173. . . . .	97

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

---

5.16	Velocidade de Convergência do HDEPSO na Rede Walski 489. . . . .	98
5.17	Resultado da Aplicação do HDEPSO na Rede Walski 489. . . . .	99
5.18	Velocidade de Convergência do HDEPSO na Rede Walski 492. . . . .	100
5.19	Resultado da Aplicação do HDEPSO na Rede Walski 492. . . . .	101
5.20	Evoluções da Função Objectivo em FORTRAN e MATLAB <sup>®</sup> . . . . .	102
5.21	Velocidade de Convergência do GA-MPC na Rede Primária. . . . .	103
5.22	Resultado da Aplicação do GA-MPC na Rede Primária. . . . .	104
5.23	Velocidade de Convergência do GA-MPC na Rede Walski 173. . . . .	105
5.24	Resultado da Aplicação do GA-MPC na Rede Walski 173. . . . .	106
5.25	Velocidade de Convergência do GA-MPC na Rede Walski 489. . . . .	107
5.26	Resultado da Aplicação do GA-MPC na Rede Walski 489. . . . .	108
5.27	Velocidade de Convergência do GA-MPC na Rede Walski 492. . . . .	109
5.28	Resultado da Aplicação do GA-MPC na Rede Walski 492. . . . .	110



# Índice de Tabelas

3.1	Performance dos algoritmos quando aplicados às funções matemáticas . . .	58
5.1	Características do Traçado da Rede Primária . . . . .	73
5.2	Dados dos Nós de Junção da Rede Primária . . . . .	74
5.3	Padrões Temporais de Consumo da Rede Primária . . . . .	74
5.4	Dados das Condutas da Rede Primária . . . . .	74
5.5	Parâmetros dos Reservatórios da Rede Primária . . . . .	75
5.6	Pontos da Curva Característica da Bomba da Rede Primária . . . . .	75
5.7	Padrões Temporais da Tarifa Energética da Rede Primária . . . . .	76
5.8	Características do Traçado da Rede Walski 173 . . . . .	78
5.9	Dados dos Nós de Junção da Rede Walski 173 . . . . .	78
5.10	Padrões Temporais de Consumo da Rede Walski 173 . . . . .	79
5.11	Dados das Condutas da Rede Walski 173 . . . . .	81
5.12	Parâmetros dos Reservatórios da Rede Walski 173 . . . . .	81
5.13	Pontos da Curva Característica da Bomba da Rede Walski 173 . . . . .	82
5.14	Características do Traçado da Rede Walski 489 . . . . .	82
5.15	Dados dos Nós de Junção da Rede Walski 489 . . . . .	84
5.16	Dados das Condutas da Rede Walski 489 . . . . .	85
5.17	Parâmetros dos Reservatórios da Rede Walski 489 . . . . .	86
5.18	Pontos da Curvas Características das Bombas da Rede Walski 489 . . . . .	86
5.19	Características do Traçado da Rede Walski 492 . . . . .	86
5.20	Dados dos Nós de Junção da Rede Walski 492 . . . . .	88
5.21	Dados das Condutas da Rede Walski 492 . . . . .	89
5.22	Parâmetros dos Reservatórios da Rede Walski 492 . . . . .	90
5.23	Pontos da Curva Característica da Bomba da Rede Walski 492 . . . . .	90

## ÍNDICE DE TABELAS

---

5.24 Resultados da Avaliação Comparativa na Rede Primária . . . . .	92
5.25 Performance do GA-MPC quando codificado em FORTRAN e MA- TLAB <sup>®</sup> . . . . .	103
5.26 Performance dos algoritmos quando aplicados às quatro redes . . . . .	111
5.27 Intensidade Energética Antes e Depois da Optimização . . . . .	111
5.28 Taxa de Utilização da(s) Bomba(s) Antes e Depois da Optimização . . . .	112

# Índice de Pseudocódigos

1	Estrutura abstracta de um algoritmo clássico . . . . .	25
2	Método Simplex . . . . .	27
3	Algoritmo Genético (GA) . . . . .	33
4	Evolução Diferencial (DE) . . . . .	36
5	Optimização por Enxame de Partículas (PSO) . . . . .	38
6	Optimização por Colónia de Formigas (ACO) . . . . .	39
7	Recozimento Simulado (SA) . . . . .	41
8	Estrutura abstracta de um algoritmo metaheurístico . . . . .	42
9	Híbrido de DE com PSO (HDEPSO) . . . . .	51
10	Genetic Algorithm with a New Multi-Parent Crossover (GA-MPC) . . . .	53

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

---

# Índice de Abreviaturas

**ACO**      Otimização por Colônia de Formigas, “Ant Colony Optimization” em inglês.

**DE**        Evolução Diferencial, “Differential Evolution” em inglês.

**GA**        Algoritmo Genético, “Genetic Algorithm” em inglês.

**GA-MPC**   Genetic Algorithm with a New Multi-Parent Crossover

**HDEPSO**   Híbrido de Evolução Diferencial e Otimização por Enxame de Partículas.

**PSO**      Otimização por Enxame de Partículas, “Particle Swarm Optimization” em inglês.

**SA**        Recozimento Simulado, “Simulated Annealing” em inglês.

**SAA**      Sistema de Abastecimento de Água

**SDA**      Sistema de Distribuição de Água

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

---

## Parte I

# Introdução





# 1

## Preâmbulo

Enquanto o poço não seca, não sabemos dar valor à água.

---

Thomas Fuller (1654–1734)

Avaliar as alternativas disponíveis, escolher uma opção, implementar a decisão, acompanhar o processo e aprender com os resultados são etapas que as pessoas, consciente ou inconscientemente, cumprem no seu quotidiano quando procuram, por exemplo, por um trajecto mais curto, produzir mais e melhor dentro do mais curto espaço de tempo ou baixar as facturas da água, electricidade e gás domésticos. Porventura, é uma característica intrinsecamente humana a procura pela melhor opção. O Dicionário da Língua Portuguesa Contemporânea da Academia das Ciências de Lisboa [17] define “optimizar” como:

## 1. PREÂMBULO

---

*Fazer atingir ou atingir as condições ou o rendimento melhor, mais elevado ou vantajoso; fazer ou sofrer optimização. Optimizar os resultados da empresa. Os recursos do país optimizam-se.*

Por conseguinte, nesta dissertação propõe-se analisar Sistemas de Distribuição de Água (SDA) e as suas idiossincrasias, manusear um instrumento de simulação hidráulica e verificar, aplicar e assimilar métodos de optimização, objectivando principalmente atrelar estes dois mecanismos de jeito e molde que produzam um rendimento melhor ou mais vantajoso em termos energéticos desses sistemas. Por essa razão, faz-se ao longo deste texto a explanação da base teórica dos mecanismos mencionados acima bem como as suas naturezas e características, procede-se ao levantamento da investigação relevante que já se fez e se faz neste campo, implementa-se tais mecanismos num ambiente teórico e controlado onde observa-se certos e determinados pressupostos e, por fim, apresenta-se e discute-se os resultados obtidos e propõe-se trabalhos futuros.

Efectivamente, o Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE) [20] propõe um conjunto alargado de programas e medidas tendentes à eficiência na utilização final de energia. O Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA) [23] reconhece que “o uso eficiente da água é um assunto da maior importância e deverá merecer a primazia nas políticas e programas de recursos hídricos”. Adicionalmente, o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (PEAASAR II) 2007-2013 [68] procura abarcar cerca de 95% da população total de Portugal com sistemas de abastecimento de água, reconhece problemas de natureza operacional, estabelece a necessidade em optimizar a gestão operacional das redes municipais de água e enfoca a eliminação dos custos de ineficiência, sabendo-se que o custo global das operações de produção, transporte e distribuição dos 7.500 milhões de m<sup>3</sup> de água consumidos pela sociedade em 2001 estava estimado em 1.880 milhões €/ano, o que representava 1,65% do Produto Interno Bruto português. Por outro lado, a factura energética da EPAL representou 25% do total dos fornecimentos e serviços externos em 2010, tendo crescido 9,3% face a 2009 [18], sendo que as suas nove instalações consumidoras intensivas de energia foram responsáveis por 86,5% do total de energia eléctrica consumida pela empresa e as estações elevatórias foram responsáveis por 72% desse valor. Em 2011, a empresa teve um custo energético de 12 milhões € [19]. Naturalmente, a eficiência da utilização da água, situada nos 60%, os custos de

---

funcionamento, exploração, manutenção, reparação e renovação de tais sistemas sustentam a necessidade imperiosa de intervenção através de projectos inovadores, eficazes e eficientes.

Tendo como ponto de partida trabalhos anteriores levados a cabo e a constatação de que boas políticas implementadas no passado e processos de tentativa e erro ainda são utilizados na gestão operacional de SDA [87], materializou-se uma metodologia de carácter básica, dedutiva e quantitativa por forma a lograr os objectivos. No que diz respeito ao processo básico, importa referir que o intuito deste trabalho não é aplicar em instâncias práticas os procedimentos estudados e as conclusões inferidas. Em termos do processo dedutivo, procura-se confirmar a hipótese que estabelece que, idealmente, as unidades de bombagem devem estar desligadas ou parcialmente desligadas no período cuja tarifa é maior, impondo assim ao sistema o recurso à água armazenada nas torres de água por forma a satisfazer os consumos. Por último, o processo é quantitativo porque as hipóteses formuladas e as variáveis que influem no seu todo permitirão unicamente aquilatar os resultados.

Esta Dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos. No presente capítulo faz-se a introdução, o enquadramento, apresenta-se a motivação que dá a sua existência e os objectivos que se esperam almejar. No segundo capítulo explica-se com alguma minúcia o Estado da Arte no que diz respeito aos sistemas de distribuição de água, aborda-se os conceitos básicos da simulação de sistemas hidráulicos e apresenta-se alguns fundamentos da optimização enquanto o terceiro aborda os algoritmos de optimização seleccionados para a efectivação dos objectivos preconizados. O quarto capítulo está reservado à modelação matemática dos objectos de estudo, faz-se a implementação dos mecanismos que levarão a resultados que são apresentados no quinto capítulo. A reflexão, ilações e propostas que contribuem para a realização de trabalho futuro serão desdobradas no sexto capítulo. O sétimo e último capítulo está destinado à apresentação de conteúdos relevantes para a compreensão do trabalho feito.

## 1. PREÂMBULO

---

# 2

## Estado da Arte

Se tens que lidar com a água,  
consulta primeiro a experiência,  
depois a razão.

---

Leonardo da Vinci (1452–1519)

### 2.1 Introdução

Descobertas arqueológicas na ilha de Creta (Grécia) confirmam a existência de Sistemas de Distribuição de Água (SDA) há cerca de 3.500 anos. Por outro lado, estima-se que as tubagens de Anatólia (Turquia) tenham cerca de 3.000 anos [64] e documentos do Comissário da Água de Roma, Sexto Júlio Frontino, apontam nove aquedutos que totalizavam 420 km de comprimento e possuíam tubagens feitas de chumbo com diâmetros

## 2. ESTADO DA ARTE

---

compreendidos entre 20 e 600 mm. Essa rede transportava 1 milhão de metros cúbicos de água por dia e abastecia os 1,2 milhões de habitantes da cidade-estado com cerca de 500 litros por pessoa por dia [40].

Porém, o controlo operacional óptimo de tais sistemas era algo raro até aos anos 60 devido ao laborioso trabalho e tempo envolvidos no processo. Eram empregues métodos empíricos ou de tentativa e erro aliados à capacidade crítica e ao bom senso da engenharia, num tempo onde os avanços computacionais não permitiam uma resposta aos modelos analíticos de elevada complexidade. O “The Harvard Water Program” (1955-1972) [61] é considerado pioneiro no emprego da computação no exame de sistemas hídricos ao apresentar novas técnicas de análise multicritérios que consensualizam objectivos económicos, formalismos da engenharia e planeamento governamental. Este programa estabeleceu uma abordagem de trabalho interdisciplinar para o desenvolvimento dos recursos hídricos ao tratar de uma forma sistemática factores determinantes como o desenho da rede, as fontes de água, a capacidade de processamento e melhoria da qualidade da água e a distribuição de água aos consumidores. Tal marco resultou na necessidade de também estudar-se parâmetros como as características do regime de escoamento, a estrutura da rede através dos diâmetros das tubagens e as restrições decorrentes da necessidade de satisfazer critérios de engenharia, geologia e padrões de consumo. O responsável pelo programa, Arthur Maass, é considerado o fundador da Hidroeconomia ao investigar os aspectos metodológicos associados à estimativa de custos, benefícios socioeconómicos e impactos no desenvolvimento que projectos hídricos acarretam [60, 78].

No início da década de 70, a optimização de custos dos projectos de investimento e o controlo computadorizado completo de SDA ainda estavam previstos para o futuro [43]. Entretanto, os primeiros cálculos numéricos envolvendo o balanço da pressão e caudal em tais sistemas eram feitos manualmente com recurso a processos iterativos como o Método de Hardy Cross [14], o de Newton-Raphson [63] e a Teoria Linear [101], tipificados e exemplificados por Swamee & Sharma [93]. O desenvolvimento nesta área deu-se, num primeiro momento, quando Jeppson [45] traduziu num programa em FORTRAN a análise de redes de distribuição utilizando o Método de Hardy Cross em 1976. Num segundo momento, o Método do Gradiente Modificado foi apresentado em 1987 por Todini e Pilati [95], provando que o cumprimento simultâneo do equilíbrio nodal e a

relação entre o caudal e as perdas de carga são condições necessárias para a estacionariedade do sistema. Este algoritmo ganhou notoriedade devido à sua rápida e notável capacidade de convergência, de tal maneira, que Rossman aplicou-o em 1993 [82] com sucesso no simulador hidráulico EPANET, que hoje é um dos mais populares no seu segmento.

Os avanços computacionais e a necessidade de estudar o comportamento hidráulico dos SDA, ancorada na necessária análise económica à sua performance, motivaram a necessidade de acoplar os modelos de simulação aos de optimização. No entanto, a resolução de problemas computacionais sujeita-se aos recursos exigidos por um algoritmo passível de implementação. Assim, com relação à classe de problemas, é difícil determinar se há algum método computacional que leve à solução de um determinado problema, mas se tal problema poder ser resolvido eficientemente, o seu tempo de resolução é chamado de polinomial. Assim, o tempo polinomial é o critério usado na definição das classes de problemas e existem três: N, NP e NP-Difícil (NP-Hard). No que diz respeito à classe de problemas P, esta é definida por todos os problemas que podem ser resolvidos em tempo polinomial. Em termos da classe de problemas NP, esta é definida por todos os problemas que podem ser verificados por um algoritmo de tempo polinomial. Se por um lado,  $P \subseteq NP$ , por outro, não há a certeza de que  $P = NP$ . Isto é, verificar se uma solução é correcta em tempo polinomial não garante a existência de um algoritmo que o resolva em tempo polinomial. Acredita-se que  $P \neq NP$  mas ainda não existem provas definitivamente conclusivas e nessa premissa, a classe NP possui uma sub-classe de problemas chamada de NP-Completo que é o conjunto de problemas mais difícil de resolver dentro dessa classe. Certamente, há problemas ainda mais difíceis de resolver pois não estão situados em NP e são chamados de problemas NP-Difíceis (NP-Hard). Por fim, muitos dos problemas para os quais não se conhecem algoritmos polinomiais, reduzem-se polinomialmente uns aos outros de tal forma que se um deles tiver um algoritmo polinomial todos os outros têm.

Geralmente, o problema de optimização derivado de um SDA é marcadamente um problema NP-Hard. Por outras palavras, é extremamente difícil obter a sua solução óptima num tempo computacional aceitável através de algoritmos exactos [75, 94], atendendo que um algoritmo só é viável se puder ser calculado em tempo útil e não se conhece algoritmos polinomiais para muitas aplicações práticas, por isso, classificadas de “intratáveis”. Por conseguinte, perante dois ou mais processos de cálculo para

## 2. ESTADO DA ARTE

---

solucionar o mesmo problema, é mais sensato escolher aquele que obtém uma solução no menor tempo possível e que utiliza a menor quantidade de espaço para representação dos dados do problema. Assim, existe uma série de técnicas para lidar com tais problemas NP-Completo, nomeadamente, Algoritmos de Aproximação, Programação Dinâmica e Algoritmos Aleatórios. No entanto, dependendo da situação, alguns são mais adequados do que outras.

Os trabalhos de Karp [48] apontam muitos exemplos de problemas em que o uso de processos estocásticos permite conceber algoritmos mais *eficientes* e *simples*. Segundo Motwani & Raghavan [70] para muitas aplicações um algoritmo aleatório é o algoritmo mais simples ou mais rápido disponível e, por vezes, é ambas as coisas. Assim, se se permitir o recurso a tais fenómenos estocásticos vastamente estudados e a interacção baseada em princípios darwinistas, parece ser possível encontrar problemas que não estão em NP. Tais algoritmos são chamados de heurísticos<sup>1</sup> e estão fundados em conceitos biológicos como a sobrevivência dos mais aptos e a reprodução com variação. São usados na resolução de problemas NP-completos mas, por outro lado, não produzem garantidamente uma solução óptima mas sim uma que é percebida como próxima da optimalidade. No entanto, a definição de “proximidade da solução óptima” depende do problema e a introdução do conceito de função Lagrangeana aumentada, usada em diversas aplicações da engenharia no manuseamento das restrições, pode, em muitos casos, simplificar o problema definido pela função objectivo.

A primeira sugestão da aplicação da programação linear no dimensionamento e funcionamento de um reservatório de água foi feita por Dorfman [61] em 1962, um dos responsáveis pelo “The Harvard Water Program”. Nessa época de despontamento para a problemática da optimização de operação e manutenção de infra-estruturas de distribuição de água, foram produzidos trabalhos dignos de realce, nomeadamente, por Karmeli *et al.* [47], Schaake & Lai [85], Deb & Sarkar [21] e Liang [55] cujo foco esteve no dimensionamento de redes ramificadas simples que continham determinados padrões de consumo. O passo significativo seguinte foi dado por Alperovits & Shamir [3] ao estudarem redes malhadas com várias combinações de caudal e padrões de consumo, abordando de forma inovadora a redução de custos operativos em SDA através do algoritmo *Linear Programming Gradient* (LPG) cuja estratégia consistia na redução da

---

<sup>1</sup>Do grego “heuriskein” que significa descobrir



complexidade de um problema não-linear através da resolução de uma sequência de sub-problemas lineares e encontrar uma solução por iteração entre fases. Seguidamente, as fragilidades deste método foram evidenciadas e o procedimento foi melhorado nos anos 80 por Quindry *et al.* [79], Morgan & Goulter [69], Fujiwara *et al.* [33], Kessler & Shamir [50] e Fujiwara & Khang [32]. Seguindo outra linha de pesquisa, Gessler [34, 35, 36] usou um modelo de simulação hidráulica para filtrar e enumerar todas as soluções viáveis de dimensionamento de uma pequena rede de distribuição ao considerar o diâmetro como uma variável discreta. O trabalho de Lansey & Mays [52] seguiu o mesmo raciocínio mas recorrendo a um modelo de optimização baseado numa extensão não-linear do Método Simplex, o algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG2) concebido por Lasdon & Waren [53] e Lasdon *et al.* [54].

No entanto, a maior parte das abordagens promissoras dos anos 80 não funcionavam em problemas de grande escala. Assim, algumas investigações dos anos 90 começaram a ponderar alternativas ao recurso às técnicas exactas de programação matemática perante a severa exigência computacional por parte dos problemas complexos de optimização. Então, novas técnicas de optimização de inspiração biológica baseadas nas principais características desses sistemas (auto-reparação, auto-orientação, reprodução, aprendizagem e evolução), começaram a ganhar espaço e um dos primeiros trabalhos versando a aplicação de um Algoritmo Genético (GA) no dimensionamento de um SDA que se conhece data-se de 1993 e atribui-se a Murphy *et al.* [71]. Subsequentemente, Simpson *et al.* [89] fizeram uma análise comparativa entre AG, a enumeração completa de Gessler [36] e um procedimento de programação não-linear, provando a superioridade do primeiro sobre os demais.

A transformação gradual e progressiva neste campo continuou com Loganathan *et al.* [57] que aliaram dois esquemas de busca global na procura da óptima distribuição global de caudais pelas tubagens: o Multistart Search (MS) (utilizado na optimização local para aumentar a confiança na solução obtida) e o Recozimento Simulado (SA) (método probabilístico apresentado de forma independente por Kirkpatrick *et al.* [51] e Černý [97] que emula o processo físico em que um sólido é arrefecido lentamente até chegar a um estado de energia mínima). Kennedy & Eberhart [49] inspiraram-se em sistemas biológicos e apresentaram o conceito de Optimização por Enxame de Partículas (PSO) tendo como modelo o comportamento de grupos de organismos durante a procura por alimentos. Price *et al.* [77] apresentaram no mesmo ano um algoritmo estocástico para

## 2. ESTADO DA ARTE

---

otimização global em espaços contínuos, o “Differential Evolution” (Evolução Diferencial), que consiste num mecanismo de mutação diferencial, num processo aparentemente simples e fiável onde é dispensado o conhecimento das derivadas da função objectivo e poucos parâmetros são deixados ao critério do utilizador. Graeme *et al.* [38] apresentaram um GA estruturalmente melhorado que chegou à melhor solução até então conhecida para a clássica rede de distribuição “New York Tunnel (NYT)”. Dorigo *et al.* [27] apresentaram o “Artificial Ant Colony” (AAC), um abordagem bio-inspirada para problemas complexos de optimização combinatória que tem como base o comportamento duma colónia de formigas. Savic & Walters [84] apresentaram o GANET, uma ferramenta projectada para o planeamento e gestão de SDA cujo núcleo é um algoritmo genético, que se provou ser eficaz na minimização de custos e na detecção de inconsistências no desempenho da rede. Solomatine [90] e Solomatine [90] desenvolveram o GLOBE, uma ferramenta que integra vários métodos de optimização global, nomeadamente duas estratégias de pesquisa aleatória controlada, um algoritmo genético e um esquema adaptivo agrupante de cobertura com busca local, concluindo que os métodos de optimização global podem ser utilizados de forma eficiente na optimização não só do dimensionamento mas também da operação, manutenção e demais aspectos inerentes à distribuição de água, sugerindo que melhores resultados podem provavelmente ser conseguidos através da “adaptação estrutural” (hibridismo). Cunha & Sousa [15] empregaram o Recozimento Simulado (SA) na optimização de redes de distribuição de água ao compararem os resultados obtidos com aqueles de outros estudos que empregaram outras abordagens de optimização e demonstraram que a heurística é capaz, de uma forma expedita, lidar com este tipo de problema. Kapelan *et al.* [46] usaram um algoritmo genético multiobjectivo baseado na dominância de Pareto para encontrar locais de rede ideais para a colocação de aparelhos de medição para, numa fase posterior, serem usados na calibração do modelo hidráulico. Maier *et al.* [62] aplicaram a Optimização por Colónia de Formigas (ACO) num sistema de distribuição de água cujos resultados indicam que os ACO são alternativas consistentes aos GA no dimensionamento óptimo de SDA não só em termos de eficiência computacional mas também na capacidade de encontrar soluções globais próximas da optimalidade. Eusuff & Lansey [30] apresentaram o Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA), um esquema memético natural metaheurístico que fundamenta-se na dinâmica e interacção de sapos que, aliado ao EPANET, abordou o dimensionamento de tubagens, concluindo que a metodologia usada pode ser

usada de forma eficaz no planeamento de complexos sistemas de rede de distribuição. Por fim, Liong & Atiquzzaman [56] aplicaram o Shuffled Complex Evolution (SCE), – algoritmo evolutivo que efectua procuras local e global ao juntar os conceitos de Nelder-Mead, a busca aleatória controlada, princípios de algoritmos genéticos e a remistura de soluções – na minimização de custos de uma rede de distribuição de água através do redimensionamento de diâmetros.

Hoje, a Computação Evolutiva é já um paradigma na optimização e diversas matérias têm estado no fulcro da investigação à volta do desenvolvimento dos AE na última década, década essa marcada por um rápido crescimento na investigação e desenvolvimento nesse campo. Uma dessas matérias é a estabilidade da estrutura de algoritmos e o desempenho computacional que justifica o recurso à Computação Distribuída para a execução de aplicações cooperantes em máquinas configuradas em rede. A crescente complexidade dos problemas põe desafios acrescidos aos algoritmos, estimulando a pesquisa no campo da representação e avaliação de problemas complexos. Outra área de pesquisa de vital importância tem a ver com os métodos de manipulação de restrições assim como a optimização multiobjectivo, que mostra tendência para ser uma das áreas mais promissoras de pesquisa, ao abordar a parte estrutural dos algoritmos onde um operador de selecção, baseado na dominância de Pareto, e um operador de reprodução são utilizados de forma iterativa. Por outro lado, a meta-heurística tem sido um terreno fértil para a produção de processos evolucionários e uma área de investigação interdisciplinar que tem estado em voga é a Coevolução, sugerida por Hillis [39], cujos princípios estão fundados nas interacções ecológicas e na adaptação recíproca entre duas espécies onde cada uma exerce pressão selectiva sobre a outra, evoluindo em resposta aos desafios postos através de relações ecológicas como predador–presa e parasita–hospedeiro, entre espécies competitivas e espécies mutualistas, onde o “fitness” de um indivíduo pode depender do de outros indivíduos e da interacção com demais indivíduos.

Por um lado, reconhece-se que os Algoritmos Evolucionários são bons exploradores enquanto os Algoritmos de Busca Local são maus exploradores. Por outro lado, os de Busca Local são bons aproveitadores enquanto os Evolucionários são maus aproveitadores. Como consequência, um novo ramo de pesquisa pretende juntar a fiabilidade da procura global à precisão da procura local, intentando um equilíbrio que resulte na robustez do método, por outras palavras, a ideia está no ganho de experiência através da exploração do espaço de procura e no aproveitamento do conhecimento obtido.

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Com vista à criação de algoritmos de optimização robustos para problemas de “caixa negra”, alguma investigação está envolvida em desenvolver EA auto-adaptativos, algoritmos que adaptam-se dinamicamente às características do problema, variando o tamanho da população, a pressão de selecção, a representação e os demais operadores reprodutivos [42].

### 2.2 Sistemas de Distribuição de Água

A finalidade dos sistemas municipais de distribuição de água, definidos como conjuntos de tubagens e elementos acessórios, é transportar água potável desde duma instalação de tratamento de água até às residências dos consumidores e às instalações dos agentes económicos, educativos, desportivos, culturais e demais. Não de somenos importância é a necessidade de fornecer água para bocas de incêndio de forma a providenciar à população um nível eficaz de protecção contra incêndios. Esses sistemas também servem para fornecer água a serviços como a limpeza de ruas, manutenção de parques, fontanários, bebedouros e demais pontos de utilização de água. O seu funcionamento rege-se por três requisitos principais: atender às necessidades de consumo da população enquanto mantém níveis de prevenção contra incêndios e fiabilidade no fornecimento da água necessária, em quantidade e qualidade, 24 horas por dia, 365 dias por ano.

Os sistemas de distribuição de água podem classificar-se, no que respeita à sua configuração, em redes malhadas (ou emalhadas), em que as condutas se fecham sobre si mesmas constituindo malhas (define-se malha como um conjunto de tubagens que formam um circuito fechado); redes ramificadas, em que há uma conduta principal longitudinal que se ramifica para ambos os lados; redes mistas, que correspondem à conjugação, numa mesma rede de distribuição de água, das duas configurações anteriores (esta é a situação mais vulgar em redes de distribuição domiciliária).

Quanto à sua análise, podem ser agrupados nas seguintes categorias: topologia do sistema (ramificados, ramificados com diversos pontos de alimentação, malhados e mistos); tipo de formulação do problema (equações dos troços, dos nós ou das malhas); método utilizado na resolução do sistema de equações (Hardy Cross, Newton-Raphson, Teoria Linear ou outros); forma como a variável tempo é considerada na análise do sistema (permanente, quasi-permanente ou transitório) [91].

A necessária regulamentação legal dos sistemas municipais de distribuição de água está patente no *Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água* [67] que aprovou os princípios que se devem reger a concepção, construção e exploração, bem como a regulamentação técnica e especificações de vária ordem. A título de exemplo, a garantia de pressões nos dispositivos de utilização prediais deve estar entre um mínimo de 100 kPa e um máximo de 600 kPa.

### 2.3 Simulação Hidráulica

O recurso ao EPANET torna-se premente na análise da performance operacional através da aplicação dos modelos matemáticos de simulação hidráulica. É uma solução bastante completa e *Open Source*<sup>1</sup> de modelação hidráulica e de qualidade da água para sistemas municipais de distribuição de água, que analisa de forma sistemática e detalhada, no tempo e no espaço, os problemas mais frequentes associados à gestão e à manutenção de sistemas de distribuição de água. O seu ambiente gráfico permite a edição dos dados descritivos da rede e dos cenários a modelar, calibrar o modelo e visualizar os resultados em vários formatos. Os resultados incluem a possibilidade de examinar mapas da rede e resultados de acordo com códigos de cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais, perfis de condutas, isolinhas, frequências e outros, e ainda produzir relatórios específicos (energia, calibração e reacção) [83].

Pode igualmente ser utilizado na análise de planos de desenvolvimento estratégicos, como seja a alteração de origens de água num sistema composto por múltiplas origens, modificação do funcionamento operacional de grupos elevatórios e reservatórios para minimização de custos energéticos e tempos de percurso, selecção de pontos de recloração, avaliação do custo-benefício de programas de limpeza e substituição de tubagens, planeamento de campanhas de amostragem ou estudos de decaimento de desinfectante e formação de sub-produtos de desinfecção.

Os elementos utilizados na modelação de uma rede são seis: nó (ponto de ligação entre dois ou mais troços), reservatório de nível fixo (armazenamento a partir de um nível de água fixo e com uma capacidade de ilimitada), reservatório de nível variável (armazenamento com capacidade de limitada e nível de água variável, em função do balanço dos caudais de entrada e saída), conduta (transporte de água entre dois nós),

---

<sup>1</sup>Programas de código-fonte aberto e livre ao desenvolvimento

## 2. ESTADO DA ARTE

---

bomba (fornecimento de energia ao escoamento entre dois nós, aumentando a sua carga hidráulica) e válvula de controlo (regulação do caudal ou da carga hidráulica entre dois nós).

Para além destes elementos físicos, pode-se incluir mais informações no EPANET, nomeadamente: padrões temporais (conjuntos de multiplicadores usados para modelar a procura de água), curvas (gráficos de dados utilizados para representar a curva perda de carga vs. fluxo através das bombas e curvas de nível vs. volume de água nos tanques), controlos operacionais (conjunto de regras que mudam o estado da ligação, dependendo das condições, tais como níveis de tanques, pressões nodais e tempo), opções da análise hidráulica (escolha da equação para a perda de carga, unidades de fluxo, viscosidade e densidade), opções da qualidade da água (escolha do tipo de análise da qualidade da água, tipo de mecanismo de reacção, e coeficientes de taxa globais de reacção), parâmetros de tempo (duração de simulação, intervalos de tempo para análises hidráulicas e de qualidade da água e intervalos de tempo no qual os resultados de saída são reportados).

Além da análise hidráulica em estado estacionário ou estendida no tempo, o EPANET pode ser usado para executar análises de qualidade da água, nomeadamente, o acompanhamento da propagação de um componente não reactivo no caso da reconstrução de um evento de contaminação, determinar qual a percentagem da água de uma fonte particular que é recebida num determinado nó da rede, estimar a idade da água recebida num ponto, modelar o destino de cloro e cloraminas que se decompõem com o tempo e podem reagir tanto na fase de água como na parede do tubo, e modelação do crescimento de certos desinfectantes.

Naturalmente, a modelação computacional de sistemas de distribuição tornou-se um dos pilares da indústria da água e atingiu um nível de maturidade e fiabilidade que o tornam um activo valioso para qualquer entidade gestora de recursos hídricos. Existem além do EPANET diversas aplicações, sobretudo comerciais, que actuam no campo dos modelos de simulação hidráulica e de qualidade como KYPipe, WaterCAD<sup>®</sup>, WaterGEMS<sup>®</sup>, H<sub>2</sub>ONET<sup>®</sup> ou SynerGEE<sup>®</sup>, para citar alguns.

### 2.3.1 Modelação Matemática

Se as equações Lagrangeanas descrevem o comportamento do fluido dentro de um sistema, as equações Eulerianas descrevem o comportamento do fluido dentro de um vo-

lume de controlo. Por seu lado, o *Teorema de Transporte de Reynolds* relaciona a razão da alteração de uma determinada propriedade num sistema fluido com a razão de alteração da mesma propriedade num volume de controlo contendo o fluido [9] da seguinte forma

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \beta \rho dV + \int_V \beta \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA, \quad (2.1)$$

onde  $B$  é a quantidade total da propriedade no sistema fluido,  $\frac{dB}{dt}$  é a sua razão de alteração,  $V$  é o volume de controlo em questão,  $A$  é a área superficial do volume de controlo,  $\mathbf{v}$  é o campo de velocidade e  $\mathbf{n}$  é o vector unidade normal dirigida para a saída do volume de controlo.

Quando  $B$  define a massa do fluido dentro de um sistema, a *Lei da Conservação de Massa* define-se como

$$\frac{dB}{dt} = 0, \quad (2.2)$$

e da combinação das Equações 2.1 e 2.2, notando que  $\beta$  representa a massa do fluido por unidade mássica de fluido e por definição tem o valor unitário, pode-se escrever que

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_V \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA = 0, \quad (2.3)$$

onde  $\rho$  é a densidade volúmica do fluido. Quando o fluido em estudo tem densidade constante, como é em muitos casos com a água, a Equação 2.3 resume-se a

$$\int_V \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA = 0, \quad (2.4)$$

que, por outras palavras, significa que a quantidade de fluido que entra num volume de controlo é a mesma que sai dela, não havendo, portanto, acumulação no seu interior.

Por outro lado, a *Lei da Conservação da Quantidade de Movimento* exige que o somatório das forças que agem sobre um sistema fluido seja igual à variação da quantidade de movimento do sistema no tempo [100]. Matematicamente,

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \frac{dB}{dt}. \quad (2.5)$$

Dado que a quantidade de movimento por unidade de massa  $\beta$  é igual à velocidade  $\mathbf{v}$  do fluido, as Equações 2.1 e 2.5 definirão a *Lei da Conservação da Quantidade de Movimento* da seguinte forma

## 2. ESTADO DA ARTE

---

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{F}_n = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \int_V \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA. \quad (2.6)$$

Esta *Lei de Newton*, Equação 2.6, pode ser reescrita nos seus componentres tridimensionais

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{n,x} &= \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v_x dV + \int_V \rho v_x \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{n,y} &= \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v_y dV + \int_V \rho v_y \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{n,z} &= \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v_z dV + \int_V \rho v_z \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$  são as componentes da velocidade do fluido.

Por seu lado, a *Primeira Lei da Termodinâmica* enuncia que dentro de qualquer sistema definido,

$$\Delta Q_h - \Delta W = \Delta E, \quad (2.8)$$

onde  $\Delta Q_h$  é o calor injectado no sistema,  $\Delta W$  o trabalho produzido por ele e  $\Delta E$  é a variação da sua energia interna. Estes são os termos da também chamada de *Lei da Conservação da Energia*, que pode ser reescrita na forma

$$\frac{dQ_h}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt}. \quad (2.9)$$

No entanto, a energia por unidade de massa do fluido pode ser expressa da seguinte forma

$$e = gz + \frac{v^2}{2} + u, \quad (2.10)$$

onde  $g$  é a aceleração de gravidade,  $z$  é a elevação da massa do fluido,  $v$  é a magnitude da velocidade e  $u$  é a energia interna por unidade de massa. A Equação (2.10) exprime a energia por unidade de massa do fluido em função de três parcelas: a energia potencial  $gz$ , a energia cinética  $v^2/2$  e a energia interna  $u$  que engloba os fenómenos químicos, eléctricos e moleculares por unidade de massa de fluido. Da combinação das Equações (2.1) e (2.9), resultará uma nova forma de expressar a *Primeira Lei da Termodinâmica*

$$\frac{dQ_h}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho e dV + \int_V \rho e \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA, \quad (2.11)$$



onde  $e$  é dado pela Equação (2.10). Esta equação da energia é fundamental na descrição do fluxo de fluidos em condutas e canais abertos.

Um fluido de peso específico  $\gamma$  quando é transportado numa *pipeline* de um ponto  $A$  de cota  $z1$  e pressão  $p1$  para o ponto  $B$  de cota maior  $z2$  e pressão  $p2$  perde carga, dada por

$$\begin{aligned} \Delta h &= h1 - h2 \\ &= \left( \frac{p1}{\gamma} + z1 \right) - \left( \frac{p2}{\gamma} + z2 \right), \end{aligned} \quad (2.12)$$

e tal perda de carga, também indicada por  $h_f$ , deve-se sobretudo à fricção na tubagem e tem outras forma de cálculo. A *Equação de Darcy-Weisbach* tem a forma

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}, \quad (2.13)$$

onde  $L$  é o comprimento da tubagem,  $D$  é o seu diâmetro,  $V$  é a velocidade média do fluido e  $f$  é um factor de fricção que contabiliza a tensão de corte no fluido na tubagem e pode ser, popularmente, deduzido através do *Diagrama de Moody* ou calculado através da *Equação de Colebrook*:

$$\frac{1}{f} = -2 \log \left( \frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right). \quad (2.14)$$

As equações supracitas conduzem à *Equação da Energia*

$$\left( \frac{p1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z1 \right) = \left( \frac{p2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z2 \right) + h_L + h_s, \quad (2.15)$$

onde  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são factores de correcção da energia cinética,  $h_L$  é correntemente chamado de *perda de carga* e  $h_s$  é o trabalho produzido pelo fluido. Assim, a perda de carga total de um fluido numa secção qualquer da tubagem é dada por

$$h = \left( \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} + z \right). \quad (2.16)$$

Ainda, a *Equação de Hazen-Williams* também é eficaz no cálculo das perdas de carga e é dada por

$$h_f = 6.82 \frac{L}{D^{1.17}} \left( \frac{V}{C_H} \right)^{1.85}, \quad (2.17)$$

onde  $C_H$  é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams para condutas.

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Ademais, existem perdas de carga localizadas devidas aos diversos acessórios e geometrias que se usam nas tubagens, nomeadamente, válvulas, curvas ou derivações e podem ser calculadas, caso a caso, pela equação

$$h_o = \sum K \frac{V^2}{2g}. \quad (2.18)$$

### 2.3.1.1 Redes Malhadas

As redes malhadas devem satisfazer as leis básicas da Continuidade e Energia [64]. A da Continuidade estipula que o caudal que entra na rede é o mesmo que sai dela

$$\sum_{i=1}^{NP(j)} Q_{ij} - F_j = 0 \quad \text{com} \quad j = 1, \dots, NJ, \quad (2.19)$$

onde  $Q_{ij}$  é o fluxo na tubagem  $i$  no nó  $j$ ,  $NP(j)$  é o número de tubagens que confluem no nó  $j$ ,  $F_j$  é fluxo de saída no nó  $j$  e  $NJ$  é o número de nós na rede.

A equação da energia requer que as cargas nos nós da rede estejam consistentes com as perdas de carga nas tubagens que ligam os nós. Para isto, dois métodos de cálculo sobressaem neste campo: o Método Nodal e o Método das Malhas.

A equação da energia para o Método Nodal, normalmente usada em redes de grande simplicidade, é dada por

$$h_2 = h_1 - \left( f \frac{L}{D} + \sum k_m \right) \frac{Q|Q|}{2gA^2} + \frac{Q}{|Q|} h_p, \quad (2.20)$$

onde  $h_1$  e  $h_2$  são as perdas de carga nos extremos da tubagem, os termos entre parênteses representam as perdas de de carga devido à fricção e as perdas de carga localizadas respectivamente e  $h_p$  é a carga adicionada ao sistema por uma bomba.

O Método das Malhas, baseada na Lei de Kirchhoff das Malhas, assume que a soma algébrica das perdas de carga dentro de uma malha é nula. Assim,

$$\sum_{j=1}^{NP(i)} (h_{L,ij} - h_{p,ij}) = 0, \quad \text{com} \quad i = 1, \dots, NL, \quad (2.21)$$

onde  $h_{L,ij}$  é a perda de carga na tubagem  $j$  na malha fechada  $i$ , e  $h_{p,ij}$  é a carga adicionada ao sistema por uma bomba. Da combinação das Equações 2.19 e 2.21, um método de cálculo das perdas de carga numa tubagem e a curva característica de uma

bomba, resulta a formulação matemática do problema num conjunto de equações não-lineares que são resolvidas através de métodos numéricos como o de Newton-Raphson ou o de Hardy Cross [65].

### 2.3.1.2 Bombas Hidráulicas

As bombas podem ser classificadas como de deslocamento positivo ou volumétricas e turbobombas ou hidrodinâmicas [100]. São máquinas hidráulicas capazes de receber energia, normalmente energia eléctrica, e produzir energia mecânica através de um fluxo elevando a sua pressão. Essa carga hidráulica fornecida ao sistema permitirá superar as perdas de carga hidráulica nas tubagens, colmatar a saída de caudal por causa do consumo de água, vencer um desnível topográfico desfavorável ou ainda garantir pressão e velocidade mínimas nos nós de interesse. Podem ser classificadas em bombas centrífugas, volumétricas rotativas e alternativas.

A selecção de uma bomba apropriada para uma aplicação específica passa pela curva de performance, em função da velocidade, que é fornecida geralmente pelo seu fabricante onde está patente a relação entre a carga hidráulica e o caudal que a bomba pode proporcionar, parâmetros esses que permitem aferir a sua eficiência. O cálculo da carga hidráulica é dada por

$$h_p = \Delta z + Q^2 \left[ \sum f \frac{L}{2gA^2D} + \sum \frac{K_m}{2gA^2} \right], \quad (2.22)$$

onde  $\Delta z$  é a cota topográfica entre os pontos de tomada e de entrega de água,  $Q$  é o caudal que fornece a bomba e os termos entre parênteses são as perdas de carga anteriormente citadas.

**Curvas Característica de Bombas Centrífugas** A grande maioria dos sistemas de distribuição de água trabalha com bombas centrífugas que são projectadas para trabalhar com caudais e alturas manométricas de acordo com as características da rede. Para bombas centrífugas, uma boa aproximação da curva que ilustra a variação dos seus parâmetros característicos – forma, diâmetro e velocidade de rotação – é conseguida através da seguinte equação:

$$h_p = aQ^2 + bQ + c, \quad (2.23)$$

## 2. ESTADO DA ARTE

---

onde os factores  $a$ ,  $b$  e  $c$  dependem do modelo de bomba e das unidades de fluxo. Em alternativa, toma-se a equação seguinte:

$$h_p = c - aQ^b, \quad (2.24)$$

o que permite a definição da curva característica da bomba através de um conjunto de  $Q - h_p$  pontos, chamado de faixa de operação da bomba, que caracteriza o seu funcionamento ou a sua resposta a diversas variáveis operacionais. O caudal é expresso em  $\text{m}^3/\text{h}$  na abcissa e na ordenada estão a altura manométrica em  $\text{mca}$ <sup>1</sup>, o rendimento ( $\eta$ ) em %, a altura mínima positiva de sucção (NPSH) em  $\text{mca}$  e a potência absorvida (BHP), em  $hp$ . As bombas possuem um “ponto óptimo”, definido pela intersecção da curva características da bomba com a curva característica do sistema<sup>2</sup>, onde a bomba disponibiliza o seu melhor rendimento, sendo que o rendimento tende a decair quando a bomba funciona fora desse ponto. Para uma determinada rotação constante  $n$ , em rotações por minuto, a curva  $Q - h_p$  apresenta uma forma parabolóide enquanto para  $h_p$  constante, a curva  $Q - n$  é uma hiperbolóide com o eixo da assíntota passando pelo centro do eixo coordenado e para  $Q$  constante a curva  $h_p - n$  também é uma parabolóide.

Sendo componentes fundamentais nos sistemas de distribuição de água, as bombas que compõem os sistemas elevatórios, de drenagem de águas residuais e pluviais ou afins, podem ser arrançadas em série ou em paralelo, dependendo da situação. Se o problema prende-se com uma elevada cota topográfica, a solução normalmente passa pela associação em série e quando o objectivo principal é fornecer um elevado caudal, a associação em paralelo é a mais adequada e aconselha-se a associação de bombas idênticas devido às questões ligadas à manutenção.

## 2.4 Fundamentos de Optimização

### 2.4.1 Introdução

Visando uma solução viável na forma de um conjunto  $\{x_1, \dots, x_n\}$  que, enquanto obedece às restrições impostas, produz uma solução viável que otimiza a função  $f(x_1, \dots, x_n)$ , pode ser expresso no seguinte dito modelo canónico:

---

<sup>1</sup>Metros de Coluna de Água que toma unidades de metro(m)

<sup>2</sup>Relação entre o caudal e a energia necessária para elevar a água, vencer as perdas de carga nas tubagens de aspiração e impulsão e, ainda, para manter as pressões desejadas a jusante ou atingir as cotas em reservatórios [91]

Encontrar  $x_1, x_2, \dots, x_n$  por forma a

Minimizar (ou Maximizar) a **Função Objectivo**  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Sujeita às **restrições**

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0,$$

$$h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0,$$

$$x_{n,min} \leq x_n \leq x_{n,max},$$

onde  $f(x_1, \dots, x_n)$  é a função objectivo,  $g_j(x_1, \dots, x_n)$  e  $h_k(x_1, \dots, x_n)$  são restrições do sistema em causa, que podem ser de igualdade ou de desigualdade, sendo que  $f(\dots)$ ,  $g_j(\dots)$  e  $h_k(\dots)$  podem ser não-convexas<sup>1</sup>, enquanto as variáveis de decisão, de optimização ou graus de liberdade  $x_i$  são intervalos na forma  $\mathbf{x}_i = [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$ , contidos naquele que é denominado de espaço viável ou factível.

Existem várias abordagens para a resolução do problema posto acima, nomeadamente, métodos analíticos (com base nas técnicas clássicas de cálculo diferencial), métodos gráficos (traçado da função a ser maximizada ou minimizada quando o número de variáveis não excede dois), métodos experimentais (as variáveis do processo são ajustadas uma a uma e a sua resposta vai sendo avaliada) e métodos numéricos (abordagem mais importante, onde procedimentos iterativos geram soluções progressivamente melhores, a partir de uma estimativa inicial e obedecendo a um critério de convergência que pára as iterações). Estes métodos numéricos podem incluir abordagens como a programação linear, programação inteira, programação quadrática, programação não-linear, programação dinâmica e métodos heurísticos.

Um problema de optimização pode tanto procurar minimizar a função objectivo como pode procurar maximizá-la. Assim, qualquer problema de maximização pode ser convertido num de minimização através da mera manipulação algébrica da função objectivo e das restrições

$$\max [f(\mathbf{x})] = -\min [-f(\mathbf{x})] \tag{2.25}$$

---

<sup>1</sup>Diz-se que a função  $y = f(x)$  é convexa se uma recta que une dois pontos seus quaisquer,  $(x_1, f(x_1))$  e  $(x_2, f(x_2))$ , toma um valor superior à função entre os dois pontos e um valor inferior fora desse intervalo (tangente abaixo da função). Assim, a definição de uma função côncava é a inversa desta.

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Frequentemente, surgem solicitações científicas ou de engenharia em que várias funções distintas devem ser otimizadas em simultâneo, procurando um ponto óptimo,  $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ , que reduz ou aumenta todo conjunto seguinte

$$\mathcal{F}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}) f_2(\mathbf{x}) \cdots f_n(\mathbf{x})] \quad (2.26)$$

Ainda, há situações onde é preciso reduzir uma parte  $\{f_1(\mathbf{x}) f_2(\mathbf{x}) \cdots f_{i-1}(\mathbf{x})\}$  do conjunto e aumentar a outra,  $\{f_i(\mathbf{x}) \cdots f_{n-1}(\mathbf{x}) f_n(\mathbf{x})\}$ . Em suma, existem problemas de optimização uniojectivo e problemas de optimização multiobjectivo. Num outro plano, pode-se também definir problemas de optimização como determinísticos ou probabilísticos, restritos ou irrestritos, monocritérios ou multicritérios, contínuos ou discretos, unidecisoros ou multidecisoros, univariáveis ou multivariáveis, lineares ou não-lineares.

### 2.4.2 Técnicas Clássicas de Optimização

Atribui-se a Euclides os primeiros estudos sobre a optimização versando problemas de Geometria Plana e Espacial. O Cálculo Diferencial e Integral surge muito mais tarde, em 1646, quando Fermat provou que num ponto extremo o gradiente é nulo. No entanto, foi na década que se seguiu a 1660, que trabalhos de Newton e Leibniz fundaram a Análise Matemática, baseada no Cálculo Diferencial. Basicamente, a teoria assenta, por exemplo, em princípios como:

**Continuidade** Uma função  $f(x)$  é contínua no ponto  $c$  se  $\lim_{x \rightarrow c} f(x) = c$ .

**Límite** O limite de  $f(x)$  à medida que  $x$  aproxima-se de  $c$  é  $L$  se, para cada número positivo  $\epsilon$ , existe um número positivo  $\delta$  de modo que  $|f(x) - L| < \epsilon$  sempre que  $0 < |x - c| < \delta$ .

**Derivada** A derivada de  $f(x)$  em  $c$  é  $f'(c) = \lim_{x \rightarrow c} \frac{f(x) - f(c)}{x - c}$  se o limite existir.

**Regra da Cadeia** A Regra da Cadeia aplica-se se  $g(x)$  é diferenciável em  $c$  e  $f$  é diferenciável em  $g(c)$ . Assim,  $(f(x) \circ g(x))'(c) = [f'(g(c))][g'(c)]$ .

Ainda, se  $\lim_{x \rightarrow c} g(x)$  existir e existir um número positivo  $\delta_1$  tal que  $f(x) = g(x)$  para  $0 < |x - c| < \delta_1$ , então  $\lim_{x \rightarrow c} f(x) = \lim_{x \rightarrow c} g(x)$ . Também, se  $f(x)$  é contínuo

no intervalo  $a \leq x \leq b$ , e tanto  $f(a) < 0 < f(b)$  ou  $f(b) < 0 < f(a)$ , então existe pelo menos um número  $c$  tal que  $a < c < b$  e  $f(c) = 0$ .

Assim, o cerne da questão de maximizar e minimizar funções reside na noção de que num ponto mais elevado do gráfico de uma função ou no ponto mais baixo, a tangente à curva é *horizontal*, isto é, a derivada  $f'(x_o)$  é nula nos pontos  $x_o$  onde  $f(x_o)$  é máximo ou mínimo.

Porém, em determinadas situações, são precisas ferramentas numéricas que permitam obter, de forma efectiva, soluções numéricas para problemas matemáticos como, por exemplo, encontrar um ponto de derivada nula, quando por uma qualquer razão os métodos analíticos não estão à disposição. Assim, um dos principais objectivos da análise numérica é estudar métodos operacionais construtivos na forma de algoritmos expeditos e suficientemente rigorosos para a resolução aproximada de modelos matemáticos. Assim, um algoritmo é uma sequência finita de várias operações aritméticas concebido para responder a um determinado problema, estando na posse de um conjunto de informações. A maioria dos algoritmos de optimização que procuram maximizar ou minimizar funções, senão todos, segue um esquema típico dado pelo Pseudocódigo 1.

---

**Pseudocódigo 1** Estrutura abstracta de um algoritmo clássico

---

**Require:**  $x_{min} \leq x_i \leq x_{max}$

**Ensure:**  $\min F(\mathbf{x})$

$k \leftarrow 0$

$\mathbf{x}_0 = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  {Escolher o ponto inicial}

$|\Delta F_k| = |F_{k-1} - F_k| < \epsilon_F$  {Critério de convergência. Outra opção:  $|\Delta x_i| < \epsilon_x$ }

$F_0 = f(\mathbf{x}_0)$  {Avaliar o ponto inicial}

**repeat**

$k \leftarrow k + 1$

$\Delta \mathbf{x}_k = [\Delta x_1 \Delta x_2 \dots \Delta x_n]$

$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \Delta \mathbf{x}_k$

$F_k = f(\mathbf{x}_k)$

**until** Critério de convergência não for atingido

**return**  $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_k$

**return**  $F^*(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^*)$  {Terminar e registar o resultado da optimização}

---

## 2. ESTADO DA ARTE

---

### 2.4.2.1 Programação Matemática Linear

O Problema de Transporte é um caso clássico do recurso à programação (planeamento de actividades) matemática linear e consiste no transporte de bens desde a origem até ao destino, sendo conhecidos o custo de transporte de cada bem, as quantidades disponíveis em cada ponto de chegada e a procura de cada consumidor, sendo que o transporte deve ser efectuado de modo que as limitações de oferta em cada ponto seja respeitada, a procura de cada mercado seja satisfeita e o custo total de transporte seja mínimo. A programação matemática linear resulta do facto de que a função objectivo e as restrições são funções lineares das variáveis  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  e consiste em determinar valores não negativos para as variáveis de optimização. Este tipo de problema pode ser formulado da seguinte forma:

Encontrar  $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$  por forma a

Minimizar a **Função Objectivo**  $C = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

Sujeita às **restrições**

$$\begin{array}{ccccccc} a_{11}x_1 & + & a_{12}x_2 & + & \dots & + & a_{1n}x_n & \{\leq, =, \geq\} & b_1 \\ a_{21}x_1 & + & a_{22}x_2 & + & \dots & + & a_{2n}x_n & \{\leq, =, \geq\} & b_2 \\ \vdots & & \vdots & & \ddots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m1}x_1 & + & a_{m2}x_2 & + & \dots & + & a_{mn}x_n & \{\leq, =, \geq\} & b_m \end{array}$$

A popular resolução de um problema de Programação Linear recorre ao Método Simplex, esquematizado no Pseudocódigo 2. Apresentado em 1947 por George B. Dantzig, sendo o primeiro método a ser proposto para a resolução de problemas lineares [102]. Este método explora quatro propriedades dos pontos extremos admissíveis:

1. se existe apenas uma solução óptima, então tem de ser um ponto extremo admissível;
2. se existem várias soluções óptimas, então pelo menos dois são pontos extremos admissíveis adjacentes;
3. existe um número finito de pontos extremos admissíveis;
4. se um ponto extremo admissível não tem pontos extremos admissíveis adjacentes melhores, então esse ponto extremo é óptimo.



O método começa numa solução básica admissível e vai transitando iterativamente para uma outra solução básica admissível que por sua vez resulta num “melhor” valor da função objectivo até que se cumpra um critério que estabelece a solução óptima, sem a necessidade de verificar todas as soluções básicas, ou concluir que o problema não tem óptimo finito.

---

**Pseudocódigo 2** Método Simplex

---

```

Calcular  $c_N^T - c_N^T \mathcal{B}^{-1} N$ 
if  $c_N^T - c_N^T \mathcal{B}^{-1} N \geq 0$  then
    return Terminar e registar o resultado da optimização
else
    Tomar  $j$  tal que  $c_j - c_N^T \mathcal{B}^{-1} a_j < 0$ 
    if  $y_j = \mathcal{B}^{-1} a_j \leq 0$  then
        return Terminar. Função objectivo é ilimitada.
    else
        if  $y_j > 0$  then
            repeat
                Formar nova base trocando em  $\mathcal{B}$  a coluna  $a_r$  por  $a_j$ 
            until  $y_j \leq 0$ 
        end if
    end if
end if
return Terminar e registar o resultado da optimização

```

---

Um programa linear deve obdecer a várias condições, tais como, Proporcionalidade (dada uma variável  $x_j$ , se o valor de  $x_j$  passa, por exemplo, para o dobro a sua contribuição também passará para o dobro), Aditividade (o custo total é a soma dos custos individuais e a contribuição total para a restrição  $i$    a soma das contribuições individuais), Divisibilidade (as variáveis de decisão podem tomar qualquer valor real) e Determinismo (os coeficientes são conhecidos sem qualquer factor probabilistico). Apesar dos avanços no campo da programação linear com o Algoritmo Elipsóide ou o Algoritmo de Karmarkar, o Algoritmo Simplex continua sendo muito empregue devido à sua eficiência e versatilidade.

Um g nero de problema linear é a Programação Linear Inteira cujo método de resolução mais popular   através do Algoritmo Branch-and-Bound, ou o método de

## 2. ESTADO DA ARTE

---

pesquisa em árvore, que implementa a resolução de vários programas lineares relaxados e, a partir da exploração de uma árvore binária, no último nível, todas as variáveis  $x_i$  satisfazem o problema.

### 2.4.2.2 Programação Matemática Não Linear

A maioria dos problemas que se põem à Engenharia não são representados por funções lineares. Assim, quando a função objectivo e/ou uma ou várias funções de restrição são não lineares, tal configura-se como um problema não-linear de programação matemática, ou de optimização global, portanto impossível de ser resolvido pelos métodos analíticos clássicos [80].

Variegados métodos são usados para enfrentar esta tipologia de problemas. Dentro dos Métodos de Minimização Unidimensional, há os procedimentos de eliminação onde o Método de Fibonacci é aquele mais eficiente, seguido pelo Método da Secção Dourada e os procedimentos de interpolação onde pontificam os Métodos de Interpolação Quadrática e Cúbica, Métodos Directos de Raiz, Método de Newton, Método Quasi-Newton e o Método da Secante, e na ausência de um intervalo inicial de incertezas, o de Interpolação Quadrática e o Quasi-Newton são os mais eficientes quando as derivadas da função são desconhecidas. Por outro lado, quando a primeira derivada da função a ser minimizada é conhecida, a Interpolação Cúbica e o Método da Secante são muito eficientes. Ainda, se a primeira e segunda derivadas da função são conhecidas, o método de Newton será é o mais eficiente em encontrar o comprimento do passo óptimo.

No campo das técnicas de optimização sem restrições, pode-se classificar quatro tipos de abordagens [80]. Primeiro, dentro do método de procura directa existem os Métodos de Procura Aleatórios, o amplamente utilizado Método de Powell e o Método Simplex. Segundo, há os métodos denominados de Indirectos ou de Descida onde se destacam o Método de Cauchy também conhecido como o da “Descida Mais Íngreme”<sup>1</sup>, o do Gradiente Conjugado ou de Fletcher – Reeves, o de Newton, de Marquardt, o Quasi-Newton, o de Davidon–Fletcher–Powell e o de Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS). Terceiro, há os Métodos Directos onde pontificam o Método das Direções Viáveis de Zoutendijk e o Método do Gradiente Reduzido Generalizado. Por fim, há os Métodos Indirectos que transformam as variáveis de forma que as restrições fiquem automaticamente satisfeitas, convertendo um problema de optimização com restrições num sem restrições.

---

<sup>1</sup>Steepest Descent

Este método soma uma função de penalidade à função objectivo e a resolução desta função pseudoobjectivo passa por três métodos principais.

**Método da Função Penalidade** O recurso a funções de penalização, processo proposto por Richard Courant em 1940 e desenvolvido posteriormente por Carroll e Fiacco & McCormick, visa aumentar ou diminuir o valor da nova função objectivo adveniente, sendo comumente usado na optimização para ultrapassar dificuldades postas pelas restrições. Naturalmente, tal recurso acaba por complicar a topologia do espaços de procura, aumentando assim, o grau de dificuldade do problema e necessita de implementações algorítmicas híbridas que intentam melhorar a qualidade da solução encontrada através do incremento da probabilidade de identificação de soluções globalmente óptimas.

A programação matemática considera dois tipos de funções penalizadoras. Por um lado, existe o Método da Função Penalidade Interior onde o termo de penalidade é escolhido de forma que o seu valor será pequeno em pontos longe dos limites de restrição e tenderá para o infinito quando se se aproxima dos limites das restrições, funcionando como barreiras que impede os pontos gerados de saírem da região viável. Por outro lado, no Método da Função Penalidade Exterior o aumento do valor da penalidade é muito superior à quantidade de violações de uma restrição, começando o processo numa solução inviável e dirigindo-o na direcção da região viável. O Método do Multiplicador Aumentado de Lagrange, que combina o método dos multiplicadores de Lagrange e estes métodos de função de penalização. Neste método, a função de penalidade exterior é usada para definir a função pseudoobjectivo chamada de Função Lagrangiana Aumentada.

O Método da Função Penalidade Exterior é correntemente usado na aplicação dos Algoritmos Evolucionários [12] através de funções onde pontificam exemplos como a “pena de morte” (de fácil implementação e computacionalmente eficiente, rejeita no imediato indivíduos inviáveis e é aconselhado para grandes regiões viáveis), penalidade estática (variando de problema para problema, o termo de penalização permanece constante durante todo o processo evolutivo, o que pode ser contraproducente), dinâmica (considerada melhor que a estática, normalmente o termo de penalização vai aumentando ao longo das gerações mas é de difícil implementação) e adaptivas (hábil e muito em voga mas de difícil parametrização) [10].

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Outra forma de empregar meios para lidar com restrições é tratar cada uma ou o seu somatório e a função objectivo como dois objectivos distintos, sob uma formulação multiobjectivo [11, 86], posto que os termos de penalização são normalmente definidos por tentativa e erro, portanto, com potencial repercussão nos resultados produzidos.

De uma forma geral, uma função de penalidade  $\alpha(\mathbf{x})$  é definida por

$$\alpha(\mathbf{x}) = \mu_1 \sum_{j=1}^{n_g} \phi(z) [g_j(\mathbf{x})] + \mu_2 \sum_{k=1}^{n_h} \psi(z) [h_k(\mathbf{x})], \quad (2.27)$$

onde  $\phi(z)$  e  $\psi(z)$  são funções contínuas que satisfazem

$$\begin{cases} \phi(z) = 0 & \text{se } z \leq 0 \\ \phi(z) > 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \text{e} \quad \begin{cases} \psi(z) = 0 & \text{se } z = 0 \\ \psi(z) > 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.28)$$

e  $\phi(z)$  e  $\psi(z)$  têm a forma seguinte

$$\phi(z) = (\mathbf{max}\{0, z\})^p \quad \text{e} \quad \psi(z) = |z|^p, \quad (2.29)$$

onde  $p$  é um inteiro positivo que para  $p \geq 2$  a função penalidade é diferenciável e contínua, e chamar-se-á linear se  $p = 1$  e quadrática se  $p = 2$ . Assim, a função pseudo-objectivo terá a forma

$$\mathcal{F}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \mu_i \alpha(\mathbf{x}) \quad \text{com} \quad i = 1, 2, \dots, \text{tipologia de restrição.} \quad (2.30)$$

A severidade da barreira é controlada pela escolha de  $\mu_i$ . Se for grande, ela é gradual e se for pequeno, é arriscada. Assim, se for grande e a função estiver perto da fronteira, a função de barreira parece muito diferente de  $f$  e se for pequeno, há declives acentuados e o problema está altamente condicionado, portanto, de difícil resolução.

A finalizar, a função pseudoobjectivo do Método Função de Penalidade Exterior tem a seguinte forma

$$\mathcal{F}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \mu_1 \sum_{j=1}^{n_g} [g_j(\mathbf{x})]^2 + \mu_2 \sum_{k=1}^{n_h} [h_k(\mathbf{x})]^2, \quad (2.31)$$

enquanto a formulação da função pseudoobjectivo do Método Função de Penalidade Interior é dada por

$$\mathcal{F}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) - \mu_1 \sum_{j=1}^{n_g} \frac{1}{g_j(\mathbf{x})} + \frac{1}{\sqrt{\mu_2}} \sum_{k=1}^{n_h} [h_k(\mathbf{x})]^2. \quad (2.32)$$

Simplifica-se o processo em muitas situações assumindo  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ .

### 2.4.3 Técnicas Modernas de Optimizaçã

A fulcro da questã no campo da optimizaçã estã relacionado com a certeza sobre a convergência para uma soluçã do problema (robustez) e a segunda tem a ver com a velocidade com que a funçã converge para uma soluçã (eficiência) pois nã basta que ela seja convergente, é preciso que tal seja conseguida num intervalo de tempo aceitãvel. Embora providos de validaçã teórica e ao facto de serem extremamente úteis na procura da melhor soluçã de funções contínuas e duas vezes diferenciãveis, os algoritmos clássicos podem precisar de um tempo de computaçã impraticãvel na resoluçã dos desafios de optimizaçã [64], sã propensos à convergência para mínimos locais e tornam-se ineficazes perante problemas complexos de optimizaçã combinatória. Salienta-se que nem todos os problemas práticos envolvem funções objectivo contínuas e/ou duplamente diferenciãveis. Assim, perante tais limitações, as últimas décadas têm sido frutíferas em técnicas heurísticas que competem directamente com os métodos clássicos.

A procura heurística é feita de uma forma sistemática mediante uma estratégia de procura, portanto, esta é mais do que uma procura puramente aleatória. Ainda embora o processo tenha em vista a optimizaçã de um determinado problema, nã é absolutamente necessário produzir uma soluçã comprovadamente óptima. As novas soluções sã produzidas de três modos: através da geraçã de uma de raiz, através da modificaçã de uma soluçã viãvel já existente e pela recombinaçã de duas ou mais boas soluções existentes.

A popularidade destas técnicas heurísticas deve-se, pelo menos em parte, ao potencial de resolver problemas nã-lineares, nã-convexos, multimodais e problemas discretos para as quais as técnicas determinísticas apresentam notória dificuldade ou simplesmente falham [72]. Nã obstante, a primazia dos métodos determinísticos ofusca o interesse matemático nestes algoritmos visto que a sua aplicaçã depende fortemente da afinaçã dos seus parâmetros, tomam decisões probabilísticas para ultrapassar a convergência prematura, procuram aleatoriamente e evitam testar todas as soluções possíveis. A desconfiança à volta de tais métodos também reside no facto de abdicarem da garantia de sucesso em encontrar a melhor soluçã, preferindo uma que seja aceitãvel e dentro de um intervalo de tempo razoãvel. No entanto, é indubitãvel que os Algoritmos

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Evolucionários já demonstraram capacidade de criação de boas soluções em problemas de otimização complexos [7].

### 2.4.3.1 Algoritmo Genético (GA)

Está nas ideias do naturalista inglês Charles R. Darwin, autor do clássico “Sobre a Origem das Espécies por Meio da Seleção Natural ou a Conservação das Raças Favorecidas na Luta pela Vida”, os últimos avanços no campo da otimização. A sua crença de que o indivíduo mais bem adaptado ao ambiente envolvente de cada população sobrevive e deixa descendência, ao contrário dos menos adaptados, inspirou investigadores que, perante problemas de grande envergadura, tentam desenvolver algoritmos que simulam a forma como os seres que habitam o planeta competem por alimentação, território ou parceiros, superando os seus adversários e aumentando as suas probabilidades de transmitir as suas características superiores aos seus descendentes. É a evolução usada como metáfora para a resolução de problemas reais.

Este método de otimização global de inspiração biológica apresentado em 1975 por John Holland [41], quinze anos depois do conceito de Computação Evolucionária aduzido por Ingo Rechenberg [81], propõe-se resolver problemas não-convexos, não-lineares, resultantes da engenharia ou modelos matemáticos para aplicações em áreas como a Economia, Finanças ou Transportes. O processo, esquematizado no Pseudocódigo 3, começa pela geração de uma população aleatória de indivíduos candidatos a possíveis soluções admissíveis do problema em apreciação. Durante o processo chamado de evolutivo entram os chamados operadores e a totalidade dessa população é avaliada. Na sequência, cada indivíduo recebe um *fitness* – função de aptidão – que reflecte a sua habilidade de adaptação ao ambiente envolvente e uma parte dos indivíduos mais adaptados são preservados enquanto os demais são simplesmente descartados numa versão artificial do mecanismo de Seleção Natural de Charles Darwin – selecção aleatória por Roleta. Os indivíduos que superam os seus adversários podem sofrer alterações de baixa probabilidade no seu código genético – mutação – e através da emulação do mecanismo de reprodução biológica, onde as suas características superiores são passadas aos seus descendentes – recombinação, cruzamento ou *crossover* – produzindo uma nova geração, que se deseja melhor do que a anterior. Este processo é iterativo até que se chegue a soluções de boa qualidade, ao fim de um número pré-definido de novas populações.

---

**Pseudocódigo 3** Algoritmo Genético (GA)

---

```
Escolher uma população inicial (cromossomas)
Avaliar a população inicial
while Critério de paragem não for satisfeito do
  repeat
    if Condições de recombinação forem satisfeitas then
      Escolher cromossomas progenitores
      Escolher os parâmetros de recombinação
      Efectivar a recombinação
    end if
    if Condições de mutação forem satisfeitas then
      Escolher os pontos de mutação
      Efectivar a mutação
      Avaliar fitness dos descendentes
    end if
  until Descendentes em quantidade suficiente
  Seleccionar nova população
end while
```

---

Assim, torna-se preciso ter algum cuidado na implementação deste método dada a sensibilidade e a importância dos diversos parâmetros utilizados num algoritmo genético. O tamanho da população pode, por um lado, cobrir de uma forma representativa o espaço de procura e prevenir convergências prematuras mas, por outro lado, aumentar indesejadamente o tempo computacional. A probabilidade de cruzamento também deve ser observada pois um valor muito alto pode eliminar indivíduos aptos para a tarefa enquanto um valor baixo influi na eficiência do algoritmo. Por fim, a probabilidade de mutação tem um papel fundamental na prevenção da estagnação num extremo local. A popularidade dos GA assenta na robustez (baseado em processos biológicos), generalidade (capazes de tratar problemas complexos) e paralelização (fácil de implementar em computação paralela).

A Computação Evolutiva é um ramo da Inteligência Artificial (AI) e dentro dos Algoritmos Evolucionários (EA) existem pelo menos quatro esquemas distintos e independentes: Algoritmos Genéticos (GA), Estratégias de Evolução (ES), Programação Evolutiva (PE) e Programação Genética (GP). Importa salientar que o GA não é pro-

## 2. ESTADO DA ARTE

---

priamente um algoritmo único mas um conjunto de técnicas que partilham os mesmos conceitos.

### 2.4.3.2 Evolução Diferencial (DE)

Reputado como um algoritmo simples, eficiente e robusto, a Evolução Diferencial foi apresentada por Storn e Price [77] em 1996. É um método de procura directa que tem sido muito usado na optimização global ao conseguir actuar em problemas não-convexos e em condições de diferenciabilidade não garantidas. Devido aos seus processos de seleção baseados em populações, na aptidão dos seus indivíduos e nos seus operadores de mutação e cruzamento, é considerado um dos mais poderosos algoritmos estocásticos usados correntemente.

Baseado nos mesmos princípios dos Algoritmos Genéticos, tem como diferença a denominada *mutação diferencial*, onde as suas variantes perturbam membros distintos e aleatoriamente selecionados da geração em avaliação, evitando assim o uso de uma distribuição de probabilidade pré-definida para gerar descendência. Esta prole intenta cobrir de uma forma efectiva o espaço de procura. Este método, esquematizado no Pseudocódigo 4, particularmente eficaz em identificar áreas da região de procura promissoras, trabalha com uma população  $P_G$ , com quatro ou mais indivíduos e de quantidade constante ao longo das  $G$  gerações que muitas vezes é o seu critério de paragem. Usa-se nesta formulação  $NP$  vectores candidatos,  $\mathbf{X}_{i,G}$ ,  $i = 1, 2, \dots, NP$ , onde cada vector  $\mathbf{X}_{i,G}$ ,  $\mathbf{X}_{p,G} = \{X_{1,p,G}, X_{2,p,G}, \dots, X_{o,p,G}, \dots, X_{D,p,G}\}$ , possui  $D$  variáveis de optimização  $X_{o,p,G}$ ,  $o = 1, 2, \dots, D$ .

Considerando a estratégia clássica da Evolução Diferencial, *DE/rand/1/bin*, a ideia que subjaz ao conceito detalha-se nos seguintes passos:

**Inicialização** São fornecidos ao algoritmo: o tamanho da população  $NP$ , o número máximo de gerações  $G_{\max}$ , a estratégia evolucionária *DE/x/y/z* ( $x$  é o elemento base,  $y$  é o número de diferenças e  $z$  é o tipo de crossover), a probabilidade de cruzamento  $CR$  e o factor de escala da mutação  $F$ . Seguidamente, os indivíduos (vectores reais) são delimitados superior e inferiormente; uma população de potenciais soluções é gerada de forma aleatória procurando cobrir todo o espaço de procura; o “fitness” de toda a população é avaliado.



**Mutaçã** Os vectores candidatos sã obtidos atravẽs da adiçã de uma diferenç ponderada entre dois vectores diferenç escolhidos aleatoriamente na populaçã  $P_G$  a um vector base, intentando a expansã do espaço de procura ao introduzir diversidade na populaçã de soluções atravẽs da combinaçã das melhores característic de duas soluções promissoras. A mutaçã gera uma populaçã de descendentes de acordo com a equaçã:

$$\mathbf{V}_{i,G+1} = \mathbf{X}_{r_1,G} + F \times (\mathbf{X}_{r_2,G} - \mathbf{X}_{r_3,G}),$$

onde  $\mathbf{V}_{i,G+1}$  é o vector mutado e  $F \in [0, 2]$  é o factor de escala de mutaçã.

**Recombinaçã** A partir da procura competitiva que advẽm da mutaçã, o cruzamento remete-se à incorporaçã das soluções de sucesso da geraçã anterior, gerando um vector experimental  $\mathbf{U}_{p,G+1}$  que contẽm elementos do vector alvo  $\mathbf{X}_{p,G}$  e do vector mutado  $\mathbf{V}_{p,G+1}$ , sendo que o grau de passagem das boas característic destes para aquele é mediado pela constante de cruzamento  $CR$ .

**Seleccã** Os vectores experimentais sã avaliados e os seus valores de *fitness* sã comparados com os dos vectores alvo e eles passa a ser vectores alvo, passando para a prõxima geraçã, se e somente se melhorarem de performance (elitismo). Os processos de mutaçã, recombinaçã e seleccã sã ciclicamente repetidos até  $G_{\max}$  ser alcançado.

Um estudo recente de Dong *et al.* [24] mostrou que em termos de desempenho global, a Evoluçã Diferencial (DE) é superior ao Algoritmo Genẽtico na optimizaçã em sistemas de distribuicã de água, tanto na eficiẽcia como na qualidade da soluçã.

### 2.4.3.3 Optimizaçã por Enxame de Partículas (PSO)

Servindo-se da natureza como fonte de inspiraçã, investigadores tẽm criado metodologias e ferramentas computacionais para a resoluçã de problemas complexos. Um deles, Optimizaçã por Enxame de Partículas (PSO), artefacto computacional esquematizado no Pseudocódigo 5 e desenvolvido por Kennedy & Eberhart [49], imita o comportamento social de aves na sua busca por alimento. Os pássaros (denominados de partículas na terminologia) vã transmitindo as suas experiẽcias e analisam a experiẽcia do bando

## 2. ESTADO DA ARTE

---

---

### Pseudocódigo 4 Evolução Diferencial (DE)

---

```
Função  $\mathbf{x} = DE(NP, CR, F, range, f)$  {Estratégia: DE/rand/1/bin}
 $\mathbf{x} \leftarrow \text{random}(range, NP)$  {Gerar aleatoriamente o conjunto inicial de vectores}
 $fit_x \leftarrow f(\mathbf{x})$  {Avaliar a população criada}
while Critério de paragem não for satisfeito do
  Inicializar contagem de gerações,  $Ger = 0$ 
  for  $i = 1$  até  $NP$  do
     $\mathbf{v}_{i,G+1} \leftarrow \text{mutação}(\mathbf{x}_{i,G}, F)$  {Vector mutado}
     $\mathbf{u}_{i,G+1} \leftarrow \text{crossover}(\mathbf{x}_{i,G}, \mathbf{v}_{i,G+1}, CR)$  {Vector experimental}
  end for
   $fit_u \leftarrow f(\mathbf{u})$ 
  for  $i = 1$  até  $NP$  do
    if  $fit_u(i) < fit_x(i)$  then
       $\mathbf{x}_{i,G+1} \leftarrow \mathbf{u}_{i,G+1}$ 
    else
       $\mathbf{x}_{i,G+1} \leftarrow \mathbf{x}_{i,G}$ 
    end if
  end for
   $Ger = Ger + 1$ 
end while
return Registrar o resultado da optimização
```

---

numa área perscrutada que é análoga ao espaço de procura e o acto de encontrar um sítio com comida, ou o ninho, equivale à obtenção do estado óptimo.

O seu modelo conceptual rege-se por três regras básicas: coesão (o bando deve manter-se unido), separação (controlo da distância entre as partículas) e alinhamento (acompanhar a trajectória global do bando). Assim, cada partícula é representada por um vector  $X_i$  de dimensão  $D$  e possui velocidade  $V_i$ . Sendo que  $P_i$  é a melhor posição até ao momento da partícula  $i$ , o valor de *fitness*  $f(X_i)$  é calculado com base na função objectivo que se deseja minimizar,  $P_g = \min_i\{P_i\}$ . A equação de evolução é dada por:

$$V_i(k+1) = \omega V_i(k) + c_1 r_1 (P_i - X_i(k)) + c_2 r_2 (P_g - X_i(k)), \quad (2.33)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1), \quad (2.34)$$

onde  $\omega \in [0, 1]$  é um parâmetro inercial e denota a importância relativa da memória (posição) da própria partícula para a memória (posição) do bando. Os coeficientes

$c_1 > 0, c_2 > 0$  são razões de aprendizagem cognitivas (individual) e sociais (grupo) e  $r_1, r_2$  são números aleatórios uniformemente distribuídos entre  $[0, 1]$ . Os valores de  $c_1$  e  $c_2$  são geralmente afixados como sendo 2 de modo que  $c_1 r_1$  e  $c_2 r_2$  possam assegurar que as partículas sobrevoem o alvo pelo menos metade das ocasiões. A solução considera-se encontrada após a realização de um determinado número de iterações ou quando se verifique a convergência da solução actual através da monitorização da margem de erro no valor de  $f(P_g)$ .

#### 2.4.3.4 Optimização por Col nia de Formigas (ACO)

O ‘‘Ant System (AS)’’ foi o primeiro algoritmo proposto na literatura (Dorigo et al. 1991, Dorigo 1992, Dorigo et al. 1996) dentro da classe da ‘‘Optimização por Col nia de Formigas (ACO)’’ , na senda dos métodos numéricos de inspiração natural e biológica. Emula o trabalho coordenado duma col nias de formigas para a resolução de problemas de optimização combinatória [26].

Sem referências visuais, a procura pela comida por parte de uma col nia é um processo aleatório de exploração das vizinhanças do formigueiro e as formigas v o deixando um trilho de feromonas que será mais not rio quanto mais qualidade e quantidade de comida for encontrada. Tal mecanismo permitirá aos demais membros seguir a rota através do olfacto, orientados pela intensidade da feromona e apresentam uma notável capacidade de adaptação às perturbações e obstáculos que possam surgir nos trilhos feitos, entrando rapidamente no caminho mais curto do ninho ou para o ninho.

Tais princípios, esquematizados no Pseudocódigo 6, foram implementados tendo como cerne a actualização de feromonas. Os seus autores exemplificam o funcionamento usando o clássico caso do caixeiro viajante [25]: as componentes da solução são as arestas do grafo,  $c_{ij}$ , e a actualização das feromonas,  $\tau_{ij}$ , feita por todas as formigas que completarem o percurso é dada por:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k, \quad (2.35)$$

onde  $\rho \in (0, 1]$  é a razão de evaporação,  $m$    o número de formigas,  $\Delta\tau_{ij}^k$  é a quantidade de feromona depositada pela  $k$ -ésima formiga na aresta  $(i, j)$ :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{1}{L_k} & \text{se formiga } k \text{ usar aresta } (i, j) \text{ no percurso} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.36)$$

## 2. ESTADO DA ARTE

---

---

### Pseudocódigo 5 Optimização por Enxame de Partículas (PSO)

---

Input: Função Objectivo  $f : \Theta \rightarrow \mathbb{R}$

Output: Melhor solução encontrada

Inicializar domínio:  $\Theta' \subseteq \Theta$

Quantidade de partículas:  $|\mathcal{P}| = k$

Parâmetros:  $w, \varphi_1,$  e  $\varphi_2$

Critério de paragem:  $S$

$t \leftarrow 0$

**for**  $i = 1$  até  $k$  **do**

    Inicializar:  $\mathcal{N}_i$  a um subconjunto de  $\mathcal{P}$  de acordo com a topologia desejada

    Inicializar:  $\vec{x}_i^t$  aleatório dentro de  $\Theta'$

    Inicializar:  $\vec{v}_i^t$  a zero ou a um valor pequeno

    Determinar:  $\vec{b}_i^t = \vec{x}_i^t$

**end for**

**while**  $S$  não for satisfeito **do**

**for**  $i = 1$  até  $k$  **do**

        Determinar:  $\vec{l}_i^t := \arg \min_{\vec{b}_j^t \in \Theta | p_j \in \mathcal{N}_i} f(\vec{b}_j^t)$

        Gerar matrizes aleatórias:  $\vec{U}_1^t$  e  $\vec{U}_2^t$

        Determinar:  $\vec{v}_i^{t+1} := w\vec{v}_i^t + \varphi_1\vec{U}_1^t(\vec{b}_i^t - \vec{x}_i^t) + \varphi_2\vec{U}_2^t(\vec{l}_i^t - \vec{x}_i^t)$

        Determinar:  $\vec{x}_i^{t+1} := \vec{x}_i^t + \vec{v}_i^{t+1}$

**end for**

**for**  $i = 1$  até  $k$  **do**

**if**  $f(\vec{x}_i^t) < f(\vec{b}_i^t)$  **then**

            Determinar:  $\vec{b}_i^t := \vec{x}_i^t$

**end if**

**end for**

    Determinar:  $t = t + 1$

**end while**

---

onde  $L_k$  é o comprimento do percurso para a  $k$ -ésima formiga. Na construção da solução, as formigas tomam decisões probabilísticas em cada vértice. A probabilidade de transição  $p(c_{ij}|s_k^p)$  da  $k$ -ésima formiga ao deslocar-se da cidade  $i$  para a cidade  $j$  é dada por:

$$p(c_{ij}|s_k^p) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{c_{il} \in N(s_k^p)} \tau_{il}^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta} & \text{se } j \in N(s_k^p) \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.37)$$

onde  $N(s_k^p)$  é um conjunto de componentes que ainda não fazem parte da solução parcial  $s_k^p$  da formiga  $k$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros que controlam a importância relativa da feromona versus a informação heurística  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ , onde  $d_{ij}$  é o comprimento do componente  $c_{ij}$ , isto é, a aresta  $(i, j)$ .

---

**Pseudocódigo 6** Otimização por Colônia de Formigas (ACO)

---

```

t ← 0
Iniciar os parâmetros:
  Nciclos: número de ciclos
  ρ: taxa de evaporação
  λ: número de formigas
  α e β: importância relativa do rasto de feromona e da informação heurística
while t < Nciclos do
  j ← 0
  while j < λ do
    Construir soluções
    Avaliar soluções
    j ← j + 1
  end while
  Atualizar feromonas
  t ← t + 1
end while

```

---

### 2.4.3.5 Reozimento Simulado (SA)

Os tratamentos de reozimento aos aços inoxidáveis, aços ao carbono e materiais não ferrosos têm o objectivo de, por exemplo, aliviar tensões internas do material, obter uma determinada microestrutura ou proporcionar melhores condições de maquinagem, e

## 2. ESTADO DA ARTE

---

consiste no aquecimento do material e a sua manutenção à temperatura de recozimento, seguido de arrefecimento lento e controlado, permanecendo um tempo determinado em cada patamar de temperatura até ser atingida a temperatura de cristalização, afim de se ter as características desejadas. Nos termos da mecânica estatística, o objectivo é colocar um sólido no seu estado de energia mínima, numa acção que se pode ver, sem preocupações de rigor ou pormenor, como um processo onde a natureza efectua a minimização de um processo com um número interminável de variáveis.

Tal fenómeno é simulado através da introdução de um parâmetro análogo à temperatura e controlá-lo servindo-se do conceito de distribuição de probabilidade de Boltzmann–Gibbs que estabelece que a energia  $E$  de um sistema em equilíbrio térmico à temperatura  $T$  é distribuído probabilisticamente de acordo com a relação

$$P(E) = e^{\frac{-\Delta E}{k_b T}},$$

onde  $P(E)$  representa a probabilidade de atingir o nível de energia  $E$  e  $k_b$  é a constante de Boltzmann que relaciona a temperatura com a energia das moléculas.

O algoritmo proposto por Metropolis *et al.* [66] simula os sistemas termodinâmicos e também pode ser usado no contexto de minimização de funções ao estabelecer a Distribuição de Boltzmann-Gibbs como a probabilidade de selecção de um novo ponto candidato e o nível energético é o valor da função objectivo. Com base nesses pressupostos, Kirkpatrick *et al.* [51] e Černý (1985) de forma independente, estruturaram o método estocástico esquematizado no pseudocódigo 7. A sua parametrização passa pela especificação de uma vizinhança, determinação de uma temperatura inicial  $T_0$  – suficientemente elevada por forma a garantir um resultado independente da solução inicial –, um esquema de arrefecimento – a popular geométrica,  $T_i = cT_{i-1}$  com  $c = [0, 80; 0, 99]$  ou a “slow annealing”,  $T_i = 1/(1 + cT_{i-1})$  com  $c$  positivo e pequeno –, comprimento do patamar  $L$  que estipula a quantidade de soluções geradas em cada nível de temperatura e o critério de paragem que pode ser o número máximo de iterações, a prescrição de um número de soluções candidatas geradas ou a chegada à temperatura de cristalização  $T_f$ . Iniciando num patamar de temperatura e num ponto inicial, o algoritmo dá um passo com probabilidade dada pela distribuição de Boltzmann, e avalia a função objectivo a maximizar ou minimizar. No caso desta, o ponto é aceite se houver descida e o processo recomeça a partir desse novo ponto. No entanto, o incremento também pode ser aceite e esta nuance tem o condão de dar ao algoritmo a possibilidade de libertar-se de um

mínimo local. Nos passos subsequentes, a probabilidade de aceitação de pontos que diminuam o valor da função objectivo vai decrescendo e, no limite, quando a temperatura estiver próxima de zero, só serão aceites aqueles pontos que decrementam a função objectivo.

---

**Pseudocódigo 7** Recozimento Simulado (SA)

---

```
Definir o número de iterações,  $n$ 
Definir o factor de redução de temperatura,  $c$ 
Definir a temperatura inicial,  $T_0$ 
Inicializar o vector inicial  $\mathbf{x}_i$ 
Calcular  $f_i = f(\mathbf{x}_i)$ 
Definir  $i \leftarrow 1$  e  $p \leftarrow 1$  {Inicializa o número de iterações e ciclos}
while Critérios de convergência/paragem não forem satisfeitos do
  while  $i < n$  do
    Gerar  $\mathbf{x}_{i+1}$  na vizinhança de  $\mathbf{x}_i$ 
    Calcular  $f_{i+1} = f(\mathbf{x}_{i+1})$  e  $\Delta f = f_{i+1} - f_i$ 
    Aceitar ou rejeitar  $\mathbf{x}_{i+1}$  com base no critério de Metropolis
    Definir  $i \leftarrow i + 1$ 
  end while
  Actualizar o número de ciclos,  $p \leftarrow p + 1$ 
  Definir  $i \leftarrow i + 1$ 
  Reduzir a temperatura
end while
return Registrar o valor óptimo e terminar
```

---

Até ao momento, o Recozimento Simulado é o único método heurístico cuja propriedade de convergência global foi comprovada teoricamente [1].

### 2.4.3.6 Metaheurísticas

As abordagens heurísticas têm dois grandes inconvenientes. Não só são específicos e sua adaptação a outros problemas é de difícil implementação mas também são normalmente concebidos para encontrar uma única solução de forma eficaz. Porém, geralmente os problemas de engenharia apresentam diversas opções viáveis. Por conseguinte, de modo a mitigar essas limitações, novas linhas de investigação têm aparecido onde busca-se a complementariedade entre algoritmos exactos e heurísticos, chamados de métodos

## 2. ESTADO DA ARTE

---

metaheurísticos.

Os métodos operacionais construtivos metaheurísticos, apresentados de forma abstracta pelo pseudocódigo 8, incorporam dois mecanismos: *intensificação* e *diversificação*. Por um lado, a recombinação de boas soluções com vista à obtenção de soluções ainda melhores é classificada como uma estratégia de *intensificar* a procura enquanto, por outro lado, a *diversificação* é uma estratégia capaz de alargar os horizontes do algoritmo ao explorar diversas regiões do espaço de procura.

---

### Pseudocódigo 8 Estrutura abstracta de um algoritmo metaheurístico

---

```
Parametrizar o algoritmo
Gerar aleatoriamente ou não vector(es) inicial(is)
while critério de paragem não for satisfeito do
  if intensificar then
    Criar nova solução através da intensificação
  else
    Criar nova solução através da diversificação
  end if
  Actualizar a melhor solução encontrada se necessário
end while
return Melhor solução encontrada
```

---

## 2.5 Técnicas de Optimização Multiobjectivo

O modelo de optimização utilizado, por exemplo, na concepção um componente para a indústria automóvel pode conter limitações tais como maximizar a velocidade e/ou minimizar a poluição e/ou minimizar o consumo e/ou maximizar a segurança. Usualmente, tais critérios de performance e design são incompatíveis na medida em que  $f(x)$  pode ser conflitante com  $f(y)$ , isto é, não é possível tornar melhor  $f(x)$  sem agravar  $f(y)$ . Certamente, a complexidade e a incerteza na tomada de decisão conduzem normalmente ao protelamento de decisões importantes pois não existe uma solução óptima única mas sim um conjunto de soluções. É neste campo que os métodos de optimização simultânea multiobjectivo, com recurso às informações sobre a fronteira de Pareto, têm importância ao encontrarem múltiplas soluções ilustrativas de compromissos, denominados de “trade-offs”.



## 2.5 Técnicas de Optimização Multiobjectivo

---

Na sua forma geral, um problema de Optimização Multiobjectivo, ou Optimização de Pareto, é posto da seguinte forma [22]:

$$\min_{\mathbf{x}} \mathcal{F}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})]$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeito a} \quad & g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, N_{rd} \\ & h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, N_{ri} \\ & x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,max} \quad i = 1, 2, \dots, N_{vo} \end{aligned}$$

onde  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  é um vector de  $N_{var}$  variáveis de optimização e  $\mathcal{F}(\mathbf{x})$  é o vector funções objectivo que preenche o espaço de objectivos,  $\mathcal{S}_{eo}$ . A região do espaço das variáveis de optimização limitada pelas restrições de igualdade e desigualdade é denominada de região factível ou espaço de busca,  $\mathcal{S}_{rf}$ . Se a optimização de um objectivo produz uma solução óptima, a de vários objectivos produz um conjunto de soluções chamadas de *não-dominadas* ou *conjunto óptimo de Pareto*. Este conceito de dominância compara todas as soluções, duas a duas, para aferir a dominância, ou não, de uma sobre a outra. Matematicamente,

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1 \succ \mathbf{x}_2 \iff f_h(\mathbf{x}_1) \geq f_h(\mathbf{x}_2) & \forall h, \\ f_h(\mathbf{x}_1) > f_h(\mathbf{x}_2) & \text{para qualquer } h. \end{cases}$$

Por outras palavras, a solução  $\mathbf{x}_1$ , domina a  $\mathbf{x}_2$ , se  $\mathbf{x}_1$  for pelo menos igual a  $\mathbf{x}_2$  em todos os objectivos e, ainda,  $\mathbf{x}_1$  é superior a  $\mathbf{x}_2$  em pelo menos um objectivo.

Os conceitos de óptimo local e global têm também estão presentes na optimização de Pareto. Assim, considerando o conjunto vi vel  $\mathbf{X}$ , o conjunto óptimo local de Pareto tem a formulação

$$\begin{cases} \forall \mathbf{x} \in \underline{\mathcal{P}}, \nexists \mathbf{x}' \in \mathbf{X} \text{ tal que } \|\mathbf{x}' - \mathbf{x}\| < \varepsilon, \\ \mathbf{x}' \succ \mathbf{x}, \mathbf{x} \in \underline{\mathcal{P}}, \end{cases}$$

onde  $\underline{\mathcal{P}}$  é um conjunto de soluções e  $\varepsilon$  um número positivo arbitrariamente pequeno.

Por outro lado, o conjunto óptimo global de Pareto representa-se da seguinte forma

$$\forall \mathbf{x} \in \overline{\mathcal{P}}, \nexists \mathbf{x}' \in \mathbf{X} \text{ tal que } \mathbf{x}' \succ \mathbf{x}.$$

As estratégias de resolução de problemas de optimização multiobjectivo intentam a progressão contínua em direção à Fronteira de Pareto, fronteira esta formada pelos

## 2. ESTADO DA ARTE

---

pontos do espaço das funções objectivo que corresponde ao conjunto Pareto-Ótimo. A fronteira local de Pareto é definida como

$$\mathcal{F}\underline{\mathcal{P}} = \{\mathcal{F}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})), \forall \mathbf{x} \in \underline{\mathcal{P}}\},$$

enquanto a fronteira global define-se como

$$\mathcal{F}\overline{\mathcal{P}} = \{\mathcal{F}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})), \forall \mathbf{x} \in \overline{\mathcal{P}}\}.$$

Os processos de decisão compreendem a decisão antes, durante e depois da procura. Neste último, a optimização é feita sem pressupostos. Dentro desses métodos, o da Soma Ponderada e o da  $\varepsilon$ -Perturbação são os principais entre os tradicionais. O primeiro recorre à combinação convexa das funções objectivo e tem como calcanhar de Aquiles a sua inabilidade em encontrar soluções óptimas em determinadas regiões da fronteira de Pareto se ela for não-convexa. Por outro lado, Método da  $\varepsilon$ -Perturbação escolhe e optimiza, arbitrariamente ou pela relevância, um dos objectivos enquanto os outros passam a restrições do problema. É capaz de encontrar soluções em regiões côncavas de fronteiras de Pareto não-convexas mas o seu manuseio é impraticável pois fornece somente uma solução a cada execução e implica um conhecimento pormenorizado do problema.

Apesar da comprovada convergência, a convexidade e a continuidade da fronteira de Pareto põem problemas de elevada complexidade aos métodos tradicionais pois tais métodos são praticamente inexequíveis para problemas de alguma envergadura ou em problemas onde o espaço de procura é discreto. Neste cenário emergem os algoritmos evolucionários, técnicas modernas de optimização, providos de robustez. As principais abordagens são Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) e Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA).

Quando os conceitos supracitados são aplicados ao projeto de design de redes de distribuição de água, deverá existir sempre um “trade-off” a ser feito entre os custos de projecto, custo operacional, déficit de carga piezométrica ao longo da rede, fiabilidade de rede e qualidade da água [31].

### 2.6 Optimização por Enumeração Total e Tentativa e Erro

O Método de Enumeração Total faz parte da classe dos procedimentos discretos e resolve problemas de optimização comparando e verificando a viabilidade de todos os cenários

possíveis dentro do espaço de procura através de combinações dos valores discretos das variáveis. No entanto, a quantidade de possibilidades crescerá exponencialmente à medida que aumenta o número de variáveis de optimização, provocando uma *explosão combinatorial*.

Uma quantidade assinalável do desenvolvimento técnico-científico ao longo da história da humanidade deve-se ao ineficiente método dedutivo de tentativa e eliminação de erro, e ao acaso. Tal método iterativo de procura de boas soluções, padrões ou generalizações visa a resolução de novos problemas partindo de soluções experimentais bem-sucedidas e decorre após o estabelecimento de hipóteses, visando confirmar a sua veracidade ou robustez, o que levou o filósofo Karl Popper [76] a vislumbrar coincidências entre essa exploração do potencial criativo do erro e a forma como a natureza modifica-se rumo à evolução enquanto elimina factores de ineficiências.

## 2.7 Notas Finais

Este capítulo foi dedicado ao Estado da Arte no que diz respeito à optimização de recursos hídricos. Iniciou-se pela apresentação, de uma forma não exaustiva, dos principais desenvolvimentos que têm ocorrido nos últimos sessenta anos. Apresentou-se de seguida a anatomia de um sistema de distribuição de água e os conceitos associados à sua simulação hidráulica. No seguimento, procurou-se apresentar o quadro global das abordagens à optimização de funções uniojectivo e multiobjectivos, fechando o círculo sobre o processo que de forma simplificada se apresenta como:

$$\text{Problema} \implies \text{Modelo} \implies \text{Resultado}$$

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Parte II

Metodologia



# 3

## Estudo de Algoritmos Seleccionados

Nothing at all takes place in the universe in which some rule of the maximum or minimum does not apply.

---

Leonhard Euler (1707–1783)

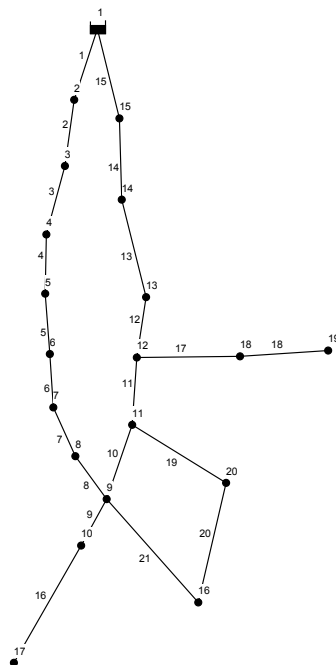
### 3.1 Algoritmos Seleccionados no Âmbito da Dissertação

O investigador Angus Simpson [88] ilustra a dimensão do problema recorrendo à clássica rede de distribuição “New York Tunnel (NYT)” proposta por Schaake & Lai [85] e apresentada na Figura 3.1. Regularmente usada na avaliação comparativa de algoritmos quando aplicados a sistemas de abastecimento de água, a rede é abastecida por

### 3. ESTUDO DE ALGORITMOS SELECIONADOS

---

gravidade a partir de um reservatório e consiste em 20 nós de consumo ligados por 21 túneis. Assumindo que qualquer das 21 tubagens da rede pode ser duplicada, estando disponíveis comercialmente 16 diâmetros e eliminando 99,9999% das possíveis soluções através da experiência de engenharia, ainda sobrariam 19.342.813.114.390.300.000 soluções. Assim, a 100 avaliações por segundo, levaria 6 mil milhões de anos para analisar todas as possibilidades de combinação. Certamente, este é um problema de optimização complexo e, por vezes, até impossível. Vários processos têm sido aplicados ao longo das últimas décadas no sentido de o resolver, desde a optimização global [2], passando pela programação linear [3, 33, 50] e não-linear [96]. Do mesmo modo, muitas heurísticas também têm sido utilizadas [84], sendo que esta Dissertação lança mãos a duas delas.



**Figura 3.1:** Traçado da Rede “New York Tunnel (NYT)” - Características: um reservatório, 20 nós e 21 tubagens

#### 3.1.1 HDEPSO

Desenvolvido por Caseiro [8], esta plataforma modular evolucionária populacional, apresentada no Pseudocódigo 9, está baseada nos algoritmos Evolução Diferencial (DE) e Optimização por Enxame de Partículas (PSO), cuja principal característica é reunir as vantagens de cada um dos algoritmos que servem de base e que estão alinhados em série,



### 3.1 Algoritmos Seleccionados no Âmbito da Dissertação

---

realizando um número determinado de iterações recorrendo ao DE e posteriormente o mesmo número de execuções ao PSO até ser atingido o critério de paragem.

Esta metaheurística aplica diferentes estratégias aos dois métodos que serviram de base com vista a melhorar a capacidade de exploração global e a velocidade de convergência. Concebido para ser aplicado em problemas específicos de Engenharia Mecânica e Mecânica Computacional, o HDEPSO apresentou bons resultados e boas velocidades de convergência quando aplicado a problemas de optimização estrutural e identificação de parâmetros de modelos constitutivos.

---

#### **Pseudocódigo 9** Híbrido de DE com PSO (HDEPSO)

---

```
Parametrizar os algoritmos
Gerar aleatoriamente o vector inicial
if usarDE then
    Executar a Evolução Diferencial
    if DEestagnar = TRUE then
        Executar a Optimização por Enxame de Partículas
    end if
else
    Executar a Optimização por Enxame de Partículas
    if PSOestagnar = TRUE then
        Executar a Evolução Diferencial
    end if
end if
return Melhor solução encontrada
```

---

#### 3.1.2 GA-MPC

O “Genetic Algorithm with a New Multi-Parent Crossover (GA-MPC)” esquematizado no pseudocódigo 10 foi desenvolvido por Elsayed [28] no âmbito do “2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation” de onde saiu-se vencedor da competição “Evolutionary Algorithms on Real-world Numerical Optimization Problems”.

O algoritmo começa uma população inicial de tamanho  $PS$  gerada aleatoriamente e os seus melhores  $m$  indivíduos são armazenados num arquivo, ordenados de acordo com o seu “fitness” e/ou violações de restrições. Um torneio selectivo de tamanho  $tc$  é levado a cabo de forma a seleccionar as melhores soluções, que por sua vez, são armazenados

### 3. ESTUDO DE ALGORITMOS SELECIONADOS

---

para a efetivação da recombinação, com taxa de “crossover”  $CR$ , onde três progenitores são usados para gerar três descendentes, numa operação aleatória de probabilidade  $p$  para cada novo descendente. Estes descendentes são mesclados com os indivíduos do arquivo com vista à selecção dos melhores  $PS$  indivíduos, de acordo com o seu *fitness* e/ou violações de restrições, com o objectivo de gerar a população da próxima geração e ao mesmo tempo actualizar o arquivo.

## 3.2 Funções Matemáticas Para Análise Comparativa

É sabido que os métodos de optimização sofrem da “maldição da dimensionalidade” [5]. Assim, o estudo da sua amplitude e a robustez dos métodos é normalmente feito através da aplicação desses processos em funções que apresentam elevados níveis de complexidade. A seguir, apresenta-se seis funções de teste amplamente utilizadas [74].

### 3.2.1 Função de Ackley

Esta função multimodal, contínua e separável é apresentada na Fig. 3.2. Ela avalia, a duas dimensões ( $D = 2$ ), os valores de

$$f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{D-1} \left( e^{-0.2 \sqrt{x_i^2 + x_{i+1}^2}} + 3 (\cos(2x_i) + \sin(2x_{i+1})) \right), \quad (3.1)$$

no domínio  $|\mathbf{x}_i| \leq 30$ . O valor mínimo global é  $f_1(\mathbf{x}^*) = -4.5901016$  em  $\mathbf{x}^* = (\pm 1.5096201, -0.7548651)$ .

### 3.2.2 Função de Himmelblau

Esta função multimodal e contínua é apresentada na Fig. 3.3, avalia, a duas dimensões ( $D = 2$ ), os valores de

$$f_2(\mathbf{x}) = (x_1^2 + x_2 - 11)^2 + (x_1 + x_2^2 - 7)^2, \quad (3.2)$$

dentro do domínio  $|\mathbf{x}_i| \leq 6$ . Tem quatro mínimos globais de  $f_2(\mathbf{x}^*) = 0$  para  $\mathbf{x}^* = (3, 2)$ ,  $\mathbf{x}^* = (-2.805118, 3.131312)$ ,  $\mathbf{x}^* = (-3.779310, -3.283185)$  e  $\mathbf{x}^* = (3.584428, -1.848126)$ .

---

**Pseudocódigo 10** Genetic Algorithm with a New Multi-Parent Crossover (GA-MPC)

---

Definir parâmetros:  $N$ ,  $PS$ ,  $tc$ ,  $p$ ,  $m$ ,  $cr$

Estabelecer o critério de paragem:  $MaxGen$

$t \leftarrow 0$

Gerar a população inicial:  $x_{ij} = x_{ij,min} + u(x_{ij,max} - x_{ij,min})$ ,  $u \in [0, 1]$

**while**  $MaxGen$  não for atingido **do**

    Avaliar a população

    Ordenar a população de acordo com o seu “fitness” e/ou violações de restrições

    Armazenar  $m$  melhores indivíduos no arquivo

    Efectuar o torneio selectivo de tamanho aleatório, assumindo o valor 2 ou 3

**for** A cada três descendente **do**

**if**  $u \in [0, 1] < cr$  **then**

            Ordenar os três indivíduos por  $f(x_i) \leq f(x_{i+1}) \leq f(x_{i+2})$

**if** Indivíduos repetidos **then**

                Substituir um deles por outro escolhido aleatoriamente no pote do torneio

**end if**

            Calcular  $\beta = v \sim \mathcal{N}(m, \sigma^2)$

            Gerar três descendentes

$o_1 = x_1 + \beta(x_2 - x_3)$

$o_2 = x_1 + \beta(x_3 - x_1)$

$o_3 = x_1 + \beta(x_1 - x_2)$

**for** Cada  $o_i^j$  **do**

                Gerar  $u \in [0, 1]$

                Verificar duplicação

**end for**

**end if**

**end for**

    Determinar:  $t = t + 1$

**end while**

**return** Registrar valor óptimo

---

### 3. ESTUDO DE ALGORITMOS SELECIONADOS

---

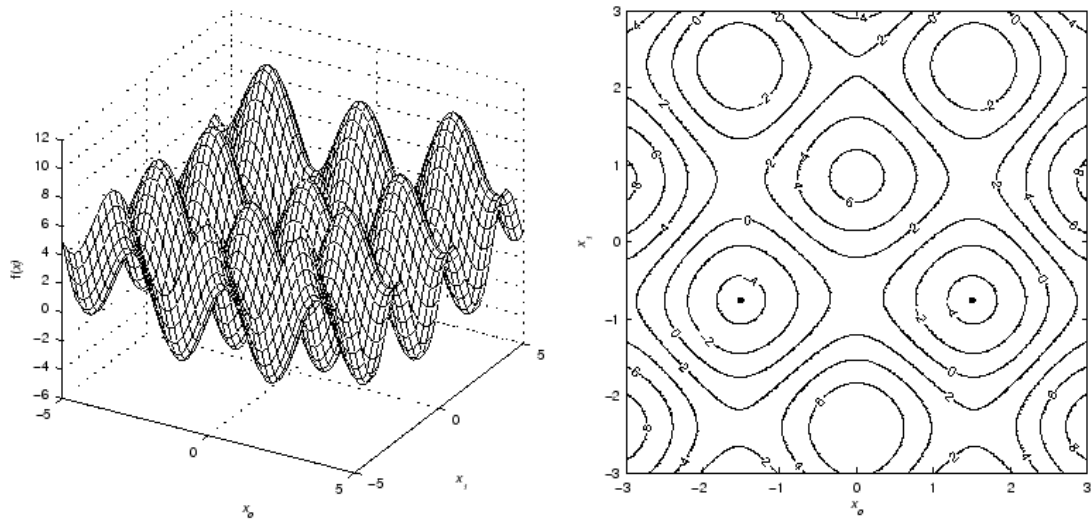


Figura 3.2: Função de Ackley. - Gráficos Tridimensional e de Contorno.

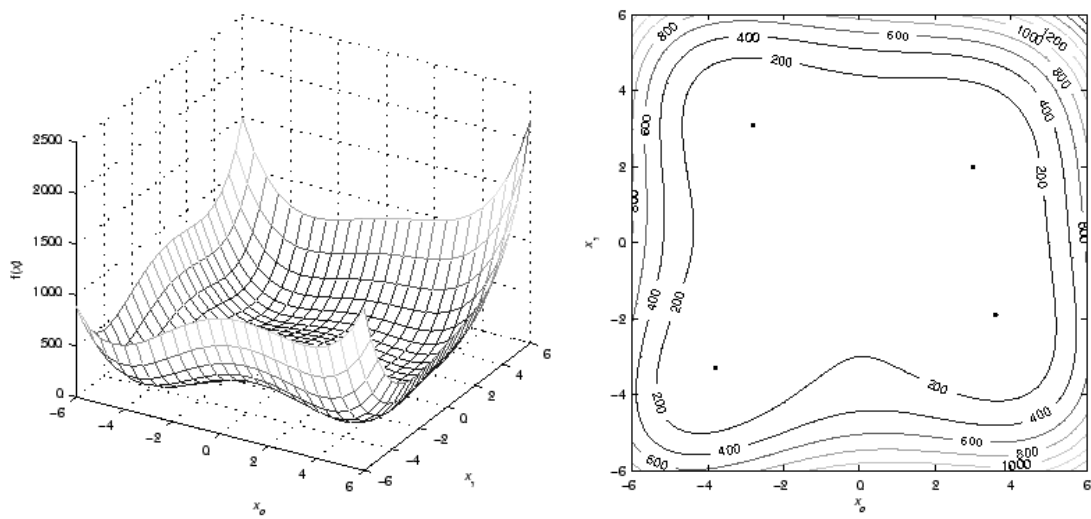


Figura 3.3: Função de Himmelblau - Gráficos Tridimensional e de Contorno.

### 3.2.3 Função de Rastrigin

Esta função multimodal, contínua, separável é apresentada na Fig. 3.4, avalia os valores de

$$f_3(\mathbf{x}) = 10D + \sum_{i=1}^D (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)), \quad (3.3)$$

O domínio de teste é  $|\mathbf{x}_i| \leq 5.12$  e apresenta um mínimo global de  $f_3(\mathbf{x}^*) = 0$  para  $x_i^* = 0, \quad i = 1, \dots, D$ .

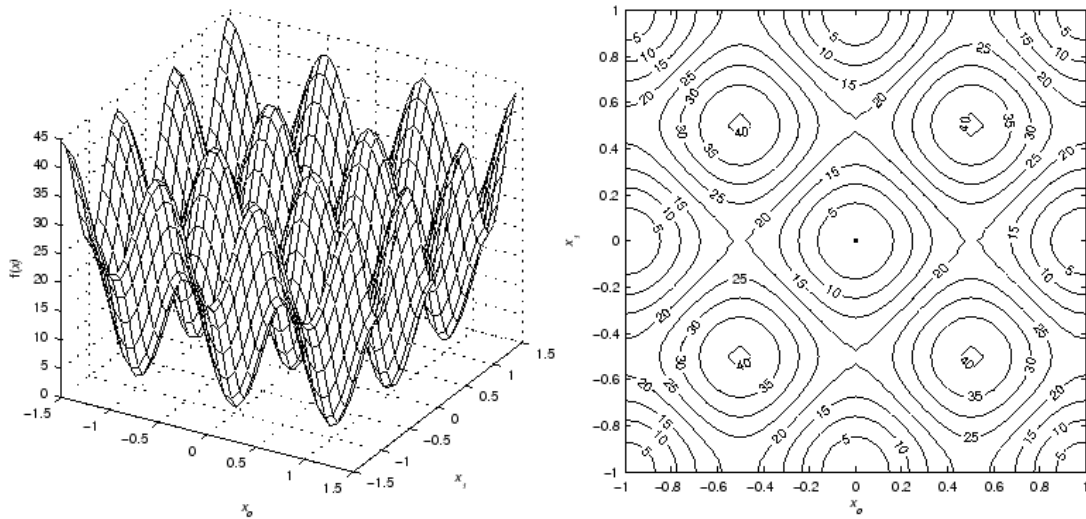


Figura 3.4: Função de Rastrigin - Gráficos Tridimensional e de Contorno.

### 3.2.4 Função de Rosenbrock

Esta função unimodal, não-separável, contínua e regular, multimodal para  $D > 3$ , apresentada na Fig. 3.5, avalia os valores de

$$f_4(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{D-1} (100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (1 - x_i)^2), \quad (3.4)$$

dentro do domínio  $|\mathbf{x}_i| \leq 10$ . O valor do mínimo global é  $f_4(\mathbf{x}^*) = 0$  em  $\mathbf{x}_i^* = 1, \quad i = 1, \dots, D$ .

### 3. ESTUDO DE ALGORITMOS SELECIONADOS

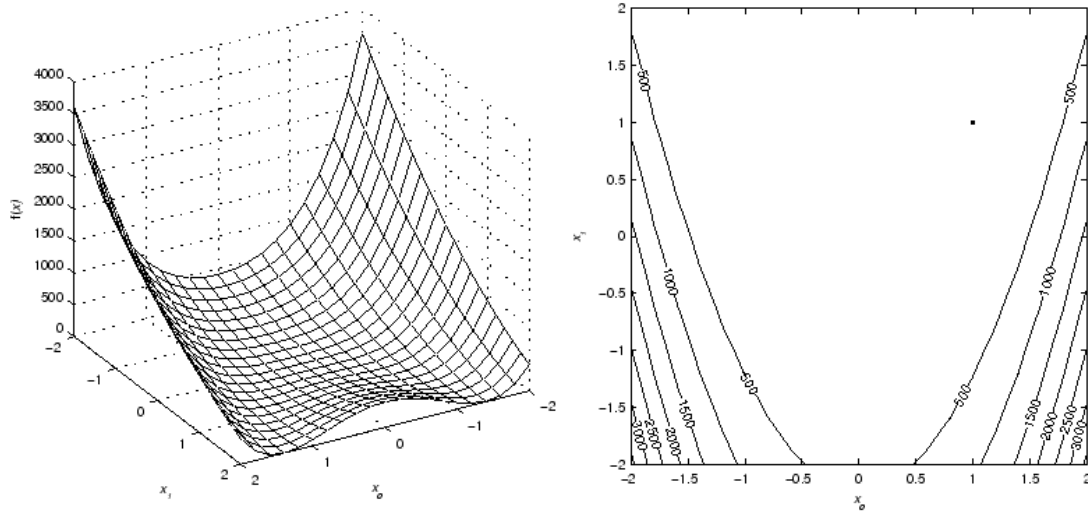


Figura 3.5: Função de Rosenbrock - Gráficos Tridimensional e de Contorno.

#### 3.2.5 Função de Salomon

Esta função multimodal e não-separável, apresentada na Fig. 3.6, avalia os valores de

$$f_5(\mathbf{x}) = -\cos\left(2\pi\sqrt{\sum_{i=1}^D x_i^2}\right) + 0.1\sqrt{\sum_{i=1}^D x_i^2 + 1}, \quad (3.5)$$

no domínio  $|x_i| \leq 100$ . Tem o mínimo global de  $f_5(\mathbf{x}^*) = 0$  em  $\mathbf{x}_i^* = 0$ ,  $i = 1, \dots, D$ .

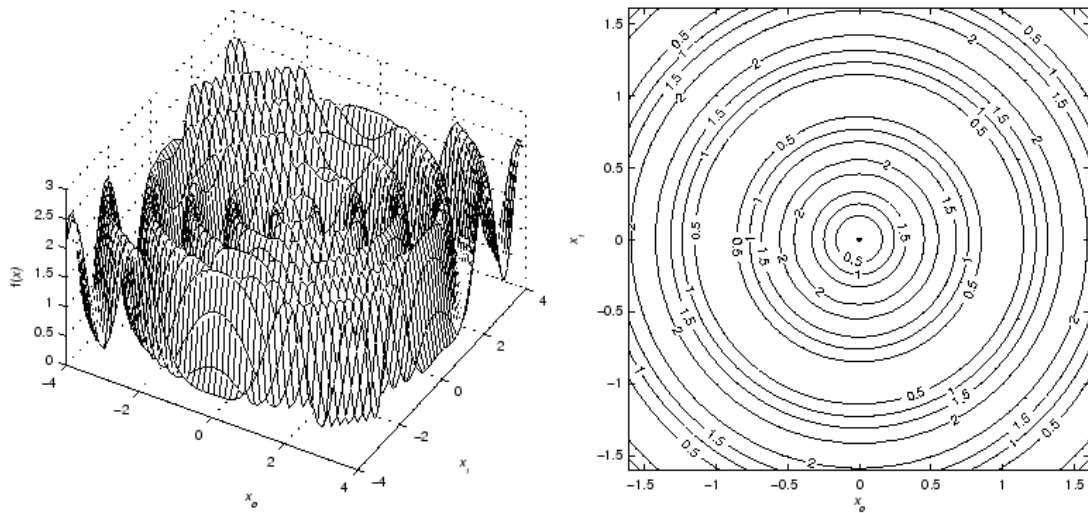


Figura 3.6: Função de Salomon - Gráficos Tridimensional e de Contorno.

### 3.2.6 Função de Schwefel

Esta função multimodal, separável e descontínua, apresentada na Fig. 3.7, avalia os valores de

$$f_6(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^D -x_i \sin(\sqrt{|x_i|})}{D}, \quad (3.6)$$

no domínio  $|x_i| \leq 512$ . O valor mínimo global é  $f_6(\mathbf{x}^*) = -418.982887$  em  $\mathbf{x}_i^* = 420.968746$ ,  $i = 1, \dots, D$ .

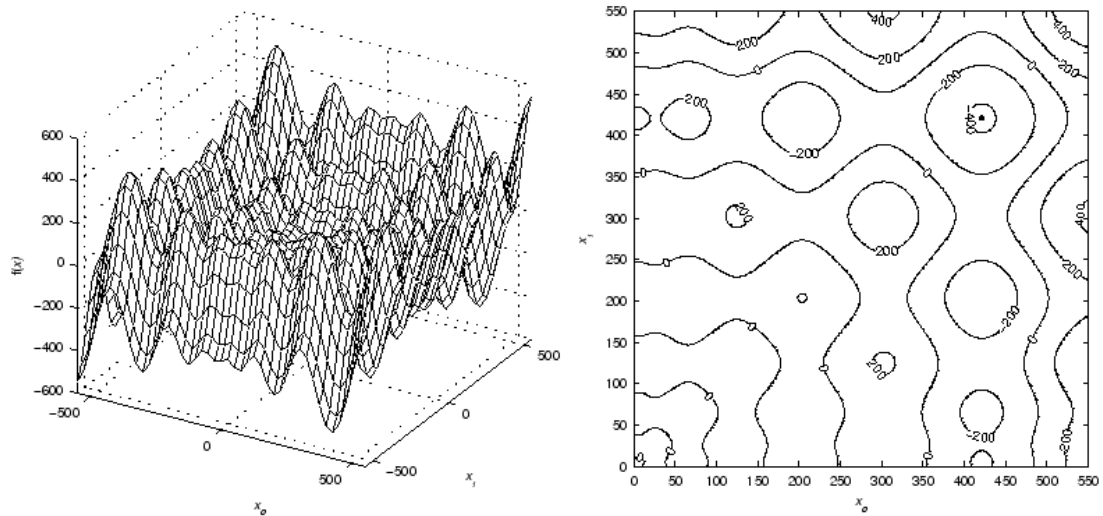


Figura 3.7: Função de Schwefel - Gráficos Tridimensional e de Contorno.

### 3.2.7 Avaliação Comparativa de Resultados

A Tabela 3.1 apresenta os resultados em termos do ponto ótimo encontrado, o valor respectivo e o tempo computacional exigido na aplicação dos algoritmos seleccionados, parametrizados da mesma forma para facultar uma boa aferição competitiva. Assim, para duas dimensões ( $D = 2$ ), o tamanho da população foi afixada em 10 e o número máximo de gerações foi afixado em 500. As funções matemáticas estão referenciadas de seguinte forma: Ackley (F1), Himmelblau (F2), Rastrigin (F3), Rosenbrock (F4), Salomon (F5) e Schwefel (F6) e as células sombreadas indicam os melhores resultados obtidos. Inference-se da leitura da tabela que o GA-MPC superiorizou-se em todas as funções no que diz respeito ao cálculo do valor ótimo. Por outro lado, o HDEPSO esteve mais perto do valor ótimo teórico conhecido em três instâncias (F2, F5 e F6).

### 3. ESTUDO DE ALGORITMOS SELECIONADOS

Ainda neste particular, o GA-MPC esteve mais perto do óptimo teórico somente na F4, sendo que ambos lograram o valor óptimo de F1 e F3. Por fim, nota-se que os algoritmos chegaram a pontos óptimos diferentes na F4, que possui quatro mínimos globais.

**Tabela 3.1:** Performance dos algoritmos quando aplicados às funções matemáticas

	Identificação das Funções					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
<b>Valores Teóricos</b>						
Valor Óptimo	-4,5901	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-418,9556
Vector Óptimo	$\pm 1.5096$	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	420.9687
	-0.7549	2,0000	0,0000	0,0000	0,0000	420.9687
	-	-2.8051	-	-	-	-
	-	3.1313	-	-	-	-
	-	-3.7793	-	-	-	-
	-	-3.2832	-	-	-	-
	-	3.5844	-	-	-	-
	-	-1.8481	-	-	-	-
<b>HDEPSO</b>						
Óptimo Calculado	-4,5901	0,0000	0,0000	0,0859	0,0134	-418,9556
Vector Óptimo	1,5095	3,5844	0,0000	1,2916	0,0047	421,1746
	-0,7556	-1,8482	0,0000	1,6655	-0,0228	421,5928
Tempo (s)	0,1406	0,1875	0,1875	0,1094	0,1875	0,1250
<b>GA-MPC</b>						
Óptimo Calculado	-4,5901	0,0002	0,0000	0,0003	0,0690	-417,1659
Vector Óptimo	-1,5096	-3,7774	0,4891	1,0185	4,7487	415,8065
	-0,7540	-3,2832	2,1525	1,0373	3,4864	422,4647
Tempo (s)	$\approx 0,0000$	0,0312	0,0312	$\approx 0000$	0,0156	0,0156



# 4

## Modelação Matemática e Implementação

Se os factos não se encaixam na  
teoria, modifique os factos.

---

Albert Einstein (1879–1955)

### 4.1 Metodologia Geral

Projectar sistemas mecânicos de forma mais eficiente, quer seja a concepção da forma de uma prótese para uma anca, o peso mínimo de uma treliça ou o baixo custo de um motor, constitui um desafio aliciante para equipas de engenheiros pois o objectivo passa quase sempre por respeitar a integridade global do problema em causa. Esse processo de

## 4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO

---

projecto óptimo começa com a recolha de dados e informações, envolve a identificação de um conjunto de variáveis de projecto e as relações de interdependência entre elas, passa pela definição de uma função objectivo a otimizar e as funções de restrição ou limitações ao sistema. Certamente, num sistema mensurável, onde é possível discriminar o “bom” e o “mau”, o processo de optimização visa obter o “melhor”.

### 4.2 Formulação e Representação do Problema Específico

Apresenta-se seguidamente uma breve revisão dos principais postulados matemáticos da técnica de modelação, cujos princípios, formulação e limitações constituem a pedra basilar da análise de sistemas de transporte e distribuição de água.

O modelo matemático de um sistema dinâmico é caracterizado e confinado às leis que regem o fenómeno em estudo por um conjunto de equações que definem, com um determinado grau de fiabilidade, a dinâmica do sistema. Tanto essas funções como aquelas que impõem restrições à modelação matemática podem ser lineares ou não-lineares em relação às variáveis de projeto. Assim, os métodos de optimização podem ser classificados em programação linear e programação não-linear.

Uma das estratégias utilizadas na resolução de problemas não lineares com restrições resume-se a uma formulação simplificada do problema, fazendo com que a solução seja aproximada à solução do problema original. Assim, vários métodos são empregues, nomeadamente, o métodos de penalidade, o método dos gradientes reduzidos ou métodos baseados em funções Lagrangeanas aumentadas.

#### 4.2.1 Descrição da Função Objectivo

A eficiência na utilização dos recursos num Sistema de Distribuição de Água passa inexoravelmente pela adaptação aos picos de preços energéticos evitando o consumo de electricidade desnecessário e fomentando um funcionamento eficiente, reduzindo custos operacionais.

Nesse processo, procura-se minimizar o custo de bombagem, o custo do tratamento químico e os custos de recolha e armazenamento, sujeito às restrições da rede e operacionais. Assim, o problema de encontrar a melhor relação custo-eficácia na operação de um Sistema de Distribuição de Água pode ser posto da seguinte forma [64]:

Minimizar a **Função Objectivo**

$$\text{Custo Total} = \text{Custos de Investimento} + \text{Custo de Operação}$$

Sujeita aos seguintes **Constrangimentos**

- Leis de Conservação de Massa e Energia
- Restrições devido ao consumo de água
- Atender aos requisitos das pressões nodais
- Complexidades adicionais: reabilitação, fiabilidade, qualidade da água . . .

Certamente, um dos elementos críticos na melhoria do desempenho energético e operacional de um sistema de distribuição de água é a minimização do consumo de energia nos sistemas de bombagem e do ponto de vista dos especialistas, pouca atenção tem sido dada à redução do uso de energia eléctrica nos sistemas de distribuição de água. O relatório produzido por Borrego et al. [6] concluiu que “verificam-se a existência de lacunas (...) a nível da definição de objectivos e metas concretas para a gestão do respectivo recurso hídrico” e tal torna-se claro através da consulta ao Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais 2007-2013 (PEAASAR II) onde a análise SWOT feita ao sector não conseguiu identificar tal oportunidade, não obstante o vago reconhecimento da necessidade da “optimização da gestão operacional e eliminação de ineficiências”.

Naturalmente, otimizar a operação das bombas ao afectar a maior solicitação energética para os períodos de menor custo tarifário é a estratégia mais adequada para uma efectiva redução de custos operacionais. O consumo de energia na maioria dos sistemas de água em todo o mundo poderia ser reduzido nas proximidades dos 25% mediante a implementação de acções de eficiência energética dado que os sistemas de bombagem representam a maior fatia do consumo de energia dos sistemas abastecimento e tratamento de água. Ao longo da vida de uma bomba típica, quando todos os custos de operação e manutenção da bomba são considerados, embora o seu custo de investimento representar cerca 3% do custo total de um projecto, ela consome cerca de 74% da energia [44].

Importa salientar um estudo do U.S. Department of Energy [73] que aponta a optimização operacional como responsável pela economia energética à volta dos 20% e que são perfeitamente exequíveis valores entre 30 a 40%. Por outro lado, um estudo de caso

#### 4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO

---

levado a cabo pela “The Alliance to Save Energy” no bairro de Volcanes de Los Tuxtlas (Município de Veracruz, México), com uma população de cerca de 25.000 habitantes, logrou a optimização da eficiência eletromecânica, reduzindo o emprego de energia em 24% enquanto a intensidade de energia foi reduzida em 19% [4].

Assim, a obtenção de um plano óptimo de desempenho para as bombas de forma a minimizar os custos energéticos enquanto acatam-se simultaneamente as restrições operacionais da rede pode ser verbalizada do seguinte modo:

Encontrar  $0 \leq x_1, x_2, \dots, x_n \leq 1$  de forma a

Minimizar a **Função Objectivo**

$$C^T(x_1, x_2, \dots, x_n) = C^E(x_1, x_2, \dots, x_n) + C^P(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad [€] \quad (4.1)$$

Sujeita às **Restrições**

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = Q_e \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^N \Delta H_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots \text{Quantidade de Tubagens} \quad (4.3)$$

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{max} \quad i = 1, 2, \dots \text{Quantidade de Nós} \quad (4.4)$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad i = 1, 2, \dots \text{Quantidade de Tanques} \quad (4.5)$$

$$T_{i,00:00} = T_{i,24:00} \quad i = 1, 2, \dots \text{Quantidade de Tanques} \quad (4.6)$$

onde o conjunto de variáveis  $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  representa o padrão temporal de funcionamento da bomba durante um ciclo operacional com  $n$  períodos de tempo, onde cada variável assume valores entre  $[0, 1]$ , sendo que 0 representa a bomba desligada durante o período de tempo respectivo e 1 representa o funcionamento integral durante esse período. A função objectivo  $C^T(x_1, x_2, \dots, x_n)$  representa o custo total de operação da bomba, a parcela  $C^E(x_1, x_2, \dots, x_n)$  representa o custo da energia necessária à sua operação enquanto  $C^P(x_1, x_2, \dots, x_n)$  diz respeito ao custo da penalidade aplicada quando alguma restrição é violada. Tais restrições obedecem aos requisitos típicos de modelação de uma rede de abastecimento de água. Assim, a Equação 4.2 intenta assegurar a Conservação da Massa anteriormente apresentada na Equação 2.19, uma das leis fundamentais da Mecânica Clássica que estabelece que a massa se conserva. Assim,

## 4.2 Formulação e Representação do Problema Específico

---

o caudal que entra na rede é a mesma que sai dela. A Equação 4.3, remete-se à Lei de Kirchhoff das Malhas – enunciada previamente na Equação 2.21 – que estipula que soma algébrica das perdas de carga dentro de uma malha é nula, assegurando a Conservação da Energia. A Equação 4.4 estabelece limiares superior e inferior à cota piezométrica nos nós de ligação com consumo, por forma a manter pressões necessárias ao longo da rede. A Equação 4.5 mantém um certo volume de água nos tanque por forma a evitar o esvaziamento ou o transbordo e assegurar um nível adequado para, por exemplo, situações de emergência. Por fim, a Equação 4.6 assevera a periodicidade operacional que impõe que o nível final dos reservatórios deve ser igual ao nível estabelecido no início da simulação.

Evidentemente, a energia é usada ao longo da cadeia que compõe um sistema de distribuição de água, começando na recolha e passando pelo tratamento, armazenamento e distribuição. O seu custo é composto pelo preço da energia consumida num determinado período tarifário e o da potência contratada. Assim, esse custo energético pode ser calculado da seguinte maneira,

$$C^E = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{t=0}^T E_n(t) C_n(t) + \sum_{pf=1}^{npf} E_{max,n}^{pf} C_n(pf) \right] \quad [€], \quad (4.7)$$

onde  $n$  é o número de bombas que suportam o sistema,  $T$  é tempo de ciclo em estudo,  $E_n(t)$  é o consumo energético entre o período  $t$  e o  $t + 1$ ,  $C_n(t)$  é o custo energético unitário da  $n$ -ésima bomba no período de operação  $t$ ,  $E_{max,n}$  é o máximo consumo energético da  $n$ -ésima bomba durante o período de  $pf$  de facturação,  $npf$  é a quantidade de períodos de facturação existentes,  $C_n(pf)$  é o custo de procura máximo da  $n$ -ésima bomba durante o período de facturação  $pf$ .

A infracção às restrições previamente enunciadas pressupõe a penalização. Assim, custo penalizatório pode ser matematicamente apresentado como:

$$C^P = \sum_{i=1}^M \left[ \sum_{t=1}^{24} C_i^{Pr}(t) \right] + \sum_{j=1}^T \left[ \sum_{t=1}^{24} C_j^L(t) + C_j^{Pe} \right] \quad [€], \quad (4.8)$$

onde  $M$  é a quantidade de nós na rede,  $T$  é a quantidade de reservatórios,  $t$  é a quantidade de períodos temporais,  $C^{Pr}$  é a penalidade concernente à violação dos limiares da pressão,  $C^L$  é a penalidade respeitante à violação dos limiares do nível nos reservatórios e  $C^{Pe}$  é a penalidade relativa à violação da periodicidade operacional.

## 4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO

---

A penalidade concernente à pressão, unicamente aplicada aos nós com consumo ou procura (demanda), é expressa por:

$$C_i^{Pr}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } P_{i,min} \leq P_i(t) \leq P_{i,max} \\ \alpha_p \{\min[0, P_i(t) - P_{i,min}]\}^2 & \text{se } P_i(t) < P_{i,min} \\ \alpha_p \{\min[0, P_{i,max} - P_i(t)]\}^2 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde  $\alpha_p$  é o termo de penalização afixado para esta tipologia de restrição,  $P_i(t)$  é a pressão do  $i$ -ésimo nó de ligação no período de simulação  $t$ ,  $P_{i,min}$  e  $P_{i,max}$  são respectivamente a pressão mínima e máxima exigidas para o  $i$ -ésimo nó de ligação. Dependendo da formulação do problema,  $\alpha_p$  pode ter valores diferentes para cada limiar e os valores de  $P_{i,min}$  podem ser iguais para todos os nós com consumo, o mesmo acontecendo para  $P_{i,max}$ .

A penalidade concernente ao nível nos reservatórios é expressa por

$$C_j^L(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } L_{j,min} \leq L_j(t) \leq L_{j,max} \\ \beta_l \{\min[0, L_j(t) - L_{j,min}]\}^2 & \text{se } L_j(t) < L_{j,min} \\ \beta_l \{\min[0, L_{j,max} - L_j(t)]\}^2 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde  $\beta_l$  é o termo de penalização afixado para esta tipologia de restrição,  $L_j(t)$  é o nível do  $j$ -ésimo reservatório de armazenamento no período de simulação  $t$  enquanto  $L_{j,min}$  e  $L_{j,max}$  são respectivamente o nível mínimo e máximo de operação para o  $j$ -ésimo reservatório. Também, dependendo da formulação do problema,  $\beta_l$  pode ter valores diferentes para cada limiar e os valores de  $L_{j,min}$  e  $L_{j,max}$  podem depender de reservatório para reservatório.

Por fim, a penalidade concernente à periodicidade é expressa por

$$C_j^{Pe}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } L_{j,00:00} = L_{j,24:00} \\ \gamma [L_{j,24:00} - L_{j,00:00}]^2 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde  $\gamma$  é o termo de penalização afixado para esta tipologia de restrição,  $L_{j,00:00}$  é o nível no reservatório no início da simulação e  $L_{j,24:00}$  é o nível no reservatório no final da simulação.

### 4.2.2 Tratamento das Restrições

As pseudofunções de penalização acima propostas foram apresentadas por Goldman [37], que considera que a condição de periodicidade proposta por Cohen [13] é “extremamente

## 4.2 Formulação e Representação do Problema Específico

---

severa” para sistemas com mais de um tanque. Numa tal configuração, mesmo igualando o volume bombado e a água consumida, tal não faz com que os tanques voltem ao nível inicial, a menos que os tanques estejam cheios no início do ciclo, uma vez que um tanque pode fornecer água ao outro. Assim, uma formulação mais relaxada estabelece que o volume de água nos reservatórios no final do período de simulação não será menor do que o volume no início do período de simulação, a fim de alcançar a periodicidade entre a oferta e a procura.

Dentro dessa linha, López-Ibáñez [58] e López-Ibáñez *et al.* [59] introduzem o conceito de “défice volumétrico”, uma diferença percentual entre o volume inicial e o volume final de água. Assim, para todos os tanques, se o déficit de volume for positivo (ou maior que uma tolerância ao déficit prescrita), esse valor é adicionado ao déficit volumétrico total da simulação por forma a evitar que o excedente num tanque provoque a compensação noutro. Quando o déficit volumétrico total não é nulo, a oferta e a procura não estão equilibradas e o déficit terá de ser recuperado no período de simulação seguinte, aumentando os custos operacionais. Assim, o tratamento de restrições deve dar preferência a soluções que apresentem um déficit volumétrico total nulo, senão existe um desequilíbrio entre a procura e a oferta. Assim, se o déficit volumétrico dum tanque é maior que a tolerância ao déficit, a programação da operação de bombagem é considerada inviável.

Assim, define-se o *défice volumétrico* como

$$\Delta V_k = 100 \cdot \frac{V_{k,i} - V_{k,f}}{V_{k,i}}, \quad (4.9)$$

onde  $V_k$  é o déficit volumétrico do reservatório  $k$  de nível variável,  $V_{k,i}$  é o seu nível no início da simulação e  $V_{k,f}$  é o seu nível final.

As parcelas do *défice volumétrico total* são dadas por,

$$\Delta V'_k = \begin{cases} \Delta V_k & \text{se } \Delta V_k > \Delta V^{tol} \\ 0 & \text{noutros casos,} \end{cases} \quad (4.10)$$

onde  $\Delta V^{tol}$  é a tolerância ao déficit volumétrico. Assim, o *défice volumétrico total* toma a forma seguinte:

$$\Delta V = \sum_{k=1}^{N^t} \Delta V'_k, \quad (4.11)$$

onde  $N^t$  é a quantidade de tanque de nível variável presentes no sistema em análise. No presente trabalho, considera-se uma tolerância ao déficit volumétrico nula ( $\Delta V^{tol} = 0$ ).

#### 4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO

---

Com respeito aos termos de penalização aplicados, eles obedecem a um dos pressupostos definidos por “tentativa e erro” onde definiu-se que no caso de haver uma violação de 1% dos limiares, haverá uma penalização, função da distância à região de viabilidade, igual ao valor do custo operacional máximo da rede em avaliação, numa aproximação à Regra da Penalidade Mínima aplicada aos algoritmos evolucionários, atendendo ao facto de as abordagens heurísticas encontrarem por vezes grandes dificuldades quando confrontadas com restrições. A constatação que estipula que, idealmente, a penalidade deve ser mantida tão baixa quanto possível, logo acima do limite abaixo do qual as soluções inviáveis são óptimas, devido ao facto de que se a penalidade for demasiadamente elevada ou demasiadamente baixa, o problema torna-se GA-Hard [12]. Por outro lado, tal função, tomada como um indicador de viabilidade, é nula quando os valores das restrições consideradas estão dentro da região de viabilidade. Importa salientar que existem diversas abordagens às funções de penalidade, sendo que normalmente estão relacionadas com a quantidade de restrições violadas, o grau de violação ou a dimensão do espaço de procura.

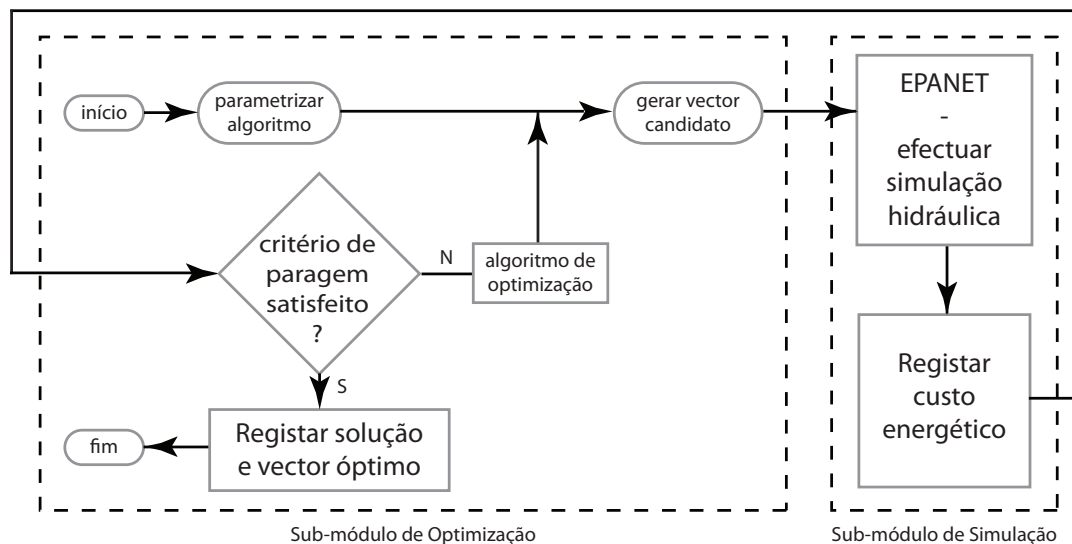
A finalizar, importa referir que as abordagens de optimização anteriores ao ano 2000 foram duramente criticados por Walski [98], apresentando um rol de razões práticas, onde pontificam: a dificuldade para os engenheiros na definição da função objectivo e restrições, o facto de não poder existir um único padrão de consumo (demanda), a constatação de que a optimização não leva em conta o facto de que um sistema de distribuição não é construído integralmente e, finalmente, a confirmação de que a optimização tende a reduzir custos de projecto ao reduzir o diâmetro das tubagens por um lado e por outro, eliminando completamente outras, deixando assim o sistema incapaz de responder, por exemplo, a roturas nas tubagens ou a padrões de procura que excedem os valores de preconizados.

Importa salientar que todas as restrições formuladas neste trabalho são consideradas vinculativas e por isso não podem ser violadas. Ainda, outras restrições como o caudal ou velocidade da água nas tubagens e a quantidade de comutações no funcionamento das bombas, que descambam em custos de manutenção devido ao desgaste, não foram consideradas nesta Dissertação.



### 4.3 Método da Caixa Negra

A natureza da função objectivo da tipologia de problemas abordados, modelos para os quais as derivadas das funções e das suas restrições não estão disponíveis, é não descritível. Conhecem-se os dados de entradas (*inputs*) e a sua transformação, dentro de uma “caixa negra”, fornece um valor (*output*) que se deseja óptimo ou na direcção da optimalidade. Não existindo a preocupação em saber, a cada momento, o que se passa dentro do modelo, este método usa um módulo que interligará o algoritmo e a “caixa negra” representada pela aplicação EPANET. Este módulo fica encarregue de executar o algoritmo, recolher as variáveis propostas a avaliação, executar o EPANET com essas variáveis, verificar se há motivo para penalizar e agir em concordância, e registar o resultado que essas variáveis produziram. O procedimento é apresentado esquematicamente na Fig. 4.1.



**Figura 4.1: Integração dos Módulos de Optimização e Simulação - Fluxograma-resumo do método implementado**

### 4.4 Notas Finais

Este capítulo foi dedicado à apresentação do modelo matemático implementado com vista à simulação hidráulica. Iniciou-se pela explanação da função objectivo conducente à redução do custo energético de uma SAA através da alteração do sistema operacional

#### **4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO**

---

para depois abordar-se os conceitos associados ao tratamento das restrições sujeitas ao sistema. A finalizar, apresentou o fluxograma da metodologia aplicada.

## Parte III

# Validação e Discussão



# 5

## Apresentação e Interpretação dos Resultados

O esforço é saudável e indispensável, mas sem os resultados não significa nada.

---

Paulo Coelho (1947–)

### 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas

Neste trabalho propõe-se analisar quatro Sistemas de Abastecimento de Água e propor a redução dos seus custos através da reorganização do sistema operacional, procurando situar fora das horas de ponta o funcionamento das unidades de bombagem. Segura-

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

---

mente, um decréscimo mesmo que ligeiro nos custos energéticos pode traduzir-se numa elevada poupança em determinados sistemas. No entanto, é possível que alguns sistemas possam estar a funcionar optimamente e, nestes casos, um modelo de optimização continua sendo de suma importância pois pode facultar informações, por exemplo, sobre a resposta do sistema a diversos *inputs*, política tarifária ou a afectação de consumos.

Com relação às redes objecto de estudo, a primeira apresenta uma configuração simples que serve sobretudo para validar alguns conceitos básicos da simulação de sistemas hidráulicos e verificar o pressuposto que estabelece que idealmente as unidades de bombagem devem estar desligadas ou parcialmente desligadas no período cuja tarifa é maior, impondo assim o recurso à água armazenada nos reservatórios de nível variável (RNV) por forma a satisfazer os consumos. Ainda, no âmbito desse pressuposto, espera-se que o nível de água num RNV esteja no limiar máximo quando começa o período de facturação mais elevada e no limiar mínimo quando termina esse período.

As demais três redes foram baseadas em trabalhos de Walski [99] e nestas redes foram integradas três tipologias de consumo, nomeadamente doméstica, comercial e industrial. O recurso a estas tipologias procura satisfazer um dos calcanhares de Aquiles que o autor identificou [98] nalgumas abordagens de minimização de custos operacionais em redes de distribuição de água feitas no passado: a existência um único padrão de demanda da água pode levar a resultados pouco práticos ou realistas em redes de alta complexidade.

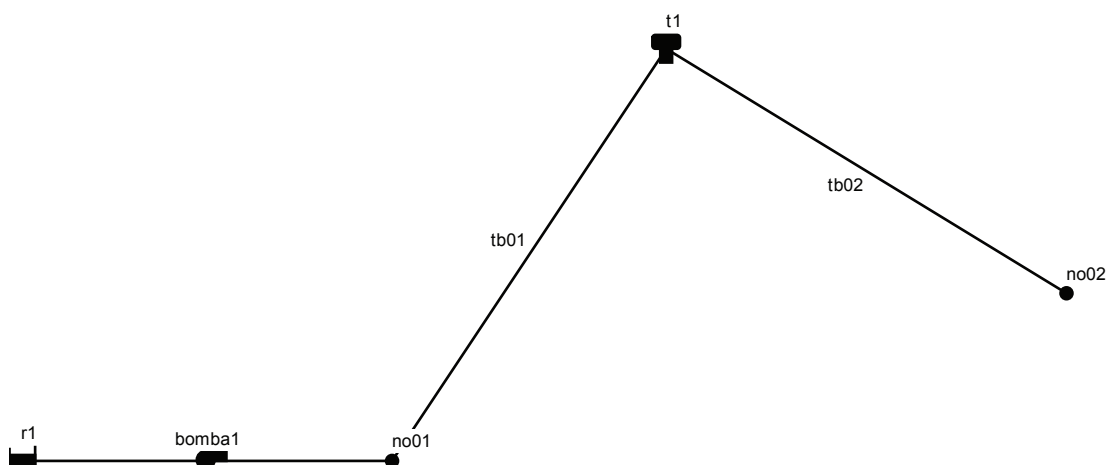
Importa salientar que outro dos pressupostos foi afixar o nível inicial dos tanques a 50% da capacidade máxima e foram definidos limiares mínimo e máximo para cada caso, situação esta que cria uma faixa de flutuação do nível de água. Estes pressupostos são traduzidos em restrições ao sistema, precavendo o transbordamento. Adicionalmente, funcionam como uma reserva de equilíbrio e de emergência, garantindo compensação nos períodos de maior consumo e segurança em eventuais situações de catástrofe. Outro pressuposto definido é de ordem prática e anula padrões de funcionamento inferiores a 30% dado que tais padrões podem induzir fenómenos de cavitação e desgaste nas bombas, aumentando assim os custos de manutenção e alteram a vida útil das mesmas.

### 5.1.1 Apresentação da Rede de Distribuição Primária

Esta rede, representativa de um sistema de dimensionamento hidráulico mais simples, possui todos os órgãos necessários e a sua simplicidade torna possível avaliar e validar os resultados obtidos ao longo deste trabalho.

## 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas

Apresentada na Fig. 5.1, possui os seguintes componentes físicos: dois nós de junções, duas condutas, um reservatório de nível fixo (RNF), um reservatório de nível variável (RNV) de montante por onde passa toda a água distribuída a jusante e uma estação de bombagem composta por uma bomba. Note-se que a unidade hidráulica de acumulação e passagem de água desta rede causa uma grande variação da pressão nas extremidades a jusante.



**Figura 5.1: Traçado da Rede de Distribuição Primária** - Apresenta duas junções (no01 e no02), um RNF (r1), um RNV (t1), duas condutas (tb01 e tb02) e uma bomba (bomba1).

As características do seu traçado da rede no que toca à construção do modelo estão resumidas na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1:** Características do Traçado da Rede Primária

Nós	Reservatórios	Tanques	Condutas	Bombas	Válvulas
2	1	1	2	1	0

Em termos de componentes físicos, a Tabela 5.2 apresenta os parâmetros dos nós de junção, nomeadamente a elevação e o consumo médio respectivos.

Em termos das solicitações do sistema (caudais e consumos), a Tabela 5.3 apresenta os factores de ponta instantâneos que afectam os caudais imputados ao nó no02, o único com afectação de consumo. Este perfil é característico de áreas residenciais e dado que

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

**Tabela 5.2:** Dados dos Nós de Junção da Rede Primária

Referência	Parâmetros		
	Elevação [m]	Consumo Médio [m <sup>3</sup> /h]	Padrão Temporal de Consumo
no01	45	0	–
no02	50	250	Residencial

o caudal médio imputado a esse nó é de 250 m<sup>3</sup>/h de água, o consumo total da rede é de 6.000 m<sup>3</sup> em cada ciclo de operação.

**Tabela 5.3:** Padrões Temporais de Consumo da Rede Primária

Período	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00
Factor de ponta	0,350	0,500	0,620	0,680	0,700	1,030	1,560	1,850
Período	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Factor de ponta	1,460	1,100	0,880	0,900	0,850	0,650	0,950	1,150
Período	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
Factor de ponta	1,480	1,720	1,560	1,100	1,050	0,850	0,670	0,340

Com relação aos demais componentes físicos, a Tabela 5.4 apresenta os dados das condutas onde inclue-se o comprimento, o diâmetro e a rugosidade respectivos. O cálculo da perda de carga faz-se utilizando a Equação 2.13 de Darcy-Weisbach.

**Tabela 5.4:** Dados das Condutas da Rede Primária

Referência	Parâmetros		
	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Rugosidade [mm]
tb01	1350	450	0,1
tb02	1800	500	0,1

O dimensionamento dos reservatórios consta da Tabela 5.5, assim como os limiares de funcionamento. Esta faixa tem 9,0 m de altura e um volume de 4.417,86 m<sup>3</sup>, o que corresponde a 60% do volume total do RNV.

Com respeito às características de desempenho operacional da bomba, as suas relações funcionais encontram-se listadas na Tabela 5.6, nomeadamente os dados expe-



## 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas

**Tabela 5.5:** Parâmetros dos Reservatórios da Rede Primária

Parâmetros	Tipologia de Reservatório	
	Nível Variável	Nível Fixo
Elevação [m]	65	45
Diâmetro [m]	25	–
Nível Mínimo [m]	0	–
Limiar Inferior [m]	3	–
Nível Inicial [m]	7,5	–
Limiar Superior [m]	12	–
Nível Máximo [m]	15	–
Volume [m <sup>3</sup> ]	7.363,11	–

rimentais da curva característica que estabelece a relação entre a altura de elevação, caudal e velocidade, e os da curva do rendimento em função do caudal bombado.

**Tabela 5.6:** Pontos da Curva Característica da Bomba da Rede Primária

Pontos de Operação	Grandezas de Funcionamento	
	Caudal, Q [m <sup>3</sup> /h]	Altura de Elevação, H [m]
<b>Curva Característica</b>		
Altura de elevação em vazio	0	60,0
Ponto de design	600	46,5
Caudal máximo	1200	6,0
	Caudal, Q [m <sup>3</sup> /h]	Rendimento, $\eta$ [%]
<b>Curva do Rendimento</b>		
Ponto 1	400	78
Ponto 2	860	80
Ponto 3	1220	68
Ponto 4	1600	60

Em termos de componentes não físicos, os padrões temporais da tarifa energética estão apresentados na Tabela 5.7. Esta estrutura tarifária possui três níveis de preços. O mais baixo começa às 00:00 horas e termina às 07:00, exclusive. O nível mais elevado

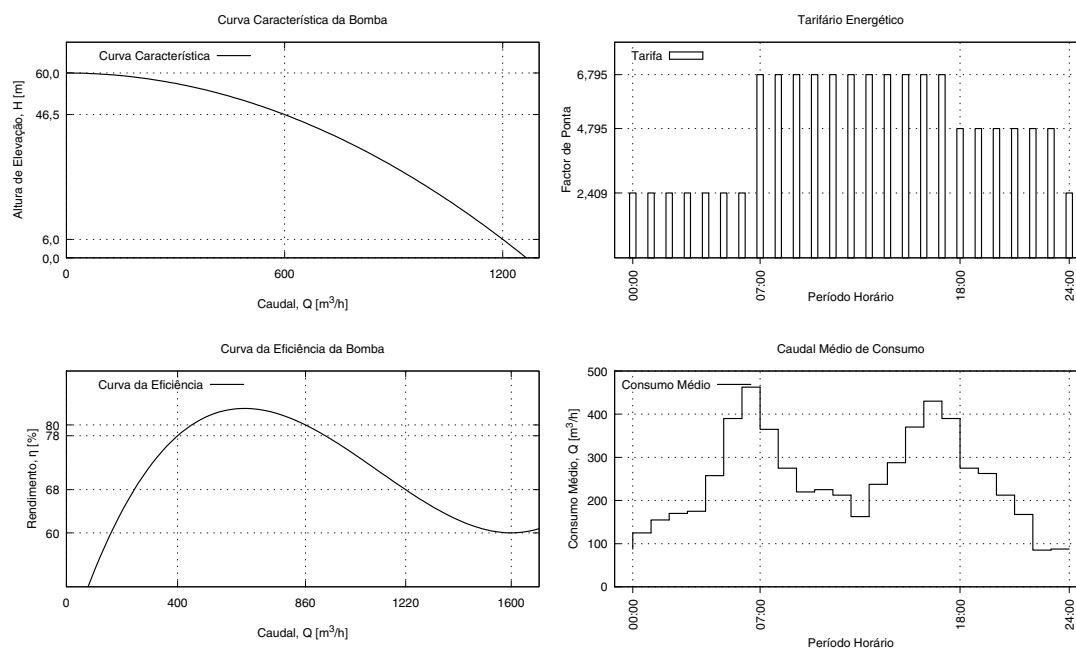
## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

começa às 07:00 e termina às 18:00, exclusive, enquanto o intermédio começa às 18:00 e termina às 24:00, exclusive.

**Tabela 5.7:** Padrões Temporais da Tarifa Energética da Rede Primária

	Intervalo Horário		
	[00:00–07:00[	[07:00–18:00[	[18:00–24:00[
Factor de ponta	2,409	6,795	4,795

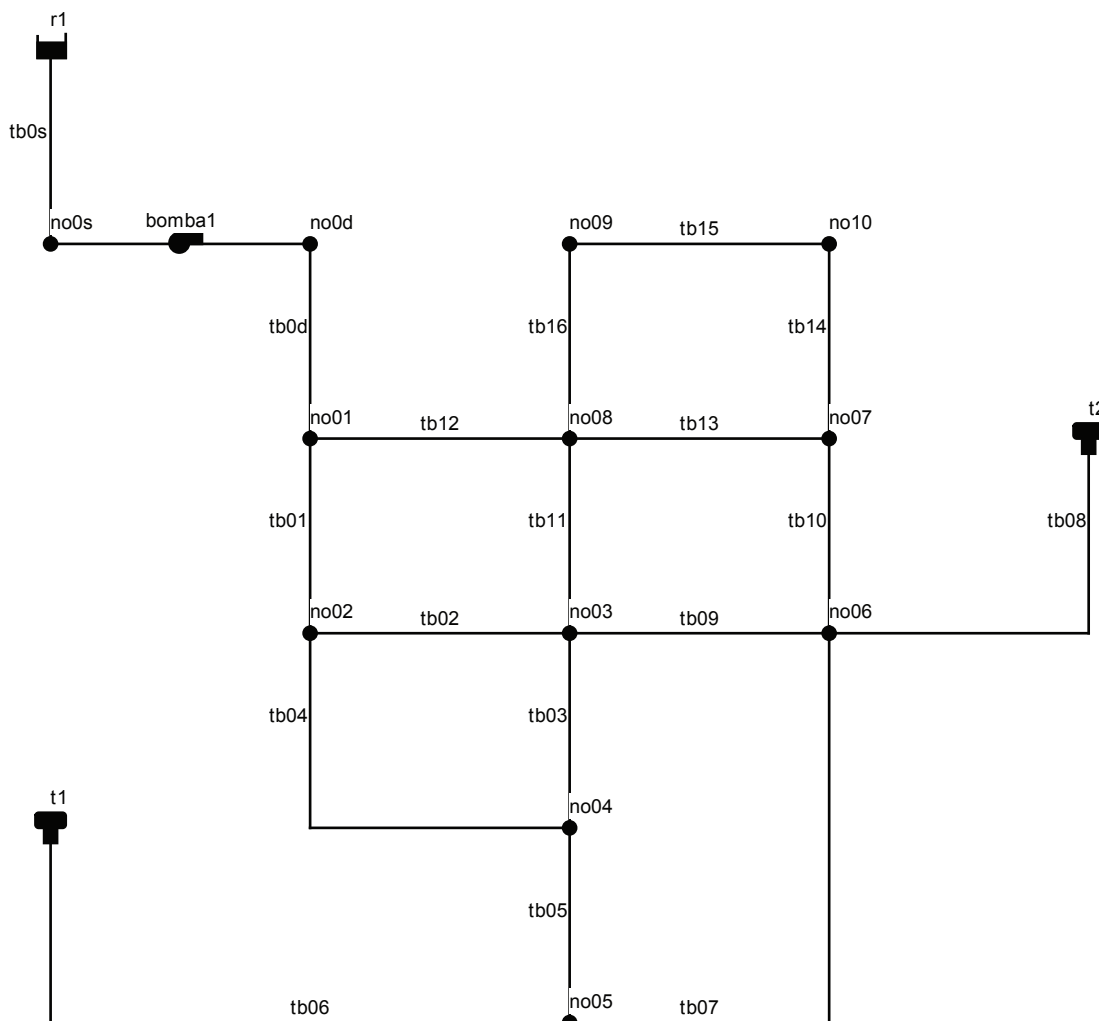
As curvas operacionais da bomba, a tarifa horária e os caudais máximos (ou de ponta) estão apresentados graficamente na Fig. 5.2. O valor do rendimento global do sistema foi definido em 85% enquanto o custo energético médio foi definido a 1 €/kWh, assim como a tarifa de consumo máximo.



**Figura 5.2:** Dados Operacionais da Rede de Distribuição Primária - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: curva característica da bomba, padrões temporais da tarifa, caudal médio de consumo e curva da eficiência da bomba

## 5.1.2 Apresentação da Rede de Distribuição Walski 173

A rede emalhada apresentada na Fig. 5.3 é de cálculo hidráulico mais complexo que a anterior, possui cinco malhas e os seguintes componentes físicos: doze nós de junção, um reservatório de nível fixo (RNF), dois reservatórios de nível variável (RNV) de jusante ou de sobras, dezoito condutas e uma bomba.



**Figura 5.3:** Traçado da Rede de Distribuição Walski 173 - Apresenta dezoito junções, um RNF (r1), dois RNV (t1 e t2), doze condutas e uma bomba (bomba1).

Os reservatórios de sobras desta rede são abastecidos pelas sobras que advêm das horas de menor consumo, abastecendo a rede nas horas de maior consumo. Ainda, servem para controlar pressões nas zonas a jusante da rede pois provocam uma menor oscilação

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

dessas pressões. As características do traçado desta rede no que toca à construção do modelo estão resumidas na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8:** Características do Traçado da Rede Walski 173

Nós	Reservatórios	Tanques	Conduitas	Bombas	Válvulas
12	1	2	18	1	0

Em termos das solicitações do sistema (consumos e caudais), a Tabela 5.9 apresenta os nós de junção e os seus parâmetros, nomeadamente a elevação, o consumo médio e o padrão que contém os factores de ponta instantâneos que afectam os caudais imputados.

**Tabela 5.9:** Dados dos Nós de Junção da Rede Walski 173

Referência	Dados		
	Elevação [m]	Consumo Médio [m <sup>3</sup> /h]	Padrão Temporal de Consumo
no0s	97,5	–	–
no0d	97,5	–	–
no01	118,9	27,4	Residencial
no02	128,0	16,9	Industrial
no03	129,5	7,92	Comercial
no04	131,1	11,5	Industrial
no05	137,2	0	–
no06	135,6	35,3	Industrial
no07	128,0	14,8	Comercial
no08	126,5	0	–
no09	128,0	12,6	Residencial
no10	128,0	4,68	Residencial

O padrão de consumo residencial está imputado aos nós no01 (27,4 m<sup>3</sup>/h), no09 (12,6 m<sup>3</sup>/h) e no10 (4,68 m<sup>3</sup>/h). O padrão de consumo comercial está imputado aos nós no03 e no07 que requerem 7,92 e 14,8 m<sup>3</sup>/h de água. O padrão industrial está imputado aos nós no02 (16,9 m<sup>3</sup>/h), no04 (11,5 m<sup>3</sup>/h) e no06 (35,3 m<sup>3</sup>/h). Tais afecções resultam num consumo total de 3.146,4 m<sup>3</sup> de água em cada ciclo de operação. As citadas estruturas de consumo estão apresentadas na Tabela 5.10.

## 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas

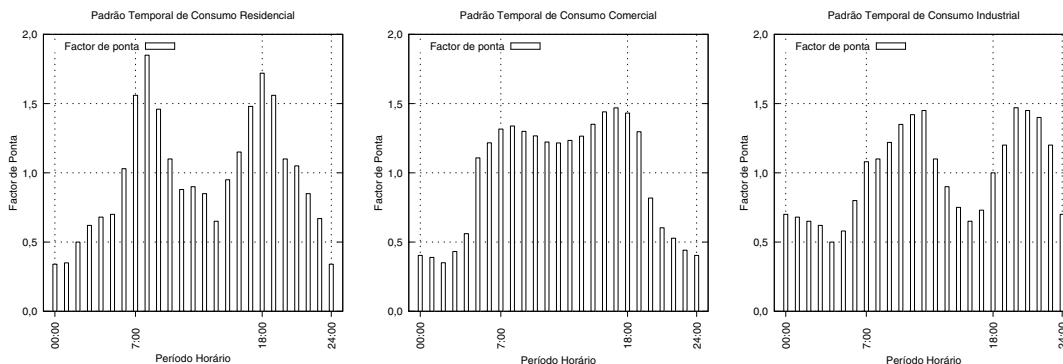
---

**Tabela 5.10:** Padrões Temporais de Consumo da Rede Walski 173

<b>Consumo Residencial</b>							
Período	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	
Factor de ponta	0,350	0,500	0,620	0,680	0,700	1,030	
Período	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	
Factor de ponta	1,560	1,850	1,460	1,100	0,880	0,900	
Período	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
Factor de ponta	0,850	0,650	0,950	1,150	1,480	1,720	
Período	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	
Factor de ponta	1,560	1,100	1,050	0,850	0,670	0,340	
<b>Consumo Comercial</b>							
Período	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	
Factor de ponta	0,389	0,351	0,432	0,561	1,108	1,217	
Período	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	
Factor de ponta	1,316	1,338	1,300	1,267	1,223	1,216	
Período	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
Factor de ponta	1,234	1,265	1,351	1,440	1,469	1,432	
Período	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	
Factor de ponta	1,297	0,818	0,603	0,528	0,441	0,404	
<b>Consumo Industrial</b>							
Período	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	
Factor de ponta	0,680	0,650	0,620	0,500	0,580	0,800	
Período	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	
Factor de ponta	1,080	1,100	1,220	1,350	1,420	1,450	
Período	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
Factor de ponta	1,100	0,900	0,750	0,650	0,730	1,000	
Período	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	
Factor de ponta	1,200	1,470	1,450	1,400	1,200	0,700	

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os consumos médios das áreas específicas tipificadas na Tabela 5.10 e aplicados a determinados nós de junção estão representados graficamente na Fig. 5.4.



**Figura 5.4: Padrões Temporais de Consumos da Rede de Distribuição Walski 173** - Da esquerda para a direita: tipologias para áreas específicas residenciais, comerciais e industriais.

Com respeito aos componentes físicos, os parâmetros das condutas estão apresentados na Tabela 5.11, onde incluem-se parâmetros como o comprimento, o diâmetro e a rugosidade. O cálculo da perda de carga faz-se utilizando a Equação 2.17 de Hazen-Williams.

Com relação às unidades de armazenamento, a Tabela 5.12 apresenta os dados dos reservatório de nível fixo (RNF) e nível variável (RNV) que comporta a rede. Apresenta-se também nesta tabela os limiares inferior e superior que delimitam as faixas de trabalho dos reservatórios de nível variável. Estas faixas representam 60% do volume total de cada um dos RNV. Assim, a faixa de t1 tem 6,36 m de altura e um volume de 1.123,9 m<sup>3</sup> enquanto a do RNV t2 tem 7,32 m de altura e um volume de 683,05 m<sup>3</sup>.

Em termos de componentes não físicos, os padrões temporais da tarifa energética foram previamente apresentados na Tabela 5.7. O custo energético médio foi definido a 0,0931 €/kWh enquanto a tarifa de consumo máximo foi de 0,1064 €/kWh. Os dados da curva característica da bomba encontram-se na Tabela 5.13. O valor global para o rendimento do sistema foi definido em 75%.

A finalizar, as curvas operacionais, nomeadamente a curva característica da bomba, tarifas horárias de consumo e caudais máximos (ou de ponta) estão apresentadas na Fig. 5.5.

## 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas

**Tabela 5.11:** Dados das Conduitas da Rede Walski 173

Referência	Parâmetros		
	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Rugosidade
tb0s	7,6	610	120
tb0d	67,1	533	120
tb01	381,0	152	110
tb02	254,5	152	110
tb03	167,6	203	130
tb04	307,8	152	110
tb05	129,5	203	130
tb06	301,8	203	125
tb07	640,1	203	105
tb08	170,7	152	110
tb09	227,1	203	100
tb10	335,3	254	115
tb11	405,4	203	110
tb12	271,3	254	115
tb13	251,5	254	115
tb14	137,2	152	120
tb15	210,3	152	120
tb16	152,4	152	120

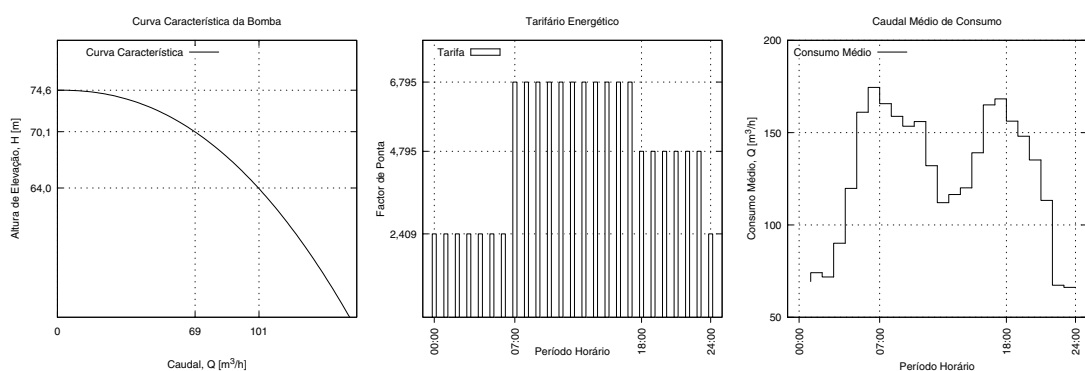
**Tabela 5.12:** Parâmetros dos Reservatórios da Rede Walski 173

Parâmetros	Tipologia de Reservatório		
	Nível Variável, t1	Nível Variável, t2	Nível Fixo
Elevação [m]	163,1	160	97,5
Diâmetro [m]	15	10,9	–
Nível Mínimo [m]	0	0	–
Limiar Inferior [m]	2,12	2,44	–
Nível Inicial [m]	5,3	6,1	–
Limiar Superior [m]	8,48	9,76	–
Nível Máximo [m]	10,6	12,2	–
Volume [m <sup>3</sup> ]	1873,17	1138,42	–

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

**Tabela 5.13:** Pontos da Curva Característica da Bomba da Rede Walski 173

Pontos de Operação	Grandezas de Funcionamento	
	Caudal, Q [m <sup>3</sup> /h]	Altura de Elevação, H [m]
<b>Curva Característica</b>		
Altura de elevação em vazio	0	74,6
Ponto de design	248	70,1
Caudal máximo	364	64,0



**Figura 5.5:** Dados Operacionais da Rede de Distribuição Walski 173 - Da esquerda para a direita: curva característica da bomba, padrões temporais da tarifa e caudal médio de consumo.

### 5.1.3 Apresentação da Rede de Distribuição Walski 489

A rede emalhada apresentada na Fig. 5.6 possui seis malhas e os seguintes componentes físicos: catorze junções, um reservatório de nível fixo (RNF), um reservatório de nível variável (RNV) de jusante ou de sobras, dezanove condutas e uma estação de bombagem composta por duas bombas.

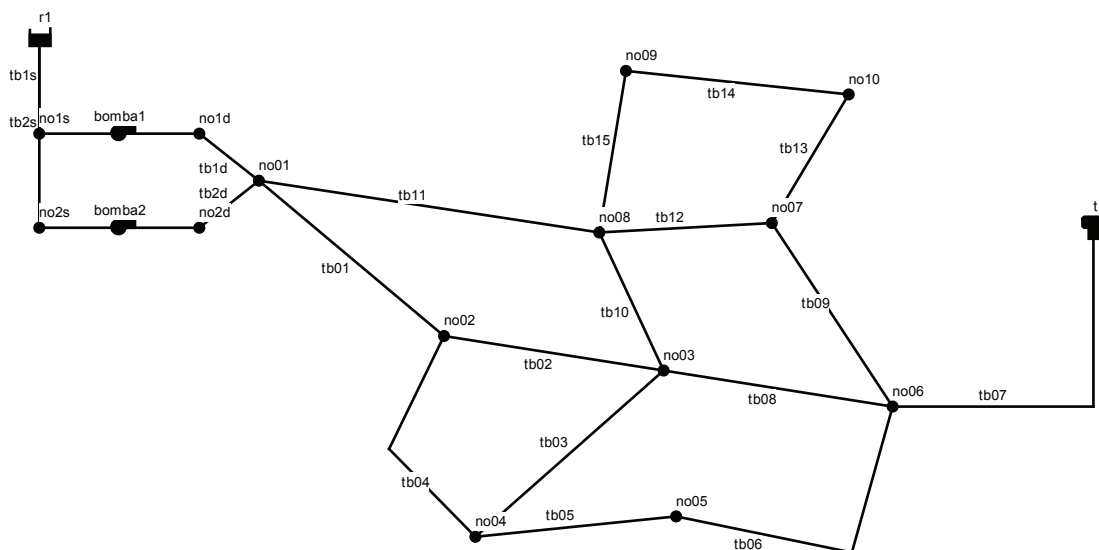
Os elementos funcionais que compõem esta rede, nomeadamente o armazenamento, o transporte ou adução, a elevação e acessórios estão apresentados na Tabela 5.14.

**Tabela 5.14:** Características do Traçado da Rede Walski 489

Nós	Reservatórios	Tanques	Condutas	Bombas	Válvulas
14	1	1	19	2	0



## 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas



**Figura 5.6: Traçado da Rede de Distribuição Walski 489** - Apresenta catorze junções, um RNF (r1), um RNV (t1), dezanove condutas e uma estação de bombagem composta por duas bombas (bomba1 e bomba2).

Em termos das solicitações do sistema (caudais e consumos), a Tabela 5.15 apresenta os dados dos nós de junção, nomeadamente a elevação, o consumo médio e o padrão que contém os factores de ponta instantâneos que afectam os caudais imputados.

As tipologias de consumo previamente apresentadas na Tabela 5.10 e na Fig. 5.4 foram também aplicadas a esta rede. Assim, o perfil residencial está imputado a três nós: o nó no03 que requer  $7,95 \text{ m}^3/\text{h}$  de água, o nó no05 que tem um consumo de  $4,54 \text{ m}^3/\text{h}$  e o nó no10 que exige um caudal médio de  $4,54 \text{ m}^3/\text{h}$ . O perfil comercial está imputado a quatro nós: o nó no02 que requer  $17,0 \text{ m}^3/\text{h}$  de água, o nó no04 que tem um consumo de  $11,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , o nó no07 que exige um caudal médio de  $14,8 \text{ m}^3/\text{h}$  e o nó no09 que exige um caudal médio de  $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Por fim, o perfil industrial está imputado ao nó no01 que tem uma procura média de  $27,3 \text{ m}^3/\text{h}$  e ao nó no06 que tem um consumo médio de  $35,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . O consumo total desta rede é de  $39.871 \text{ m}^3$  de água em cada ciclo de operação.

Os dados das condutas que permitem a água alcançar toda a rede de distribuição estão apresentados na Tabela 5.16 onde incluem-se parâmetros como o comprimento, o diâmetro e a rugosidade. O cálculo da perda de carga faz-se utilizando a Equação 2.17 de Hazen-Williams.

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

**Tabela 5.15:** Dados dos Nós de Junção da Rede Walski 489

Referência	Dados		
	Elevação [m]	Consumo Médio [m <sup>3</sup> /h]	Padrão Temporal de Consumo
no1s	97,5	0	–
no1d	97,5	0	–
no2s	97,5	0	–
no2d	97,5	0	–
no01	119	27,3	Industrial
no02	128	17	Comercial
no03	130	7,95	Residencial
no04	131	11,4	Comercial
no05	140	4,54	Residencial
no06	136	35,2	Industrial
no07	128	14,8	Comercial
no08	126	0	–
no09	128	12,5	Comercial
no10	128	4,54	Residencial

Do mesmo modo, a Tabela 5.17 apresenta os dados dos reservatórios que comporta a rede, indicando os limiares inferior e superior que delimitam a faixa de trabalho do RNV, restrições usadas no modelo de otimização. Esta faixa tem 7,2 m de altura e um volume de 1.539,54 m<sup>3</sup>, o que corresponde a 60% do volume total do RNV.

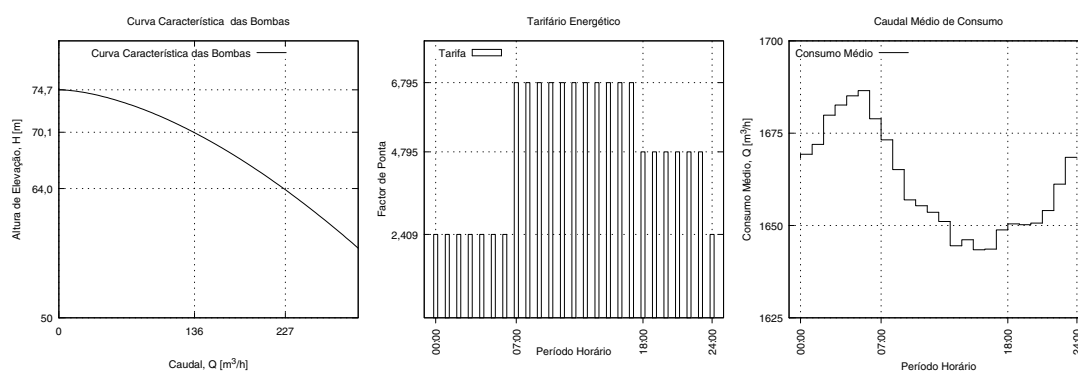
Do ponto de vista operacional, os dados das curvas características das bombas encontram-se na Tabela 5.18. Note-se que as bombas são idênticas e associadas em paralelo por forma a lidar com caudais elevados e permitir a flexibilização operacional do sistema. O valor global para o rendimento do sistema foi definido em 75%.

Em termos de componentes não físicos, os padrões temporais da tarifa energética foram apresentados previamente na Tabela 5.7. O custo energético médio foi definido a 0,0931 €/kWh enquanto a tarifa de consumo máximo foi de 0,1064 €/kWh. As curvas operacionais, nomeadamente a curva característica das bombas, tarifas horárias de consumo e caudais máximos (ou de ponta) estão apresentadas na Fig. 5.7.

## 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas

**Tabela 5.16:** Dados das Conduitas da Rede Walski 489

Referência	Parâmetros		
	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Rugosidade
tb1s	7,62	609,6	100
tb1d	67,1	533,4	100
tb2s	7,62	609,6	100
tb2d	67,1	533,4	100
tb01	381	152,4	110
tb02	254,5	152,4	110
tb03	167,64	203,2	130
tb04	307,85	152,4	110
tb05	129,54	203,2	130
tb06	640,1	203,2	105
tb07	170,7	304,8	110
tb08	227,1	203,2	100
tb09	335,28	254	115
tb10	405,4	203,2	110
tb11	271,3	254	115
tb12	251,46	254	115
tb13	137,16	152,4	120
tb14	210,3	152,4	120
tb15	152,4	152,4	120



**Figura 5.7:** Dados Operacionais da Rede de Distribuição Walski 489 - Da esquerda para a direita: curva característica das duas bombas, padrões temporais da tarifa e caudal médio de consumo.

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

**Tabela 5.17:** Parâmetros dos Reservatórios da Rede Walski 489

Parâmetros	Tipologia de Reservatório	
	Nível Variável	Nível Fixo
Elevação [m]	160	97,5
Diâmetro [m]	16,5	–
Nível Mínimo [m]	0	–
Limiar Inferior [m]	2,4	–
Nível Inicial [m]	6,0	–
Limiar Superior [m]	9,6	–
Nível Máximo [m]	12	–
Volume [m <sup>3</sup> ]	2.566,93	–

**Tabela 5.18:** Pontos da Curvas Características das Bombas da Rede Walski 489

Pontos de Operação	Grandezas de Funcionamento	
	Caudal, Q [m <sup>3</sup> /h]	Altura de Elevação, H [m]
Altura de elevação em vazio	0	74,7
Ponto de design	136	70,1
Caudal máximo	227	64,0

### 5.1.4 Apresentação da Rede de Distribuição Walski 492

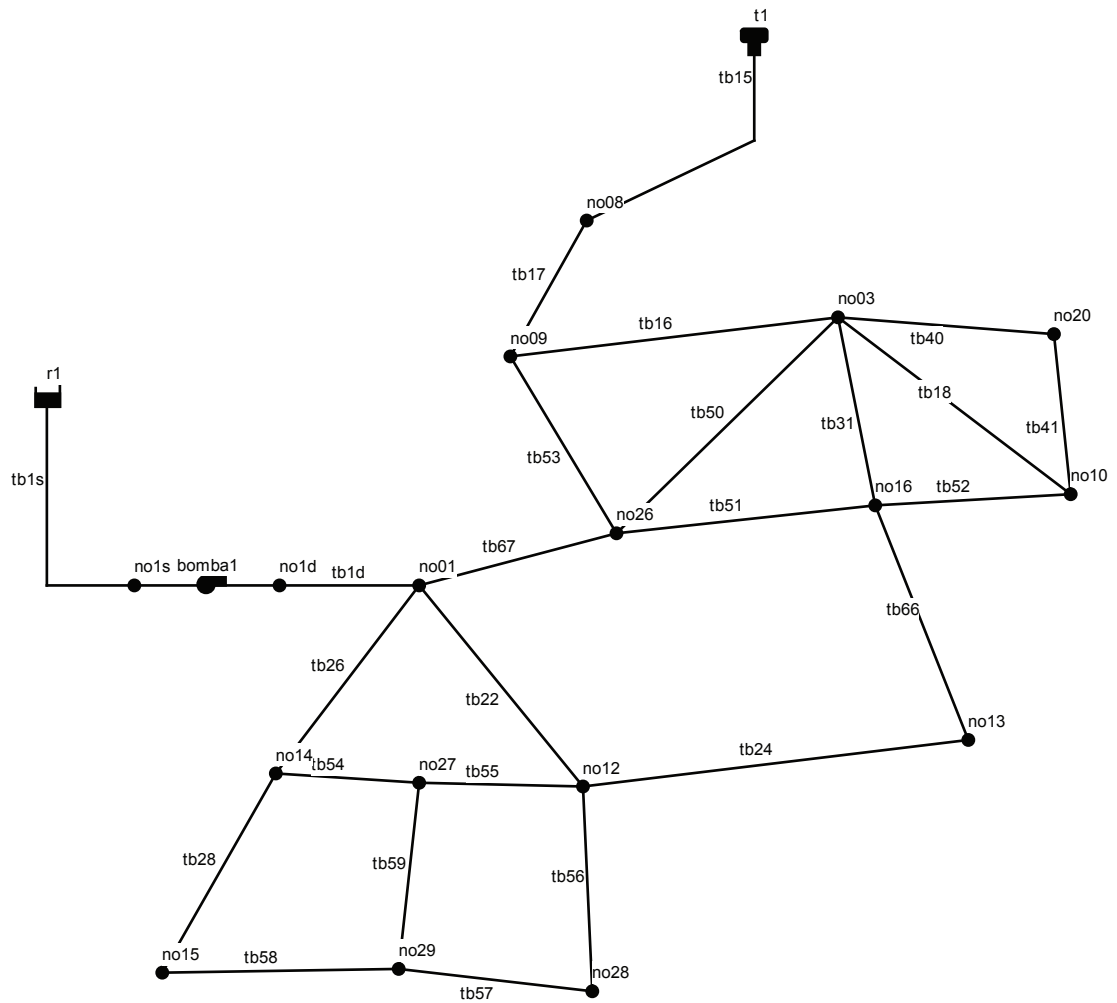
A rede emalhada apresentada na Fig. 5.8 possui oito malhas e os seguintes componentes físicos: dezassete nós de junção, um reservatório de nível fixo (RNF), um reservatório de nível variável (RNV) de jusante ou de sobras, vinte e cinco condutas e uma estação de bombagem composta por uma bomba.

Os elementos funcionais que compõem esta rede, nomeadamente o armazenamento, o transporte ou adução, a elevação e acessórios estão apresentados na Tabela 5.19.

**Tabela 5.19:** Características do Traçado da Rede Walski 492

Nós	Reservatórios	Tanques	Condutas	Bombas	Válvulas
17	1	1	25	1	0

## 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas



**Figura 5.8: Traçado da Rede de Distribuição Walski 492** - Apresenta dezassete nós junção, um RNF (r1), um RNV (t1), vinte e cinco condutas e uma estação de bombagem composta por uma bomba (bomba1).

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Em termos das solicitações do sistema (caudais e consumos), a Tabela 5.20 apresenta os dados dos nós de junção, nomeadamente a elevação, o consumo médio e o padrão que contém os factores de ponta instantâneos que afectam os caudais imputados.

**Tabela 5.20:** Dados dos Nós de Junção da Rede Walski 492

Referência	Dados		
	Elevação [m]	Consumo Médio [l/s]	Padrão Temporal de Consumo
no1s	0	0	–
no1d	0	0	–
no01	7,62	6,31	–
no03	22,86	3,47	–
no08	27,43	5,05	–
no09	24,38	0,95	–
no10	19,81	1,14	Industrial
no12	10,67	1,14	–
no13	12,19	0,95	Comercial
no14	6,10	1,26	–
no15	3,05	1,26	Residencial
no16	16,76	0,63	Comercial
no20	16,15	1,58	Industrial
no26	18,29	1,58	–
no27	9,14	1,26	–
no28	6,10	0,95	Residencial
no29	6,10	0,95	Residencial

As tipologias de consumo apresentadas na Tabela 5.10 foram também aplicadas a esta rede. Assim, o perfil residencial está imputado a três nós: o nó no15 que requer 1,26 l/s de água e os nós no28 e no29 que têm um consumo de 0,95 l/s. O perfil comercial está imputado a dois nós: o nó no13 que requer 0,95 l/s de água e o nó no16 que tem um consumo de 0,63 l/s. Por fim, o perfil industrial está imputado ao nó no10 que tem uma procura média de 1,14 l/s e ao nó no20 que tem um consumo médio de 1,58 l/s. O consumo total desta rede é de 707,72 l/s de água em cada ciclo de operação.

Os dados das condutas que permitem a água alcançar toda a rede de distribuição estão apresentados na Tabela 5.21 onde incluem-se parâmetros como o comprimento, o

## 5.1 Modelação das Redes Hidráulicas Propostas

diâmetro e a rugosidade. O cálculo da perda de carga faz-se utilizando a Equação 2.17 de Hazen-Williams.

**Tabela 5.21:** Dados das Conduitas da Rede Walski 492

Referência	Parâmetros		
	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Rugosidade
tb1s	9,8	305	100
tb1d	11,9	305	100
tb15	295,7	305	100
tb16	259,1	305	100
tb17	291,1	305	100
tb18	275,8	152	100
tb22	349,0	305	100
tb24	364,2	305	100
tb26	361,2	102	100
tb28	370,3	102	100
tb31	311,8	203	100
tb40	173,7	152	100
tb41	196,6	152	100
tb50	329,2	152	100
tb51	265,2	152	100
tb52	192,0	152	100
tb53	178,3	152	100
tb54	109,7	152	100
tb55	112,8	152	100
tb56	164,6	152	100
tb57	121,9	152	100
tb58	97,5	152	100
tb59	170,7	152	100
tb66	291,4	305	100
tb67	173,7	152	100

Do mesmo modo, a Tabela 5.22 apresenta os dados dos reservatórios que comporta a rede, indicando os limiares inferior e superior que delimitam a faixa de trabalho do RNV, restrições usadas no modelo de optimização. Esta faixa tem 5,48 m de altura e

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

um volume de 640,61 m<sup>3</sup>, o que corresponde a 60% do volume total do RNV.

**Tabela 5.22:** Parâmetros dos Reservatórios da Rede Walski 492

Parâmetros	Tipologia de Reservatório	
	Nível Variável	Nível Fixo
Elevação [m]	45,72	6,10
Diâmetro [m]	12,2	–
Nível Mínimo [m]	0	–
Limiar Inferior [m]	1,83	–
Nível Inicial [m]	4,57	–
Limiar Superior [m]	7,31	–
Nível Máximo [m]	9,14	–
Volume [m <sup>3</sup> ]	1.068,45	–

Em termos de componentes não físicos, os padrões temporais da tarifa energética foram apresentados previamente na Tabela 5.7. O custo energético médio foi definido a 1 €/kWh, assim como a tarifa de consumo máximo.

Do ponto de vista operacional, os dados da curva característica da bomba encontram-se na Tabela 5.23. O valor global para o rendimento do sistema foi definido em 75%.

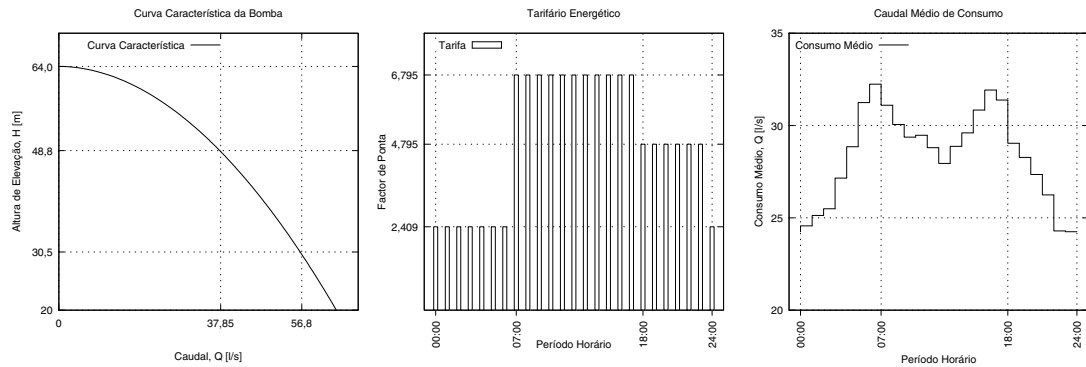
**Tabela 5.23:** Pontos da Curva Característica da Bomba da Rede Walski 492

Pontos de Operação	Grandezas de Funcionamento	
	Caudal, Q [l/s]	Altura de Elevação, H [m]
<b>Bomba 1</b>		
Altura de elevação em vazio	0,0	64,0
Ponto de design	37,85	48,8
Caudal máximo	56,8	30,5

A finalizar, as curvas operacionais, nomeadamente a curva característica das bombas, tarifas horárias de consumo e caudais máximos (ou de ponta) estão apresentadas na Fig. 5.9.



## 5.2 Resultados Analíticos da Rede Primária



**Figura 5.9: Dados Operacionais da Rede de Distribuição Walski 492** - Da esquerda para a direita: curva característica das bombas, padrões temporais da tarifa e caudal médio de consumo.

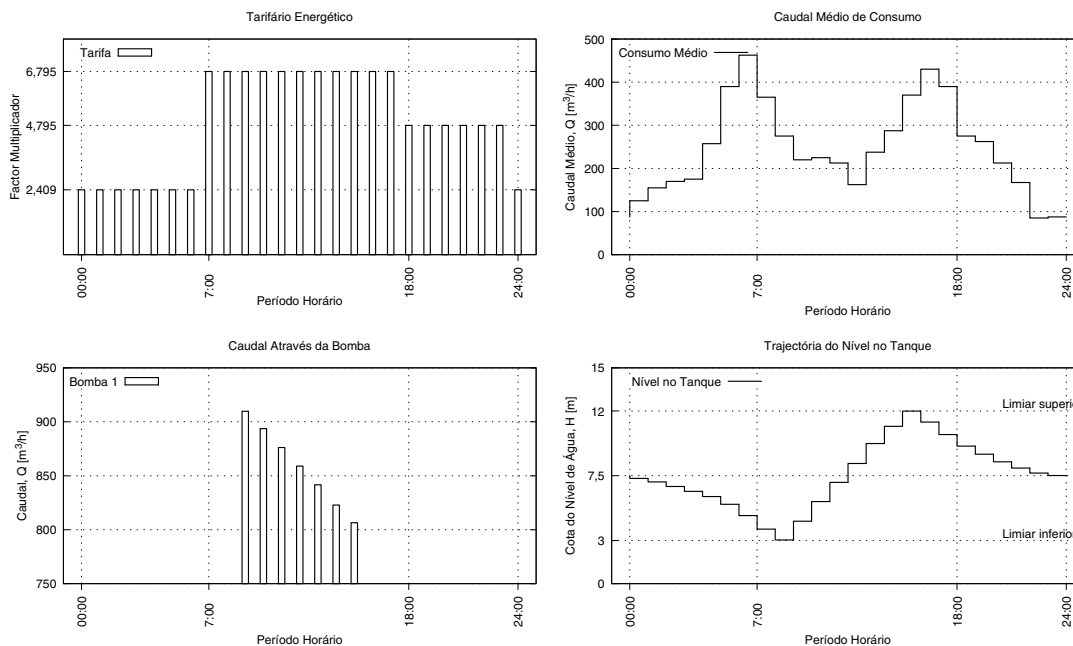
## 5.2 Resultados Analíticos da Rede Primária

A heurística tradicional de Tentativa e Erro foi levada a cabo na Rede Primária por forma a criar dois cenários para avaliação comparativa. Partindo de um cenário onde a bomba está a funcionar durante todo o ciclo, foi-se ajustando a fracção de tempo em que a bomba está em funcionamento durante um determinado intervalo.

Estando o nível de água no reservatório a metade da sua capacidade máxima, procurou-se no primeiro cenário esvaziar o reservatório até ao limiar inferior para depois ligar o motor até o limiar superior do reservatório ser atingido para depois esvaziar o reservatório até atingir o nível que tinha no início do ciclo. Constatou-se neste cenário operacional que o RNV é operado entre os níveis 3,04 m e 11,99 m, portanto dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo indicados na Tabela 5.5. No entanto, verifica-se um excedente de  $9,82 \text{ m}^3$  de água no reservatório no final do ciclo operativo. Os resultados do cenário 1 estão apresentados na Fig. 5.10.

No segundo cenário, procurou-se ter o reservatório no seu limiar superior quando começa o período de facturação mais elevado e deixar o sistema abastecer-se da água do reservatório durante esse período e terminar o ciclo operativo com o reservatório a atingir o nível que tinha no início. Verificou-se neste cenário operacional que o RNV é operado entre os níveis 3,81 m e 12 m, portanto dentro da faixa de operação definida na Tabela 5.5. Porém, verifica-se um excedente de  $373,21 \text{ m}^3$  de água no reservatório no final do ciclo operativo. Os resultados do cenário 2 estão patentes na Fig. 5.11.

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS



**Figura 5.10: Cenário 1 de Optimização da Rede Primária por Tentativa e Erro.**

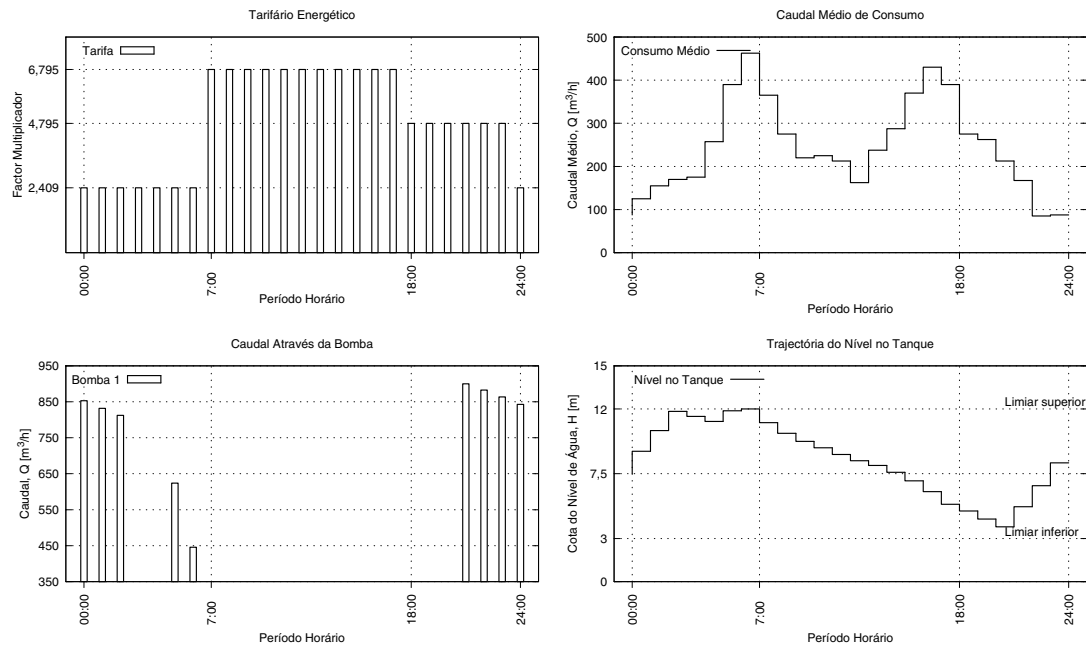
- No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, padrão de consumo, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado.

Os resultados da redução da taxa de utilização da bomba nos dois cenários estão sumarizados na Tabela. 5.24, comparando os valores obtidos para diversos parâmetros, nomeadamente taxa de utilização da bomba, caudal bombado, intensidade energética e custo energético.

**Tabela 5.24:** Resultados da Avaliação Comparativa na Rede Primária

Parâmetros	Cenários de Análise Comparativa		
	Cenário Inicial	Cenário 1	Cenário 2
Utilização da Bomba [%]	100	29,17	37,50
Caudal Bombado [m <sup>3</sup> /h]	18.370,44	6.009,47	6.361,58
Redução de Caudal Bombado [%]	–	67,29	65,37
Intensidade Energética [kWh/m <sup>3</sup> ]	0,15	0,11	0,11
Redução da Intensidade Energética [%]	–	26,67	26,67
Factura Energética [€/dia]	5.473,94	4.606,99	2.505,68
Redução de Custo [%]	–	15,84	54,23

## 5.3 Resultados do Algoritmo HDEPSO



**Figura 5.11: Cenário 2 de Otimização da Rede Primária por Tentativa e Erro.**  
- No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, padrão de consumo, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado.

Conclui-se que a aplicação do primeiro cenário resultou numa redução de custos diários em 15,84% enquanto o segundo cenário reduziu esses custos em 54,23%. Adicionalmente, a redução do caudal bombado verificada foi de 67,29% no primeiro cenário e 65,37% no segundo. Por conseguinte, ocorreu uma redução da intensidade energética de 26,67%, portanto de 0,15 para 0,11 nos dois casos.

Considerando o acima exposto, o tipo de reorganização do sistema operacional representado pelo segundo cenário é aquele que efectivamente espera-se encontrar após a aplicação dos modelos de optimização e, além disso, espera-se satisfazer a periodicidade operacional.

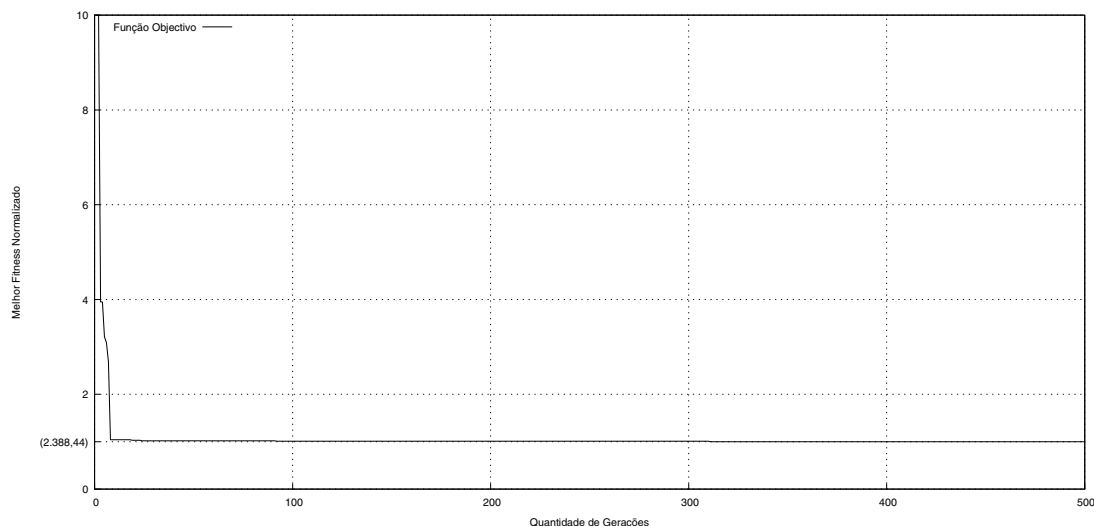
## 5.3 Resultados do Algoritmo HDEPSO

Foram levadas a cabo simulações com o algoritmo HDEPSO às quatro redes preconizadas cujos resultados da sua performance são apresentados graficamente e discutidos de seguida.

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### 5.3.1 Performance Perante a Rede Primária

Do ponto de vista da evolução da performance deste algoritmo perante a Rede Primária, este indicador está representado graficamente na Fig.5.12, confrontando a quantidade de gerações com os valores de “fitness” normalizados entre 1 e 10.



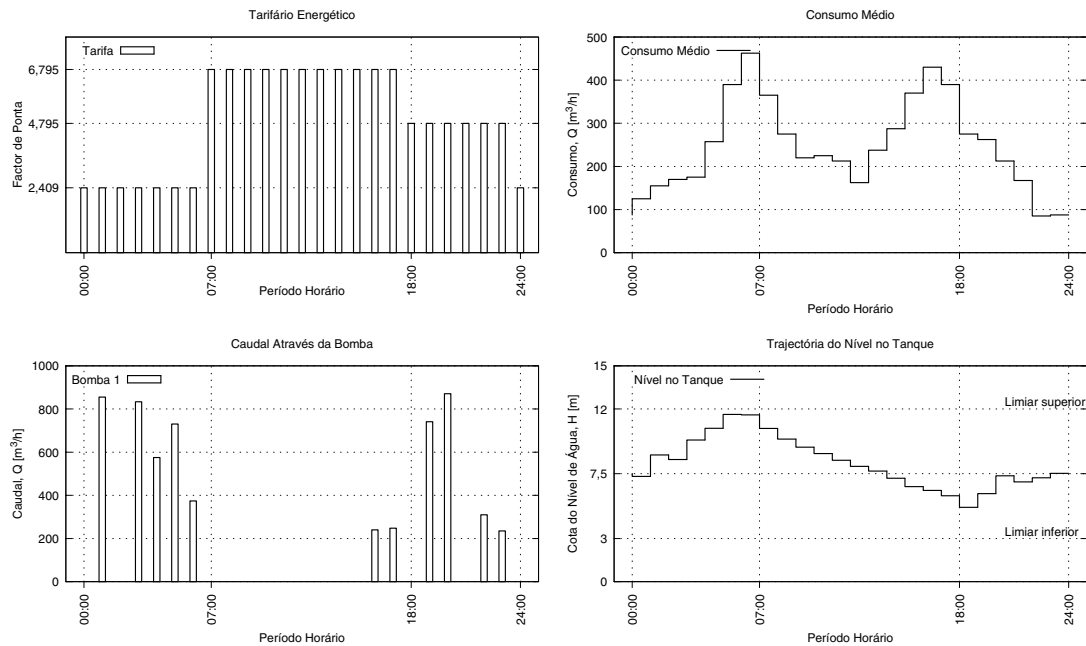
**Figura 5.12: Velocidade de Convergência do HDEPSO na Rede Primária.** - Quantidade de Gerações versus “Fitness” normalizado.

Analisando a figura, conclui-se que o algoritmo HDEPSO apresentou boa velocidade de convergência nesta rede, realizando um número reduzido de iterações até chegar a uma solução óptima, num problema com 24 variáveis de otimização correspondente a cada hora de eventual funcionamento, uma população de 24 indivíduos e onde foram afixadas 500 execuções do algoritmo.

Com respeito aos resultados operacionais, o regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado estão sumarizados nos gráficos da Figura 5.13.

Com base nos dados recolhidos é possível concluir que o algoritmo conseguiu apresentar um cenário operacional cujos resultados são globalmente compatíveis com as conjecturas iniciais. Primeiro, conseguiu situar fora das horas de ponta a maioria do funcionamento da unidade de bombagem, fornecendo caudal parcialmente durante os períodos horários 16 e 17. Segundo, ao impôr o recurso à água armazenada no reservatório de nível variável (RNV) nas horas de pico por forma a satisfazer os consumos, o

## 5.3 Resultados do Algoritmo HDEPSO



**Figura 5.13: Resultado da Aplicação do HDEPSO na Rede Primária.** - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado.

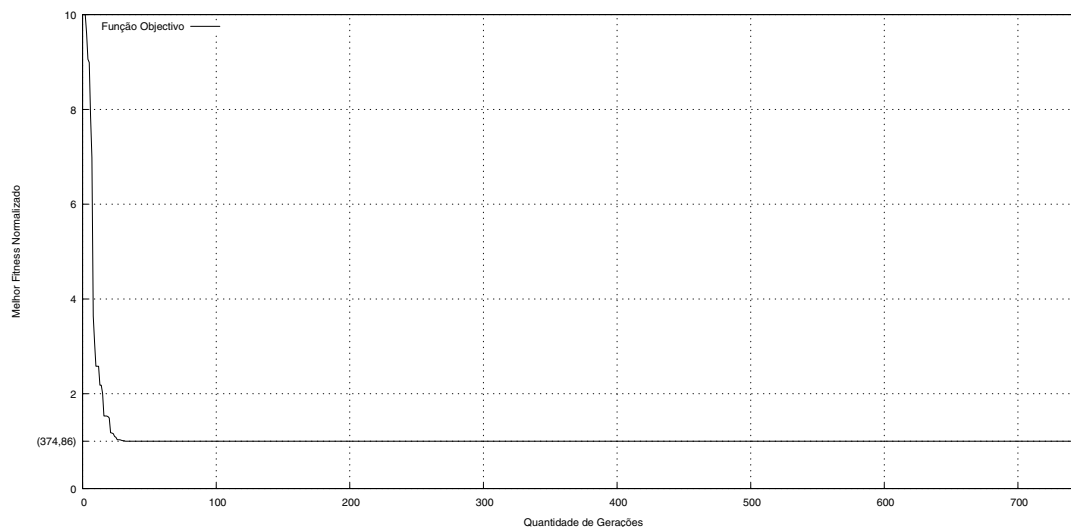
RNV é operado entre os níveis 5, 17 m, ocorrido às 19:00, e 11, 62 m, ocorrido às 6:00. Por fim, o RNV trabalha portanto dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 3 m e 12 m e restaura o nível inicial às 24:00.

Por conseguinte, a reorganização do sistema operacional proposta reduz os custos energéticos diários associados de 5.473,94 para 2.388,44 €, implicando a redução de 56,37% enquanto a intensidade energética foi atenuada de 0,15 para 0,11 kWh/m<sup>3</sup>, traduzindo-se numa diminuição de 26,67%. A taxa de utilização da bomba decaiu dos 100% para os 45,83%. O tempo computacional registado foi de 1.845 s.

### 5.3.2 Performance Perante a Rede Walski 173

Do ponto de vista da evolução da performance deste algoritmo perante a Rede Walski 173, este indicador está representado graficamente na Fig. 5.14, confrontando a quantidade de gerações com os valores de “fitness” normalizados entre 1 e 10.

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS



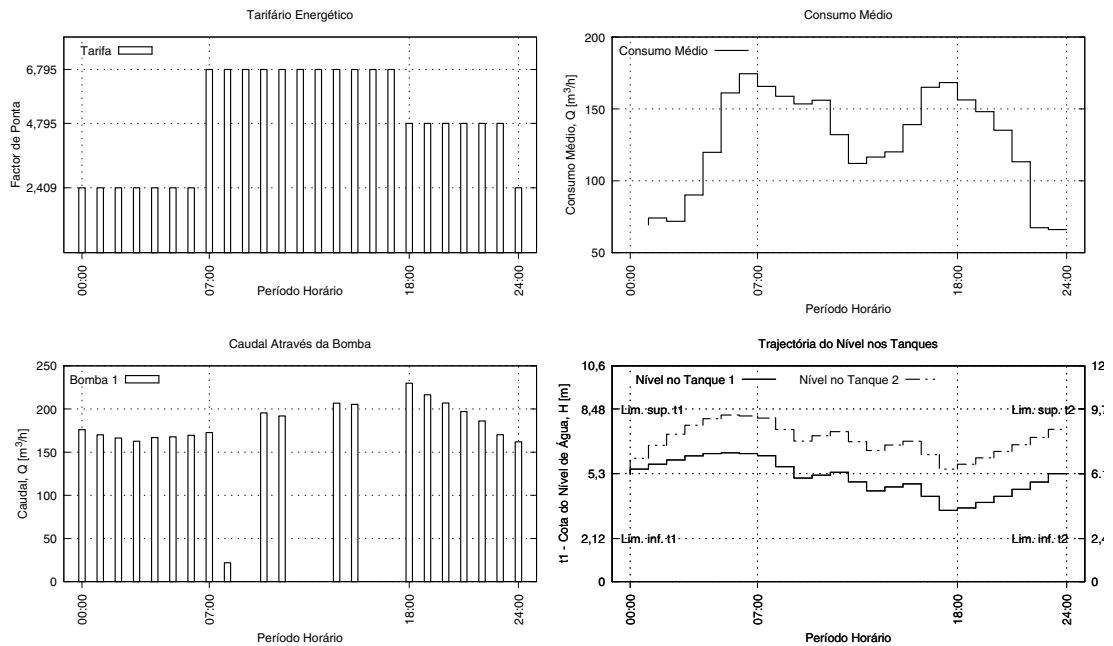
**Figura 5.14: Velocidade de Convergência do HDEPSO na Rede Walski 173.** - Quantidade de Gerações versus “Fitness” normalizado.

Analisando a Fig. 5.14, conclui-se que o algoritmo HDEPSO apresentou boa velocidade de convergência nesta rede, realizando um número reduzido de iterações até chegar a uma solução ótima, um ambiente mais exigente tanto a nível computacional como a nível de consumos, num problema com 24 variáveis de optimização, uma população de 24 indivíduos e onde foram afixadas 750 execuções do algoritmo.

Com respeito aos resultados operacionais, o regime tarifário, consumo médio, cotas do nível de água nos reservatórios e caudal bombado estão sumarizados nos gráficos da Figura 5.15.

Pela Fig. 5.15 é possível concluir que o algoritmo conseguiu apresentar um cenário operacional cujos resultados são globalmente compatíveis com as conjecturas iniciais. Primeiro, conseguiu situar fora das horas de ponta a maioria do funcionamento da unidade de bombagem, fornecendo caudal parcialmente durante os períodos horários 7, 8, 10, 11, 14 e 15. Segundo, ao impôr o recurso à água armazenada nos reservatórios de nível variável (RNV) sobretudo nas horas de pico por forma a satisfazer os consumos, o RNV t1 é operado entre os níveis 3,5 m, ocorrido às 18:00, e 6,33 m, ocorrido às 6:00. Este reservatório trabalha dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 2,12 m e 8,48 m e restaura o nível inicial no final da simulação. Por fim, o RNV t2 é operado entre os níveis 6,10 m, ocorrido às 00:00, e 9,42 m, ocorrido às 6:00. O RNV t2 trabalha dentro da faixa de operação delimitada

### 5.3 Resultados do Algoritmo HDEPSO



**Figura 5.15: Resultado da Aplicação do HDEPSO na Rede Walski 173.** - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, consumo médio, cotas dos níveis de água nos reservatórios e caudal bombado.

pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 2,44 m e 9,76 m, porém não restaurou o nível inicial quando terminou a simulação. O excedente resultante é de 2,51 m.

Pode-se deduzir neste caso que para lograr o equilíbrio entre as quantidades de água bombada e consumida, houve a necessidade de, sobretudo, garantir que os níveis finais não caem para valores abaixo dos iniciais, num cenário que corresponderia à perda de energia no sistema, obstando a periodicidade. No entanto, o cenário obtido fará com que haja menos bombagem e conseqüentemente menos custos operacionais no ciclo seguinte. Dada a severidade da restrição em causa, ela afigura-se por vezes ineficaz na garantia da periodicidade. No entanto, as condições estacionárias serão alcançadas em períodos de simulação mais prolongados.

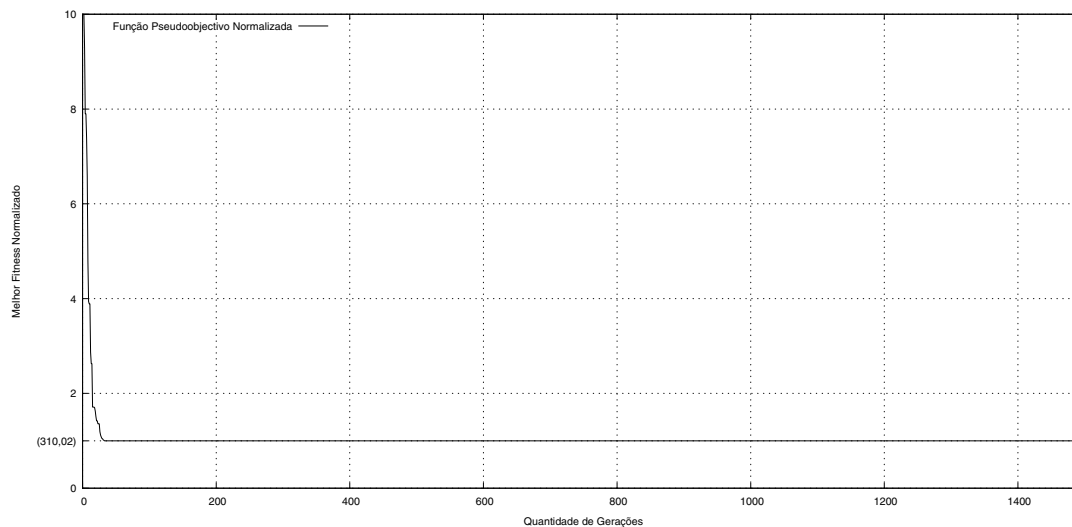
Por conseguinte, a reorganização do sistema operacional proposta reduz os custos energéticos diários associados de 489,18 para 347,86 €, implicando a redução de 23,37% enquanto a intensidade energética não foi atenuada e permaneceu nos 0,26 kWh/m<sup>3</sup>. A taxa de utilização da bomba decaiu dos 100% para os 79,17%. O tempo computacional

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

registado foi de 4.809 s.

### 5.3.3 Performance Perante a Rede Walski 489

Do ponto de vista da evolução da performance deste algoritmo perante a Rede Walski 489, este indicador está representado graficamente na Fig. 5.16, confrontando a quantidade de gerações com os valores de “fitness” normalizados entre 1 e 10.



**Figura 5.16: Velocidade de Convergência do HDEPSO na Rede Walski 489. -** Quantidade de Gerações versus “Fitness” normalizado.

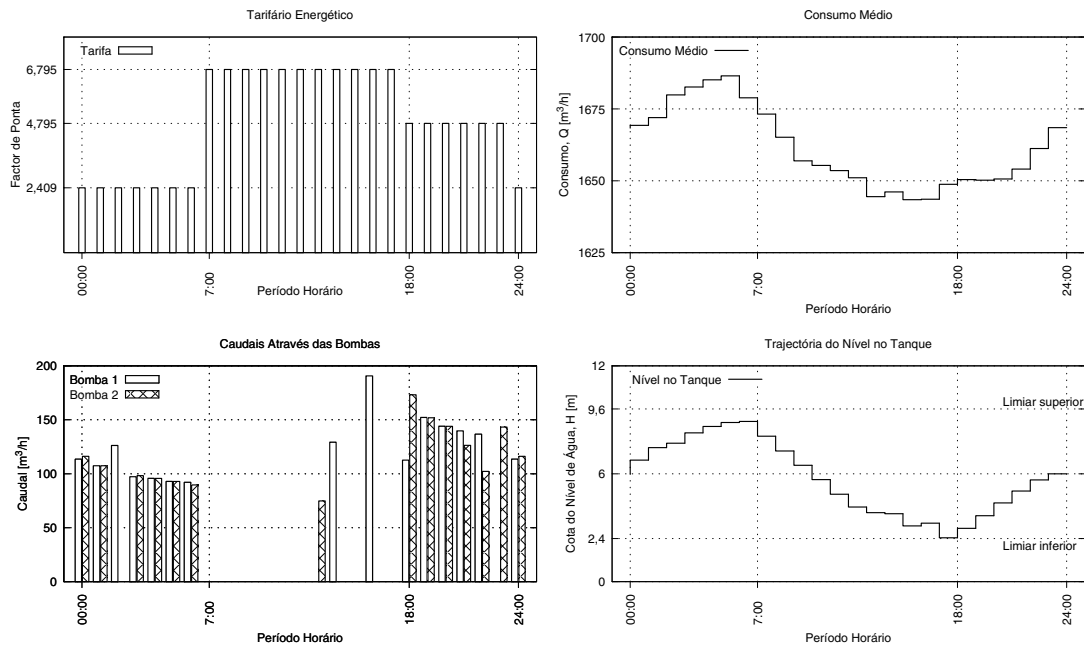
Analisando a Fig. 5.16, conclui-se que o algoritmo HDEPSO apresentou boa velocidade de convergência nesta rede, realizando um número reduzido de iterações até chegar a uma solução ótima, rede esta com um grau elevado de complexidade quando comparada com as outras pois o número de variáveis de otimização passa de 24 para 48, uma população de 48 indivíduos e onde foram afixadas 1500 execuções do algoritmo.

Com respeito aos resultados operacionais, o regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudais bombados estão sumarizados nos gráficos da Figura 5.17.

Pela Fig. 5.17 é possível concluir que o algoritmo conseguiu apresentar um cenário operacional cujos resultados são globalmente compatíveis com as conjecturas iniciais. Primeiro, conseguiu situar fora das horas de ponta a maioria do funcionamento da unidade de bombagem, fornecendo caudal parcialmente durante no período horário 13



### 5.3 Resultados do Algoritmo HDEPSO



**Figura 5.17: Resultado da Aplicação do HDEPSO na Rede Walski 489.** - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudais bombados

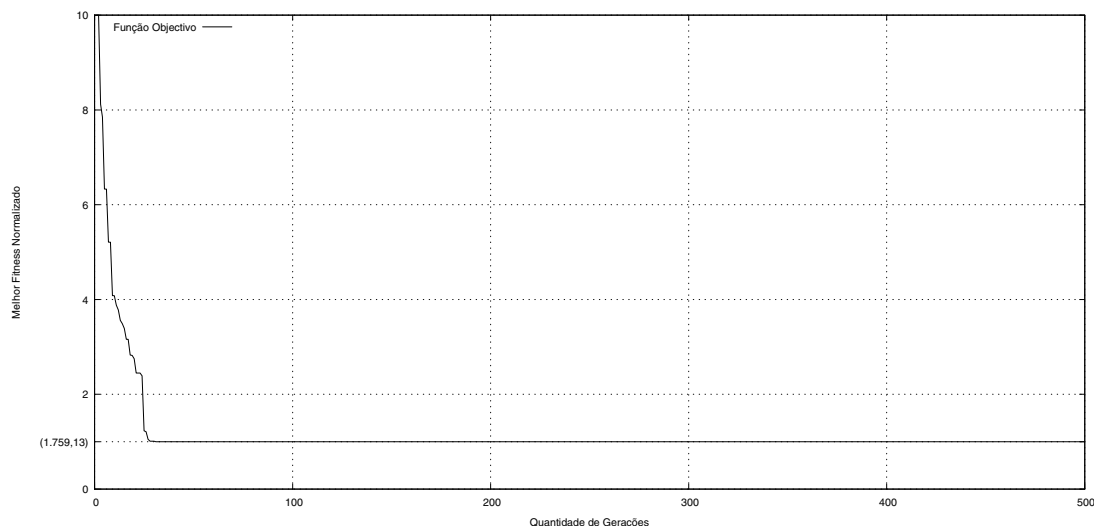
através da bomba 2 e nos períodos 14 e 16 através da bomba 1. Segundo, ao impôr o recurso à água armazenada no reservatório de nível variável (RNV) nas horas de pico por forma a satisfazer os consumos, o RNV é operado entre os níveis 2,44 m, ocorrido às 18:00, e 8,91 m, ocorrido às 7:00. O RNV trabalha portanto dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 2,4 m e 9,6 m e restaura o nível inicial às 24:00.

Por conseguinte, a reorganização do sistema operacional proposta reduz os custos energéticos diários associados de 505,77 para 310,02 €, implicando a redução de 38,70% enquanto a intensidade energética foi atenuada unicamente na bomba 1 de 0,26 para 0,25 kWh/m<sup>3</sup>, traduzindo-se numa diminuição de 3,85%. A taxa de utilização da bomba 1 decaiu dos 100% para os 58,33% enquanto que a da bomba 2 decaiu dos 100% para os 54,17%. O tempo computacional registado foi de 58.370 s.

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### 5.3.4 Performance Perante a Rede Walski 492

Do ponto de vista da evolução da performance deste algoritmo perante a Rede Walski 492, este indicador está representado graficamente na Fig. 5.18, confrontando a quantidade de gerações com os valores de “fitness” normalizados entre 1 e 10.

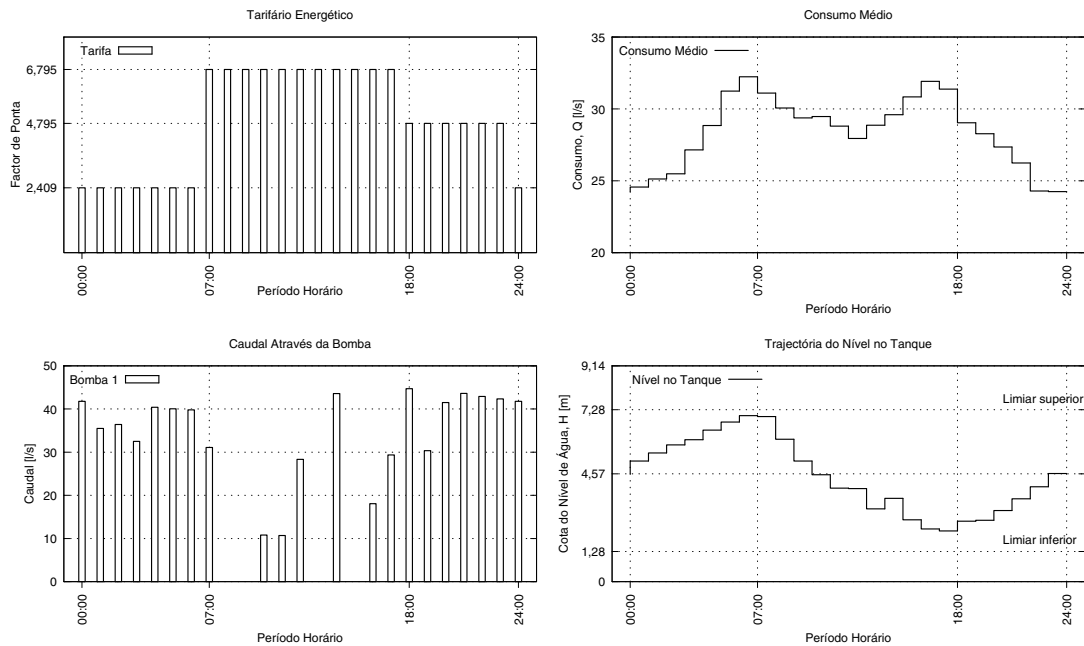


**Figura 5.18: Velocidade de Convergência do HDEPSO na Rede Walski 492.** - Quantidade de Gerações versus “Fitness” normalizado.

Analisando a Fig. 5.18, conclui-se que o algoritmo HDEPSO apresentou boa velocidade de convergência nesta rede, realizando um número reduzido de iterações até chegar a uma solução ótima, rede esta que apresenta uma maior quantidade de padrões de consumo e flutuação do nível do tanque, num problema com 24 variáveis de otimização, uma população de 24 indivíduos e onde foram afixadas 500 execuções do algoritmo.

Com respeito aos resultados operacionais, o regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado estão sumarizados nos gráficos da Figura 5.19.

Pela Fig. 5.19 é possível concluir que o algoritmo conseguiu apresentar um cenário operacional cujos resultados são globalmente compatíveis com as conjecturas iniciais. Primeiro, conseguiu situar fora das horas de ponta a maioria do funcionamento da unidade de bombagem, fornecendo caudal parcialmente durante os períodos horários 10, 11, 12, 14, 16 e 17. Segundo, ao impôr o recurso à água armazenada no reservatório de nível variável (RNV) nas horas de pico por forma a satisfazer os consumos, o RNV



**Figura 5.19: Resultado da Aplicação do HDEPSO na Rede Walski 492.** - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado.

é operado entre os níveis 2,15 m, ocorrido às 18:00, e 7,03 m, ocorrido às 7:00. O RNV trabalha portanto dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 1,83 m e 7,31 m e restaura o nível inicial às 24:00.

Por conseguinte, a reorganização do sistema operacional proposta reduz os custos energéticos diários associados de 2740,50 para 1759,13 €, implicando a redução de 35,81% enquanto a intensidade energética foi atenuada de 0,18 para 0,16 kWh/m<sup>3</sup>, traduzindo-se numa diminuição de 11,11%. A taxa de utilização da bomba decaiu dos 100% para os 83,33%. O tempo computacional registado foi de 2.233 s.

## 5.4 Resultados do Algoritmo GA-MPC

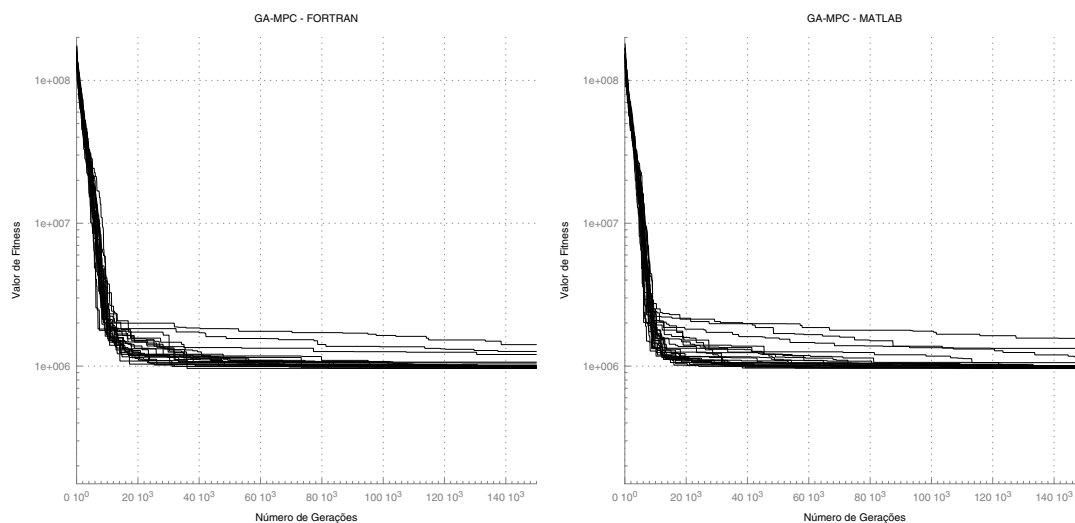
Foram levadas a cabo também simulações com o algoritmo GA-MPC às quatro redes preconizadas. Com efeito, o algoritmo original [29] foi recebido na linguagem MATLAB<sup>®</sup> havendo assim a necessidade de o transpor para FORTRAN e proceder à validação do mesmo. A função objectivo usada proveio de um dos problemas postos no

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

“CEC 2011 Competition on Testing Evolutionary Algorithms on Real World Optimization Problems” [92]. Este problema visa o planeamento da operação de um sistema hidrotérmico de geração de energia eléctrica através do agendamento de descargas de água de quatro unidades durante 24 horas, de forma a minimizar o custo operacional associado ao uso dessas unidades. A dimensão deste problema é de 96, dimensão esta de grande porte e que pode levar anos a ser resolvido através de métodos convencionais [16].

### 5.4.1 Validação do Algoritmo GA-MPC

A implementação do algoritmo GA-MPC na linguagem FORTRAN implicou diversos testes para validar o código produzido. Na Fig. 5.20 apresenta-se um comparativo entre os resultados obtidos, onde verifica-se a concordância entre os valores obtidos, validando-se assim, o código implementado.



**Figura 5.20: Evoluções da Função Objectivo em FORTRAN e MATLAB<sup>®</sup>.** - Visualização de 25 execuções independentes para cada código.

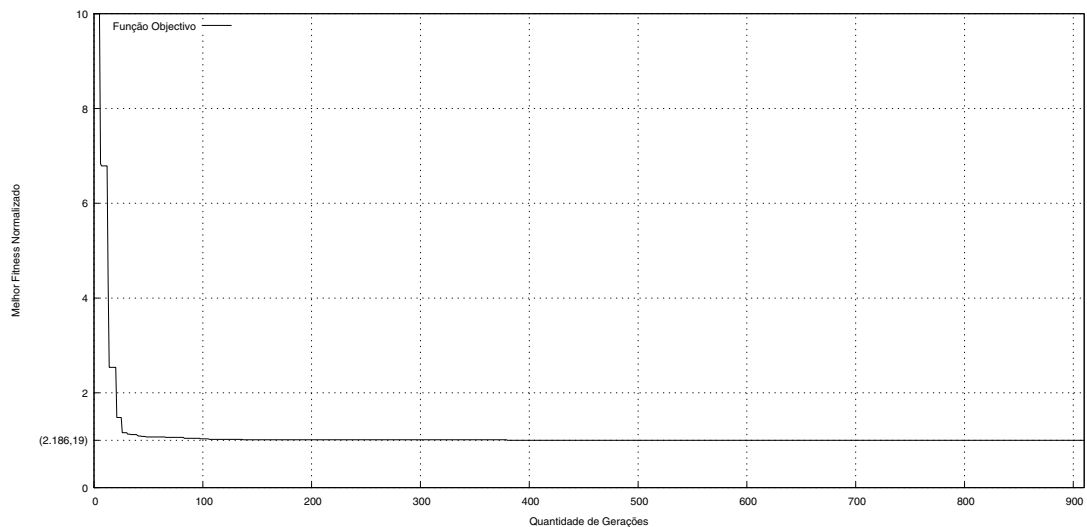
A Tabela 5.25 apresenta o sumário dos resultados óptimos para o custo energético do sistema onde foram feitas de 25 execuções independentes do algoritmo e 150 mil avaliações da função objectivo em cada execução, para cada código.

**Tabela 5.25:** Performance do GA-MPC quando codificado em FORTRAN e MATLAB<sup>®</sup>

Parâmetros	Código do Algoritmo	
	MATLAB <sup>®</sup>	FORTRAN
Melhor Resultado [€]	$9,61651 \cdot 10^5$	$9,96355 \cdot 10^5$
Pior Resultado [€]	$1,55513 \cdot 10^6$	$1,41360 \cdot 10^6$
Média Aritmética [€]	$1,02796 \cdot 10^5$	$1,03302 \cdot 10^5$
Desvio Padrão [€]	$1,34139 \cdot 10^5$	$1,06262 \cdot 10^5$
Tempo de Computação	1,5 horas	175 s

### 5.4.2 Performance Perante a Rede Primária

Do ponto de vista da evolução da performance deste algoritmo perante a Rede Primária, este indicador está representado graficamente na Fig.5.21, confrontando a quantidade de gerações com os valores de “fitness” normalizados entre 1 e 10.



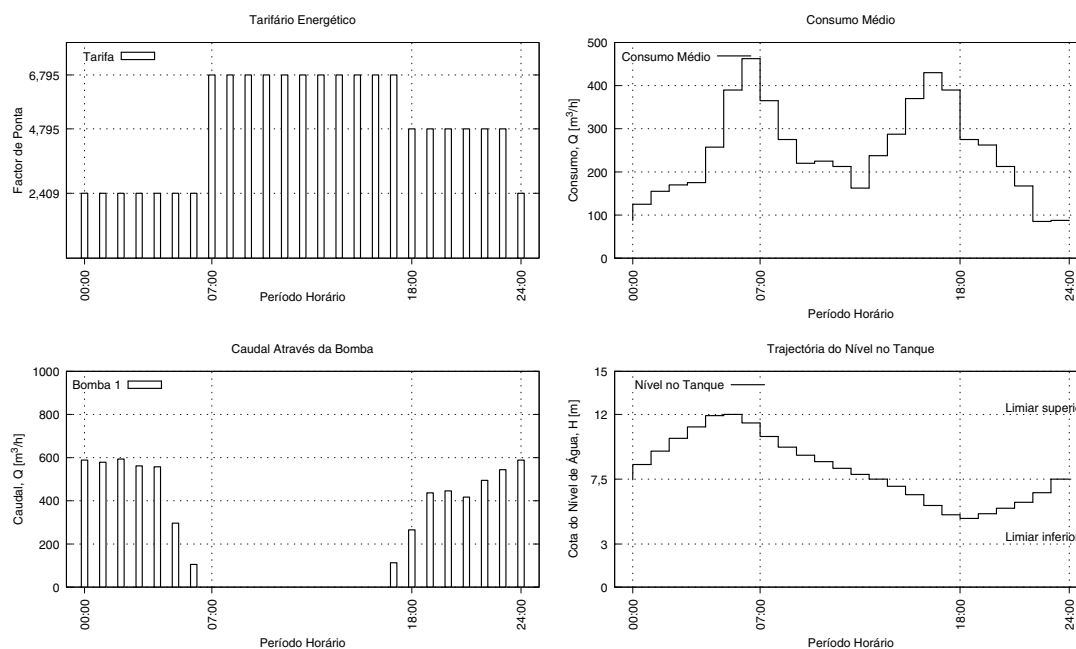
**Figura 5.21:** Velocidade de Convergência do GA-MPC na Rede Primária. - Quantidade de Gerações versus “Fitness” normalizado.

Analisando a Fig.5.21, conclui-se que o algoritmo GA-MPC apresentou boa velocidade de convergência nesta rede, realizando um número reduzido de iterações até chegar a uma solução óptima, num problema com 24 variáveis de otimização onde

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

foram afixadas 910 gerações de uma população de 22 indivíduos.

Com respeito aos resultados operacionais, o regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado estão sumarizados nos gráficos da Figura 5.22.



**Figura 5.22: Resultado da Aplicação do GA-MPC na Rede Primária.** - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado.

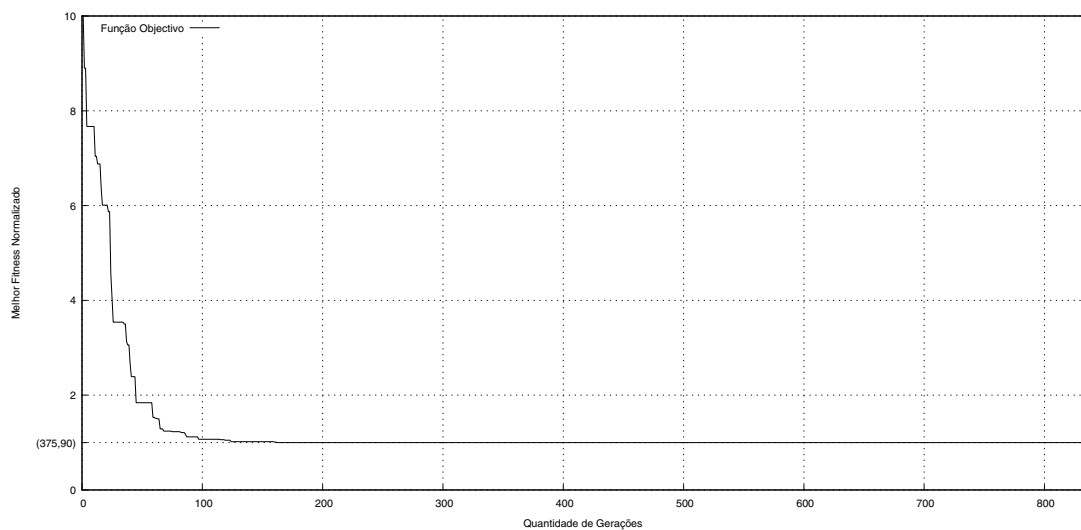
Pela Fig. 5.22 é possível concluir que o algoritmo conseguiu apresentar um cenário operacional cujos resultados são globalmente compatíveis com as conjecturas iniciais. Primeiro, conseguiu situar fora das horas de ponta a maioria do funcionamento da unidade de bombagem, fornecendo caudal parcialmente durante os períodos horários 16 e 17. Segundo, ao impôr o recurso à água armazenada no reservatório de nível variável (RNV) nas horas de pico por forma a satisfazer os consumos, o RNV é operado entre os níveis 4,77 m, ocorrido às 19:00, e 12,00 m, ocorrido às 6:00. O RNV trabalha portanto dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 3 m e 12 m e restaura o nível inicial às 24:00.

Por conseguinte, a reorganização do sistema operacional proposta reduz os custos energéticos diários associados de 5.473,94 para 2.186,19 €, implicando a redução de

60,06% enquanto a intensidade energética foi atenuada de 0,15 para 0,10 kWh/m<sup>3</sup>, traduzindo-se numa diminuição de 33,33%. A taxa de utilização da bomba decaiu dos 100% para os 58,33%. No entanto, o tempo computacional registado foi de 4.570 s.

### 5.4.3 Performance Perante a Rede Walski 173

Do ponto de vista da evolução da performance deste algoritmo perante a Rede Walski 173, este indicador está representado graficamente na Fig. 5.23, confrontando a quantidade de gerações com os valores de “fitness” normalizados entre 1 e 10.



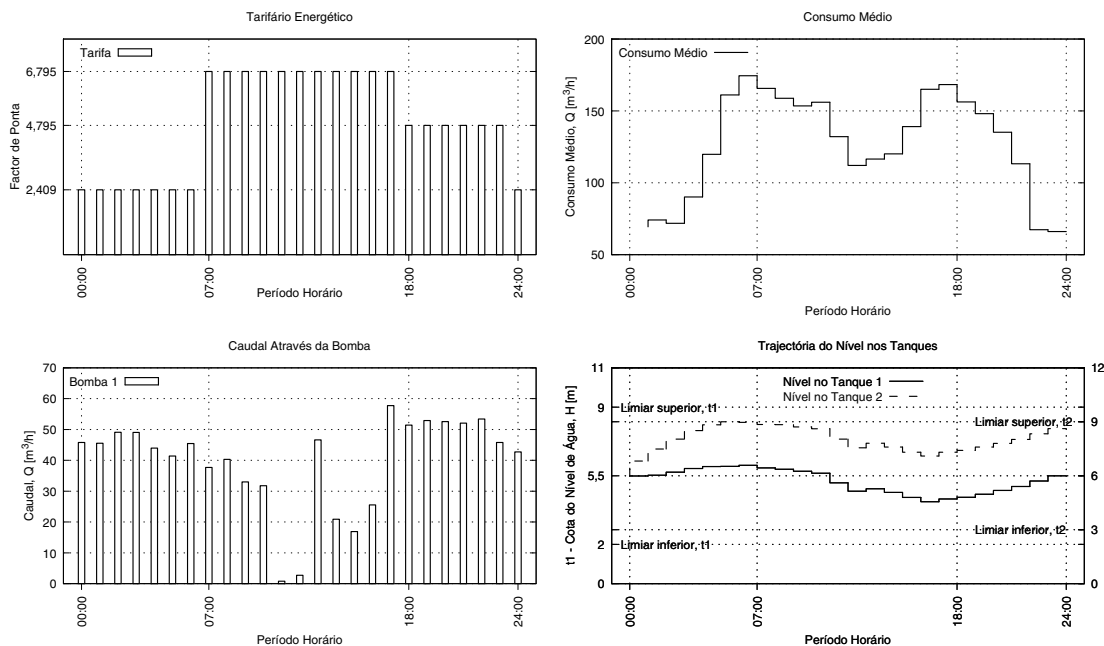
**Figura 5.23: Velocidade de Convergência do GA-MPC na Rede Walski 173.** - Quantidade de Gerações versus “Fitness” normalizado.

Analisando a Fig. 5.23, conclui-se que o algoritmo GA-MPC apresentou boa velocidade de convergência nesta rede, realizando um número reduzido de iterações até chegar a uma solução óptima, num problema com 24 variáveis de optimização, uma população de 44 indivíduos e onde foram afixadas 833 gerações.

Com respeito aos resultados operacionais, o regime tarifário, consumo médio, cotas do nível de água nos reservatórios e caudal bombado estão sumarizados nos gráficos da Figura 5.24.

Pela Fig. 5.24 é possível concluir que o algoritmo conseguiu apresentar um cenário operacional cujos resultados são globalmente compatíveis com as conjecturas iniciais. Primeiro, conseguiu situar fora das horas de ponta boa parte do funcionamento da

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS



**Figura 5.24: Resultado da Aplicação do GA-MPC na Rede Walski 173.** - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, consumo médio, cotas dos níveis de água nos reservatórios e caudal bombado.

unidade de bombagem, porém fornecendo caudal parcialmente durante todo o período de facturação mais elevada. Segundo, ao impôr o recurso à água armazenada nos reservatórios de nível variável (RNV) sobretudo nas horas de pico por forma a satisfazer os consumos, o RNV t1 é operado entre os níveis 3,81 m, ocorrido às 18:00, e 6,32 m, ocorrido às 6:00. Este reservatório trabalha dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 2,12 m e 8,48 m e restaura o nível inicial no final da simulação. Por fim, o RNV t2 é operado entre os níveis 6,10 m, ocorrido às 00:00, e 9,42 m, ocorrido às 6:00. O RNV t2 trabalha dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 2,44 m e 9,76 m, porém não restaurou o nível inicial quando terminou a simulação. O excedente resultante é de 2,42 m.

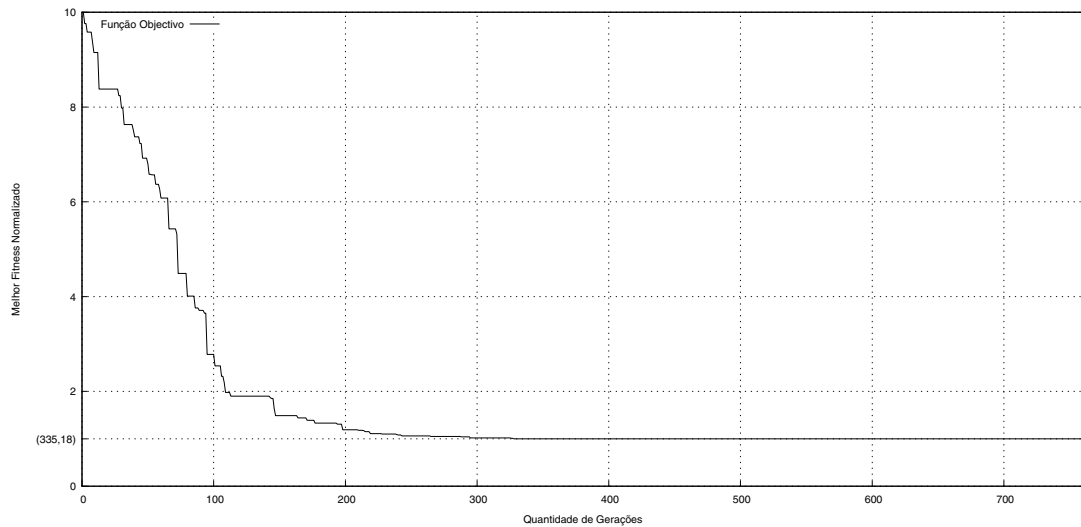
Por conseguinte, a reorganização do sistema operacional proposta reduz os custos energéticos diários associados de 489,18 para 375,90 €, implicando a redução de 23,16% enquanto a intensidade energética não foi atenuada e permaneceu nos 0,26 kWh/m<sup>3</sup>. A taxa de utilização da bomba baixou dos 100% para 87,50%. No entanto, tempo



computacional registado foi de 14.946 s.

#### 5.4.4 Performance Perante a Rede Walski 489

Do ponto de vista da evolução da performance deste algoritmo perante a Rede Walski 489, este indicador está representado graficamente na Fig. 5.25, confrontando a quantidade de gerações com os valores de “fitness” normalizados entre 1 e 10.



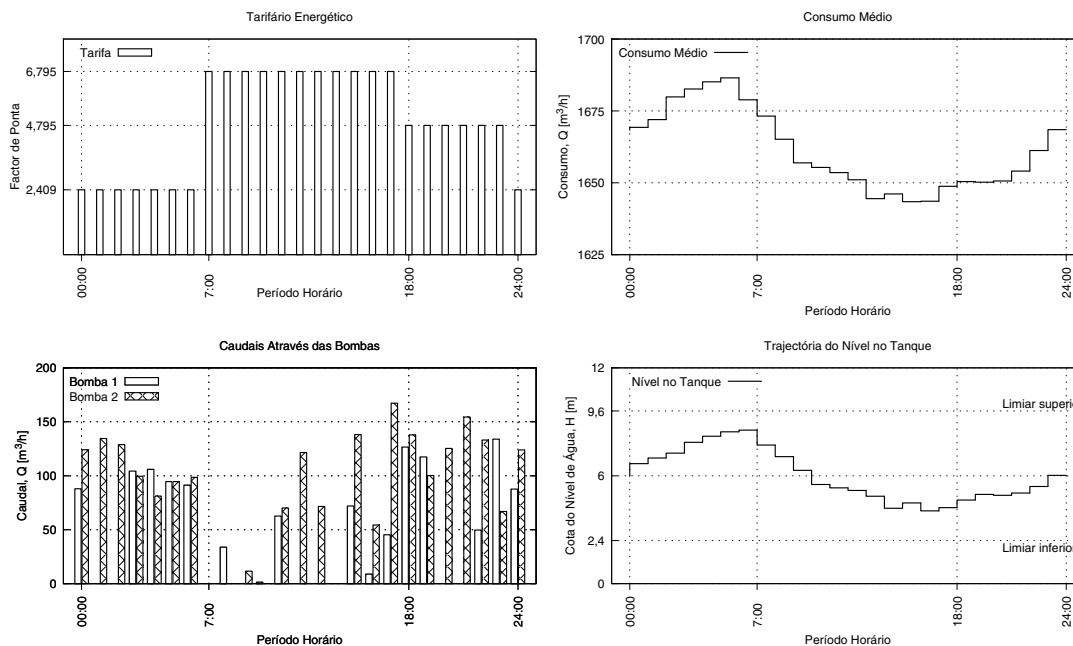
**Figura 5.25: Velocidade de Convergência do GA-MPC na Rede Walski 489.** - Quantidade de Gerações versus “Fitness” normalizado.

Analisando a Fig. 5.25, conclui-se que o algoritmo GA-MPC apresentou boa velocidade de convergência nesta rede, realizando um número reduzido de iterações até chegar a uma solução óptima, num cenário que apresenta um elevado grau de complexidade quando comparada com as demais pois o número de variáveis de optimização passa de 24 para 48, uma população de 46 indivíduos e onde foram afixadas 761 gerações.

Com respeito aos resultados operacionais, o regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudais bombados estão sumarizados nos gráficos da Figura 5.26.

Pela Fig. 5.26 é possível concluir que o algoritmo conseguiu apresentar um cenário operacional cujos resultados são globalmente compatíveis com as conjecturas iniciais. Primeiro, conseguiu situar fora das horas de ponta a maioria do funcionamento da unidade de bombagem, fornecendo caudal parcialmente durante o período de facturação

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS



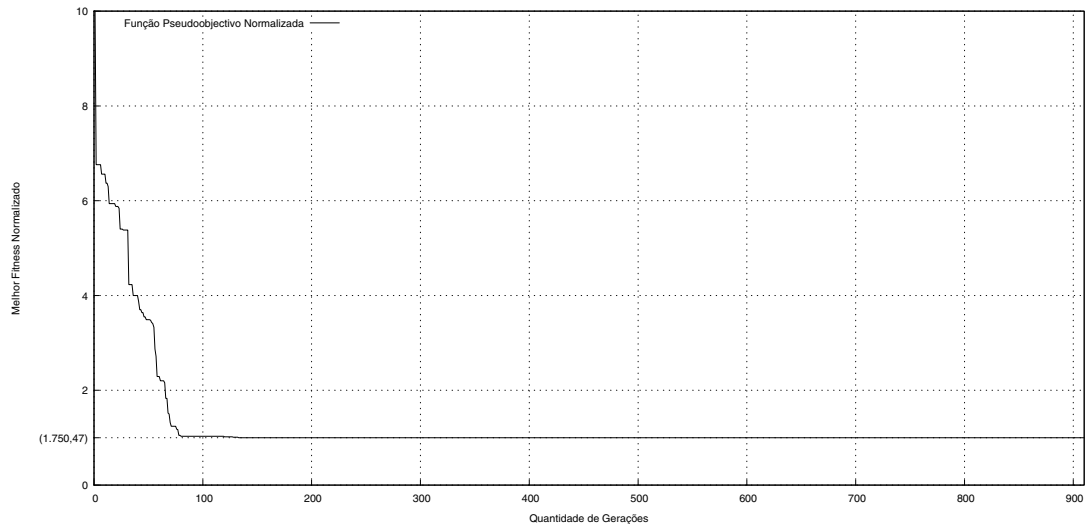
**Figura 5.26: Resultado da Aplicação do GA-MPC na Rede Walski 489.** - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudais bombados.

mais elevada através da bomba 2 por seis ocasiões e através da bomba 1 por sete vezes. Segundo, ao impôr o recurso à água armazenada no reservatório de nível variável (RNV) nas horas de pico por forma a satisfazer os consumos, o RNV é operado entre os níveis 4,05 m, ocorrido às 17:00, e 8,54 m, ocorrido às 7:00. O RNV trabalha portanto dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 2,4 m e 9,6 m e restaura o nível inicial às 24:00.

Por conseguinte, a reorganização do sistema operacional proposta reduz os custos energéticos diários associados de 505,77 para 335,18 €, implicando a redução de 33,73%. A intensidade energética das duas bombas foram atenuadas de 0,26 para 0,25 kWh/m<sup>3</sup>, traduzindo-se numa diminuição de 3,85%. A taxa de utilização da bomba 1 decaiu dos 100% para os 62,50% enquanto que a da bomba 2 decaiu dos 100% para os 83,33%. No entanto, tempo computacional registado foi de 16.527 s.

### 5.4.5 Performance Perante a Rede Walski 492

Do ponto de vista da evolução da performance deste algoritmo perante a Rede Walski 492, este indicador está representado graficamente na Fig. 5.27, confrontando a quantidade de gerações com os valores de “fitness” normalizados entre 1 e 10.



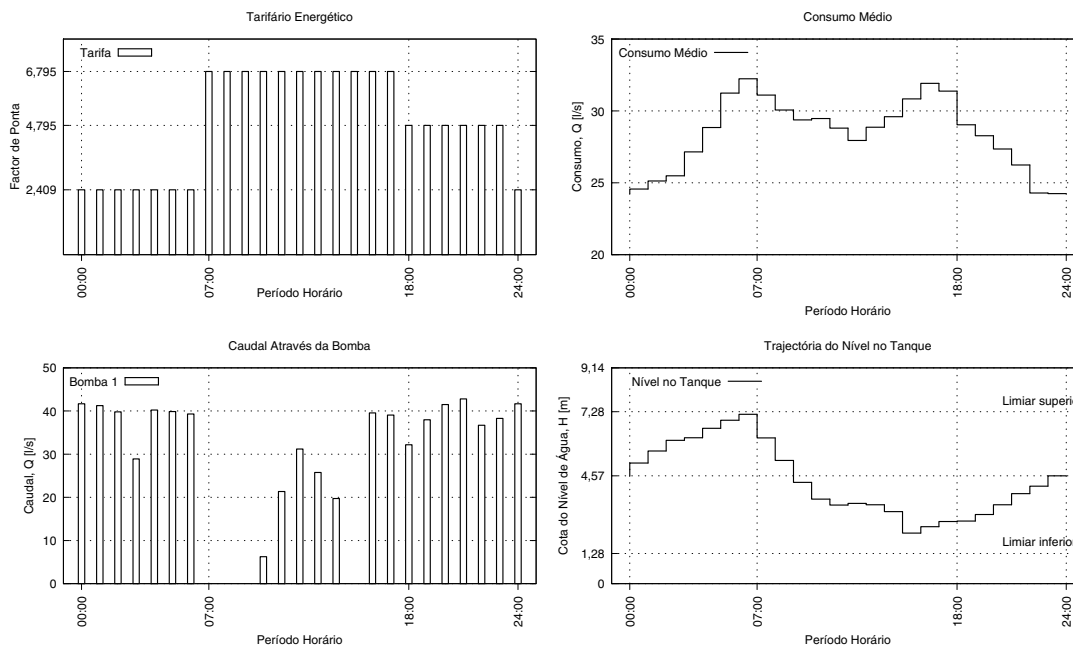
**Figura 5.27: Velocidade de Convergência do GA-MPC na Rede Walski 492.** - Quantidade de Gerações versus “Fitness” normalizado.

Analisando a Fig. 5.27, conclui-se que o algoritmo GA-MPC apresentou boa velocidade de convergência nesta rede, realizando um número reduzido de iterações até chegar a uma solução ótima, rede esta que apresenta uma maior quantidade de padrões de consumo e flutuação do nível do tanque, num problema com 24 variáveis de otimização, uma população de 22 indivíduos e onde foram afixadas 910 gerações.

Com respeito aos resultados operacionais, o regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado estão sumarizados nos gráficos da Figura 5.28.

Pela Fig. 5.28 é possível concluir que o algoritmo conseguiu apresentar um cenário operacional cujos resultados são globalmente compatíveis com as conjecturas iniciais. Primeiro, conseguiu situar fora das horas de ponta a maioria do funcionamento da unidade de bombagem, fornecendo caudal parcialmente durante os períodos horários 10, 11, 12, 14, 16 e 17. Segundo, ao impôr o recurso à água armazenada no reservatório de nível variável (RNV) nas horas de pico por forma a satisfazer os consumos, o RNV

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS



**Figura 5.28: Resultado da Aplicação do GA-MPC na Rede Walski 492.** - No sentido horário, a partir do superior esquerdo: regime tarifário, consumo médio, cota do nível de água no reservatório e caudal bombado.

é operado entre os níveis 2,14 m, ocorrido às 16:00, e 7,17 m, ocorrido às 7:00. O RNV trabalha portanto dentro da faixa de operação delimitada pelos limiares máximo e mínimo pré-definidos entre os níveis 1,83 m e 7,31 m e restaura o nível inicial às 24:00.

Por conseguinte, a reorganização do sistema operacional proposta reduz os custos energéticos diários associados de 2.740,50 para 1.750,47 €, implicando a redução de 36,13% enquanto a intensidade energética foi atenuada de 0,18 para 0,16 kWh/m<sup>3</sup>, traduzindo-se numa diminuição de 11,11%. A taxa de utilização da bomba decaiu dos 100% para os 83,33%. No entanto, tempo computacional registado foi de 5.042 s.

### 5.5 Resumo de Resultados e Comparação

Não obstante os gráficos apresentados ao longo deste capítulo, apresentar-se-à aqui, de forma sucinta e resumidamente os principais resultados obtidos para um efectiva avaliação comparativa. Assim, a performance dos algoritmos quando aplicados às quatro redes encontra-se resumida na Tabela 5.26.

## 5.5 Resumo de Resultados e Comparação

**Tabela 5.26:** Performance dos algoritmos quando aplicados às quatro redes

Algoritmos e Parâmetros	Identificação da Rede			
	Primária	Walski 173	Walski 489	Walski 492
<b>Pressupostos</b>				
Número de Variáveis	24	24	48	24
Custo de Referência	5.473,94	489,18	505,77	2.740,50
<b>HDEPSO</b>				
Tamanho da População	24	24	48	24
Número de Gerações	500	750	1.500	500
Custo Ótimo	2.388,44	347,86	310,02	1.759,13
Redução de Custo (%)	56,37	23,37	38,70	35,81
Tempo de Computação (s)	1.845	4.809	58.370	2.233
<b>GA-MPC</b>				
Tamanho da População	22	44	46	22
Número de Gerações	910	833	761	910
Custo Ótimo	2.186,19	375,90	335,18	1.750,47
Redução de Custo (%)	60,06	23,16	33,73	36,13
Tempo de Computação (s)	4.570	14.946	16.527	5.042

Os resultados da aferição da intensidade energética, medida utilizada para monitorizar o grau de eficiência da utilização da energia, são apresentados na Tabela 5.27, apresentando as tendências da eficiência energética.

**Tabela 5.27:** Intensidade Energética Antes e Depois da Optimização

Algoritmos e Parâmetros	Identificação da Rede			
	Primária	Walski 173	Walski 489	Walski 492
Pré-Optimização [kWh/m <sup>3</sup> ]	0,15	0,26	0,26   0,26	0,18
<b>HDEPSO</b>				
Pós-Optimização [kWh/m <sup>3</sup> ]	0,11	0,26	0,25   0,26	0,16
Taxa de Redução (%)	26,67	0,00	3,85   0,00	11,11
<b>GA-MPC</b>				
Pós-Optimização [kWh/m <sup>3</sup> ]	0,10	0,26	0,25   0,25	0,16
Taxa de Redução (%)	33,33	3,85	3,85   0,00	11,11

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Por fim, a Tabela 5.28 mostra a taxa de utilização da bombas antes e depois da aplicação dos modelos de otimização.

**Tabela 5.28:** Taxa de Utilização da(s) Bomba(s) Antes e Depois da Otimização

Taxa de Utilização	Identificação da Rede			
	Primária	Walski 173	Walski 489	Walski 492
Pré-Otimização [%]	100,00	100,00	100,00   100,00	100,00
Pós-Otimização HDEPSO [%]	45,83	79,17	58,33   54,17	83,33
Pós-Otimização GA-MPC [%]	58,33	87,50	62,50   83,33	83,33

### 5.6 Notas Finais

Do ponto de vista do desempenho, pode-se observar nos gráficos da performance uma degradação significativa da velocidade de convergência, definida como o número de iterações necessárias para a aproximação da optimalidade perante tendências estacionárias, do algoritmo GA-MPC à medida que a complexidade do problema posto vai-se avolumando enquanto a análise à performance do algoritmo HDEPSO aponta para uma melhor adaptação deste algoritmo ao ambiente, tendo o desempenho mais eficaz.

Importa ainda salientar que os módulos de otimização foram implementados em FORTRAN, linguagem de programação vocacionada para a eficiência e velocidade na execução dos processos de cálculo numérico, implementado no compilador “open source” GCC v4.6 e todas as simulações foram executadas num computador portátil Sony Vaio<sup>®</sup> com processador Intel<sup>®</sup> Core2 CPU T5500, 1,66 GHz e 1 GiB RAM.

# 6

## Discussão Final, Conclusões e Trabalhos Futuros

A vida é uma aprendizagem  
diária. Afasto-me do caos e sigo  
um simples pensamento: quanto  
mais simples, melhor!

---

José Saramago (1922–2010)

Ao longo desta Dissertação procurou-se apreender os princípios e processos da simulação hidráulica de sistemas de distribuição de água e a metodologia dos algoritmos evolutivos com o fito de combiná-los, resultando desse processo, o planeamento do funcionamento óptimo, ou energeticamente eficiente, dos sistemas de bombagem de sistemas de distribuição de água. Assim, o seu desenvolvimento foi dividido em três fases. Numa

## 6. DISCUSSÃO FINAL, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

primeira fase, estudou-se a metodologia que o simulador hidráulico EPANET utiliza, a familiarização com a linguagem de programação FORTRAN e efectuou-se uma pesquisa bibliográfica, desembocando na elaboração de modelos adequados às simulações hidráulicas. Numa segunda fase, foram estudados os algoritmos de optimização aplicados à optimização global, primeiramente aplicados a funções matemáticas que normalmente os investigadores recorrem para avaliar a robustez dos algoritmos, e a sua forma de interacção com o simulador hidráulico. Na terceira e última fase implementou-se dois algoritmos na procura de soluções óptimas de quatro sistemas de distribuição de água, atendendo aos pressupostos alinhavados na primeira fase.

Muitos sistemas de distribuição de água ainda existentes foram projectados com base no método de tentativa e erro ou da replicação de estruturas bem sucedidas do passado e ainda hoje há sistemas assim geridos mas que operam de forma ineficiente. Assim, objectivou-se implementar e analisar diferentes metodologias de optimização capazes de minimizar os recursos energéticos utilizados nesse tipo de sistemas. Acredita-se que cumpriu-se o objectivo principal preconizado nesta Dissertação face aos resultados obtidos, que manifestaram melhorias quantitativas no desempenho operacional nas quatro instâncias estudadas e, por esta razão, abrem caminho à dedução de que a aplicação dessas metodologias afigura-se de capital importância às entidades competentes na tomada de decisões operacionais com vista à eficácia global dos sistemas de distribuição de água. Ainda, confirma-se que os técnicas emergentes de optimização constituem-se como ferramentas eficientes e eficazes de estudo e aplicação ao providenciarem indicadores de fiabilidade satisfatórios num curto espaço de tempo.

Deve-se ressaltar o desempenho das metodologias aplicadas. Por um lado, o HDEPSO mostrou-se bastante eficaz e eficiente, obtendo boas soluções em tempo computacional aceitável, recorrendo a um número reduzido de gerações e apresentando boa velocidade de convergência em todas as instâncias. Por outro, o GA-MPC mostrou-se eficaz, obtendo boas soluções, porém em tempo computacional pouco aceitável nalguns casos quando comparado ao HDEPSO. Importa salientar que ao longo deste trabalho houve duas metodologias que fracassaram a convergência para uma solução óptima apesar do bom comportamento face às funções matemáticas de teste. Um deles é o *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) que é uma combinação de abordagens probabilísticas e determinísticas. O outro foi o *Bound Optimization BY Quadratic Approximation* (BOBYQA) que também não necessita de derivadas e aproxima a função objectivo a



---

um modelo quadrático através de interpolação polinomial de vários pontos. Deixou-se de considerar nesta Dissertação aspectos diversos como a calibração dos modelos, a análise de sensibilidade a alguns factores como a afixação do nível inicial aos limiares mínimo e máximo de tanques, o recurso a variadas técnicas de tratamento de restrições ou a abordagem a um cenário de optimização multiobjectivo focado na apreciação de incompatibilidades operacionais existentes. No entanto, reconhece-se que tais aspectos eram merecedores de ser colocados em confronto com os desafios postos a fim de examinar a forma como influem no processo. Outra ressalva ao trabalho aqui apresentado são as hipóteses simplificadoras na construção dos modelos como a ausência da incerteza na previsão de consumos e estimação de custo ou a falta de acessórios como válvulas reductoras de pressão que criem, por exemplo, zonas de pressão em alguns sectores das redes.

Uma das contribuições desta Dissertação foi sustentar que existem soluções com características de aplicabilidade, escalabilidade e algum grau de qualidade, passíveis de serem implementadas por entidades gestoras de sistemas de distribuição de água na medida em que abrem perspectivas de minimização de ineficiências nos seus sistemas, na racionalização dos seus custos associados e na compatibilização e optimização tarifária, de forma a irem de encontro às condições socio-económicas das populações e abrindo espaço à canalização das poupanças advinentes para a realização de outros investimentos. Numa perspectiva mais aplicada, este estudo consistiu em averiguar a importância das ferramentas de optimização enquanto instrumento determinante no apoio a decisões no âmbito da implantação e operacionalização da gestão integrada de recursos hídricos.

Desta Dissertação podem-se originar propostas que venham no sentido de ampliar o conhecimento de sistemas de distribuição de água. Primeiro, torna-se conveniente abordar mais explicitamente as implicações do recurso à optimização dos custos operacionais num horizonte mais alargado de 30 dias ou um ano. Segundo, a implementação da optimização em tempo real combinada com estratégias de paralelização de algoritmos. Terceiro, a avaliação do impacto de outras variáveis de sistemas como a qualidade da água, pressões, velocidades, ciclo de vida de bombas ou perdas hídricas. Quarto, a aplicação de soluções híbridas como a bombagem fotovoltaica ou o uso de microturbinas. Quinto, a calibração de modelos por forma a reflectirem os cenários pré-existentes e a aplicabilidade da optimização no alargamento de redes de distribuição de água exis-

## **6. DISCUSSÃO FINAL, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

tentes. Por fim, a aplicação a instâncias reais dos pressupostos e resultados teóricos encontrados na aplicação de métodos de optimização.

Parte IV

Apêndices



# Ficheiros de Input no EPANET

## Rede Primária

[TITLE]

Rede de configuração básica

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
no01	45	0	;
no02	50	250	domestico ;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
t1	45	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve
t2	65	7.5	0	15	25	0	;

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
tb01	no01	t2	1350	450	0.1	0	Open ;
tb02	t2	no02	1800	500	0.1	0	Open ;

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
bomba1	t1	no01	HEAD curva PATTERN pbomba1;

## Anexos

---

### [VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

### [TAGS]

### [DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

### [STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

### [PATTERNS]

;ID	Multipliers
-----	-------------

#### ;TARIFA:

tarifario	2.409	2.409	2.409	2.409	2.409	2.409
tarifario	2.409	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795
tarifario	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795
tarifario	4.795	4.795	4.795	4.795	4.795	4.795

#### ;PROCURA DOMESTICA:

domestico	0.350	0.500	0.620	0.680	0.700	1.030
domestico	1.560	1.850	1.460	1.100	0.880	0.900
domestico	0.850	0.650	0.950	1.150	1.480	1.720
domestico	1.560	1.100	1.050	0.850	0.670	0.340

#### ;PADRAO DA BOMBA:

pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

### [CURVES]

;ID	X-Value	Y-Value
-----	---------	---------

#### ;CURVA DA BOMBA:

curva	0	60.0
curva	600	46.5
curva	1200	6.0

#### ;EFICIENCIA DA BOMBA:

eficiencia	400	78
eficiencia	860	80
eficiencia	1220	68
eficiencia	1600	60

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency	85		
Global Price	1		
Global Pattern	tarifario		
Demand Charge	1		
Pump	bomba1	Efficiency	eficiencia
Pump	bomba1	Price	1
Pump	bomba1	Pattern	tarifario

[EMITTERS]

;Junction                      Coefficient

[QUALITY]

;Node                              InitQual

[SOURCES]

;Node                              Type                              Quality                              Pattern

[REACTIONS]

;Type                              Pipe/Tank                              Coefficient

[REACTIONS]

Order Bulk	1
Order Tank	1
Order Wall	1
Global Bulk	0
Global Wall	0

## Anexos

---

Limiting Potential            0  
Roughness Correlation       0

### [MIXING]

;Tank                            Model

### [TIMES]

Duration                        24:00  
Hydraulic Timestep            1:00  
Quality Timestep               0:05  
Pattern Timestep               1:00  
Pattern Start                   0:00  
Report Timestep                1:00  
Report Start                    0:00  
Start ClockTime                12 am  
Statistic                        None

### [REPORT]

Status                          Full  
Summary                         Yes  
Pagesize                         0  
Energy                           Yes  
Nodes                            All  
Links                            All

### [OPTIONS]

Units                            CMH  
Headloss                         D-W  
Specific Gravity                1  
Viscosity                        1  
Trials                            40  
Accuracy                        0.001  
CHECKFREQ                       2  
MAXCHECK                        10  
DAMPLIMIT                       0  
Unbalanced                       Continue 10



```

Pattern          1
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent 0.5
Quality          None mg/L
Diffusivity      1
Tolerance        0.01
  
```

[COORDINATES]

```

;Node           X-Coord           Y-Coord
no01            4708.33            5383.33
no02            10408.33           6800.00
t1              1575.00            5383.33
t2              7025.00            8866.67
  
```

[VERTICES]

```

;Link           X-Coord           Y-Coord
  
```

[LABELS]

```

;X-Coord       Y-Coord           Label \& Anchor Node
  
```

[BACKDROP]

```

DIMENSIONS      0.00           0.00           10000.00        10000.00
UNITS           None
FILE
OFFSET          0.00           0.00
  
```

[END]

## Rede Walski 173

[TITLE]

Rede Walski 173

Advanced Water Distribution Modeling and Management

Thomas M. Walski, Donald V. Chase, Dragan A. Savic,

Walter Grayman, Stephen Beckwith, Edmundo Koelle

Pg. 173

ISBN: 9781934493014

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
no0s	97.5	0	;
no0d	97.5	0	;
no01	118.9	27.4	procuraz1 ;
no02	128.0	16.9	procuraz3 ;
no03	129.5	7.92	procuraz2 ;
no04	131.1	11.5	procuraz3 ;
no05	137.2	0	;
no06	135.6	35.3	procuraz3 ;
no07	128.0	14.8	procuraz2 ;
no08	126.5	0	;
no09	128.0	12.6	procuraz1 ;
no10	128.0	4.68	procuraz1 ;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
r1	97.5	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve
t1	163.1	5.3	0	10.6	15.0	0	;
t2	160.0	6.1	0	12.2	10.9	0	;

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
-----	-------	-------	--------	----------	-----------	-----------	--------

tb0s	r1	no0s	7.6	610	120	0	Open ;
tb0d	no0d	no01	67.1	533	120	0	Open ;
tb01	no01	no02	381.0	152	110	0	Open ;
tb02	no02	no03	254.5	152	110	0	Open ;
tb03	no03	no04	167.6	203	130	0	Open ;
tb04	no02	no04	307.8	152	110	0	Open ;
tb05	no04	no05	129.5	203	130	0	Open ;
tb06	no05	t1	301.8	203	125	0	Open ;
tb07	no05	no06	640.1	203	105	0	Open ;
tb08	t2	no06	170.7	152	110	0	Open ;
tb09	no03	no06	227.1	203	100	0	Open ;
tb10	no07	no06	335.3	254	115	0	Open ;
tb11	no08	no03	405.4	203	110	0	Open ;
tb12	no01	no08	271.3	254	115	0	Open ;
tb13	no08	no07	251.5	254	115	0	Open ;
tb14	no10	no07	137.2	152	120	0	Open ;
tb15	no09	no10	210.3	152	120	0	Open ;
tb16	no08	no09	152.4	152	120	0	Open ;

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters			
bomba1	no0s	no0d	HEAD	cbomba1	PATTERN	pbomba1 ;

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

[PATTERNS]

;ID	Multipliers
-----	-------------

## Anexos

---

### ;TARIFARIO ENERGETICO

tarifario	2.409	2.409	2.409	2.409	2.409	2.409
tarifario	2.409	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795
tarifario	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795
tarifario	4.795	4.795	4.795	4.795	4.795	4.795

### ;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 1

procuraz1	0.350	0.500	0.620	0.680	0.700	1.030
procuraz1	1.560	1.850	1.460	1.100	0.880	0.900
procuraz1	0.850	0.650	0.950	1.150	1.480	1.720
procuraz1	1.560	1.100	1.050	0.850	0.670	0.340

### ;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 2

procuraz2	0.389	0.351	0.432	0.561	1.108	1.217
procuraz2	1.316	1.338	1.300	1.267	1.223	1.216
procuraz2	1.234	1.265	1.351	1.440	1.469	1.432
procuraz2	1.297	0.818	0.603	0.528	0.441	0.404

### ;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 3

procuraz3	0.680	0.650	0.620	0.500	0.580	0.800
procuraz3	1.080	1.100	1.220	1.350	1.420	1.450
procuraz3	1.100	0.900	0.750	0.650	0.730	1.000
procuraz3	1.200	1.470	1.450	1.400	1.200	0.700

### ;PADRAO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA

pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

### [CURVES]

;ID	X-Value	Y-Value
;CURVA CARACTERISTICA DA BOMBA 1		
cbomba1	0	74.7
cbomba1	248	70.1
cbomba1	364	64.0

### [CONTROLS]

### [RULES]

---

```
[ENERGY]
Global Efficiency      75
Global Price          0.0931
Demand Charge        0.1064
Pump      bomba1      Price      0.0931
Pump      bomba1      Pattern    tarifario
```

```
[EMITTERS]
;Junction      Coefficient
```

```
[QUALITY]
;Node          InitQual
```

```
[SOURCES]
;Node          Type          Quality      Pattern
```

```
[REACTIONS]
;Type          Pipe/Tank      Coefficient
```

```
[REACTIONS]
Order Bulk      1
Order Tank      1
Order Wall      1
Global Bulk     0
Global Wall     0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0
```

```
[MIXING]
;Tank          Model
```

```
[TIMES]
Duration        24:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep 0:05
```

## Anexos

---

Pattern Timestep	1:00
Pattern Start	0:00
Report Timestep	1:00
Report Start	0:00
Start ClockTime	12 am
Statistic	None

### [REPORT]

Status	Full
Summary	Yes
Pagesize	0
Energy	Yes
Nodes	All
Links	All

### [OPTIONS]

Units	CMH
Headloss	H-W
Specific Gravity	1
Viscosity	1
Trials	40
Accuracy	0.001
CHECKFREQ	2
MAXCHECK	10
DAMPLIMIT	0
Unbalanced	Continue 10
Pattern	1.0
Demand Multiplier	1.0
Emitter Exponent	0.5
Quality	None mg/L
Diffusivity	1
Tolerance	0.01

### [COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
no0s	2000.00	7500.00

---

no0d	4000.00	7500.00
no01	4000.00	6000.00
no02	4000.00	4500.00
no03	6000.00	4500.00
no04	6000.00	3000.00
no05	6000.00	1500.00
no06	8000.00	4500.00
no07	8000.00	6000.00
no08	6000.00	6000.00
no09	6000.00	7500.00
no10	8000.00	7500.00
r1	2000.00	9000.00
t1	2000.00	3000.00
t2	10000.00	6000.00

## [VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
tb04	4000	3000.00
tb06	2000	1500.00
tb07	8000	1500.00
tb08	10000	4500.00

## [LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label \& Anchor Node
2200.00	9000.00	"Lago Crystal"
2600.00	7300.00	"Bomba 1"
2200.00	3000.00	"Tanque 1"
10200.00	6000.00	"Tanque 2"

## [BACKDROP]

DIMENSIONS	0.00	0.00	10000.00	10000.00
UNITS	None			
FILE				
OFFSET	0.00	0.00		

## [END]

## Rede Walski 489

[TITLE]

Rede Walski 489

Advanced Water Distribution Modeling and Management

Thomas M. Walski, Donald V. Chase, Dragan A. Savic,

Walter Grayman, Stephen Beckwith, Edmundo Koelle

Pg. 489

ISBN: 9781934493014

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
no1s	97.54	0.	;
no1d	97.54	0.	;
no2s	97.54	0.	;
no2d	97.54	0.	;
no01	118.87	23.3	procuraz3 ;
no02	128	17.0	procuraz2 ;
no03	129.54	7.95	procuraz1 ;
no04	131	11.4	procuraz2 ;
no05	140.21	4.54	procuraz1 ;
no06	135.64	35.2	procuraz3 ;
no07	128	14.8	procuraz2 ;
no08	126.5	0.	;
no09	128	12.5	procuraz2 ;
no10	128	4.54	procuraz1 ;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
r1	97.54	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve
t1	160	6.0	0	12	16.5	0	;

[PIPES]



;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
tb1s	r1	no1s	7.62	609.6	100	0	Open ;
tb1d	no1d	no01	67.1	533.4	100	0	Open ;
tb2s	r1	no2s	7.62	609.6	100	0	Open ;
tb2d	no2d	no01	67.1	533.4	100	0	Open ;
tb01	no01	no02	381.0	152.4	110	0	Open ;
tb02	no02	no03	254.5	152.4	110	0	Open ;
tb03	no03	no04	167.64	203.2	130	0	Open ;
tb04	no04	no02	307.85	152.4	110	0	Open ;
tb05	no04	no05	129.54	203.2	130	0	Open ;
tb06	no05	no06	640.1	203.2	105	0	Open ;
tb07	no06	t1	170.7	304.8	110	0	Open ;
tb08	no03	no06	227.1	203.2	100	0	Open ;
tb09	no06	no07	335.28	254	115	0	Open ;
tb10	no08	no03	405.4	203.2	110	0	Open ;
tb11	no08	no01	271.3	254	115	0	Open ;
tb12	no07	no08	251.46	254	115	0	Open ;
tb13	no10	no07	137.16	152.4	120	0	Open ;
tb14	no09	no10	210.3	152.4	120	0	Open ;
tb15	no08	no09	152.4	152.4	120	0	Open ;

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
bomba1	no1s	no1d	HEAD cbomba1 PATTERN pbomba1;
bomba2	no2s	no2d	HEAD cbomba2 PATTERN pbomba2;

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	TypeSetting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	-------------	-----------

[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

## Anexos

---

### [PATTERNS]

```
;ID          Multipliers
;TARIFARIO ENERGETICO
tarifario    2.409    2.409    2.409    2.409    2.409    2.409
tarifario    2.409    6.795    6.795    6.795    6.795    6.795
tarifario    6.795    6.795    6.795    6.795    6.795    6.795
tarifario    4.795    4.795    4.795    4.795    4.795    4.795
;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 1
procuraz1    0.350    0.500    0.620    0.680    0.700    1.030
procuraz1    1.560    1.850    1.460    1.100    0.880    0.900
procuraz1    0.850    0.650    0.950    1.150    1.480    1.720
procuraz1    1.560    1.100    1.050    0.850    0.670    0.340
;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 2
procuraz2    0.680    0.650    0.620    0.500    0.580    0.800
procuraz2    1.080    1.100    1.220    1.350    1.420    1.450
procuraz2    1.100    0.900    0.750    0.650    0.730    1.000
procuraz2    1.200    1.470    1.450    1.400    1.200    0.700
;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 3
procuraz3    0.389    0.351    0.432    0.561    1.108    1.217
procuraz3    1.316    1.338    1.300    1.267    1.223    1.216
procuraz3    1.234    1.265    1.351    1.440    1.469    1.432
procuraz3    1.297    0.818    0.603    0.528    0.441    0.404
;PADRAO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA 1
pbomba1     1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
pbomba1     1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
pbomba1     1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
pbomba1     1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
;PADRAO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA 2
pbomba2     1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
pbomba2     1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
pbomba2     1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
pbomba2     1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
```

### [CURVES]

```
;ID          X-Value    Y-Value
```

```
;PUMP:
cbomba1      0      74.7
cbomba1      136     70.1
cbomba1      227     64.0
;PUMP:
cbomba2      0      74.7
cbomba2      136     70.1
cbomba2      227     64.0

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]
Global Efficiency 75
Global Price      0.0931
Demand Charge     0.1064
Pump bomba1      Price      0.0931
Pump bomba1      Pattern    tarifario
Pump bomba2      Price      0.0931
Pump bomba2      Pattern    tarifario

[EMITTERS]
;Junction      Coefficient

[QUALITY]
;Node          InitQual

[SOURCES]
;Node          Type          Quality      Pattern

[REACTIONS]
;Type          Pipe/Tank      Coefficient

[REACTIONS]
```

## Anexos

---

Order Bulk	1
Order Tank	1
Order Wall	1
Global Bulk	0
Global Wall	0
Limiting Potential	0
Roughness Correlation	0

### [MIXING]

;Tank Model

### [TIMES]

Duration	24:00
Hydraulic Timestep	1:00
Quality Timestep	0:05
Pattern Timestep	1:00
Pattern Start	0:00
Report Timestep	1:00
Report Start	0:00
Start ClockTime	12 am
Statistic	None

### [REPORT]

Status	Full
Summary	Yes
Pagesize	0
Energy	Yes
NodesAll	
LinksAll	

### [OPTIONS]

Units	CMH
Headloss	H-W
Specific Gravity	1
Viscosity	1
Trials	40

---

Accuracy	0.001
CHECKFREQ	2
MAXCHECK	10
DAMPLIMIT	0
Unbalanced	Continue 10
Pattern	1.0
Demand Multiplier	1.0
Emitter Exponent	0.5
Quality	None mg/L
Diffusivity	1
Tolerance	0.01

## [COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
no1s	300.00	8000.00
no1d	2000.00	8000.00
no2s	300.00	7000.00
no2d	2000.00	7000.00
no01	2650.00	7500.00
no02	4608.33	5850.00
no03	6941.67	5483.33
no04	4941.67	3716.67
no05	7075.00	3933.33
no06	9375.00	5100.00
no07	8091.67	7050.00
no08	6258.33	6950.00
no09	6541.67	8666.67
no10	8908.33	8416.67
r1	300.00	9000.00
t1	11500.00	7000.00

## [VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
tb04	4025.00	4650.00
tb06	8941.67	3550.00
tb07	11500.00	5100.00

## Anexos

---

```
[LABELS]
;X-Coord          Y-Coord          Label \& Anchor Node

[BACKDROP]
DIMENSIONS        0.00          0.00          10000.00       10000.00
UNITS             None
FILE
OFFSET           0.00          0.00

[END]
```

## Rede Walski 492

## [TITLE]

Rede Walski 492

Advanced Water Distribution Modeling and Management

Thomas M. Walski, Donald V. Chase, Dragan A. Savic,

Walter Grayman, Stephen Beckwith, Edmundo Koelle

Pg. 492

ISBN: 9781934493014

## [JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
no1s	0	0	;
no1d	0	0	;
no01	7.62	6.31	;
no03	22.86	3.47	;
no08	27.43	5.05	;
no09	24.38	0.95	;
no10	19.81	1.14	procuraz3 ;
no12	10.67	1.14	;
no13	12.19	0.95	procuraz2 ;
no14	6.10	1.26	;
no15	3.05	1.26	procuraz1 ;
no16	16.76	0.63	procuraz2 ;
no20	16.15	1.58	procuraz3 ;
no26	18.29	1.58	;
no27	9.14	1.26	;
no28	6.10	0.95	procuraz1 ;
no29	6.10	0.95	procuraz1 ;

## [RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
r1	6.10	;

## [TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve
-----	-----------	-----------	----------	----------	----------	--------	----------

## Anexos

---

t1 45.72 4.57 0 9.14 12.2 0 ;

### [PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
tb1s	r1	no1s	9.8	305	100	0	Open ;
tb1d	no1d	no01	11.9	305	100	0	Open ;
tb15	t1	no08	295.7	305	100	0	Open ;
tb16	no09	no03	259.1	305	100	0	Open ;
tb17	no08	no09	291.1	305	100	0	Open ;
tb18	no10	no03	275.8	152	100	0	Open ;
tb22	no01	no12	349.0	305	100	0	Open ;
tb24	no12	no13	364.2	305	100	0	Open ;
tb26	no01	no14	361.2	102	100	0	Open ;
tb28	no14	no15	370.3	102	100	0	Open ;
tb31	no03	no16	311.8	203	100	0	Open ;
tb40	no03	no20	173.7	152	100	0	Open ;
tb41	no20	no10	196.6	152	100	0	Open ;
tb50	no26	no03	329.2	152	100	0	Open ;
tb51	no26	no16	265.2	152	100	0	Open ;
tb52	no16	no10	192.0	152	100	0	Open ;
tb53	no09	no26	178.3	152	100	0	Open ;
tb54	no27	no14	109.7	152	100	0	Open ;
tb55	no12	no27	112.8	152	100	0	Open ;
tb56	no28	no12	164.6	152	100	0	Open ;
tb57	no29	no28	121.9	152	100	0	Open ;
tb58	no15	no29	97.5	152	100	0	Open ;
tb59	no27	no29	170.7	152	100	0	Open ;
tb66	no13	no16	291.4	305	100	0	Open ;
tb67	no26	no01	173.7	152	100	0	Open ;

### [PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
bomba1	no1s	no1d	HEAD cbomba1 PATTERN pbomba1;

### [VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------



[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

[PATTERNS]

;ID	Multipliers
-----	-------------

;TARIFARIO ENERGETICO

tarifario	2.409	2.409	2.409	2.409	2.409	2.409
tarifario	2.409	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795
tarifario	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795	6.795
tarifario	4.795	4.795	4.795	4.795	4.795	4.795

;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 1

procuraz1	0.350	0.500	0.620	0.680	0.700	1.030
procuraz1	1.560	1.850	1.460	1.100	0.880	0.900
procuraz1	0.850	0.650	0.950	1.150	1.480	1.720
procuraz1	1.560	1.100	1.050	0.850	0.670	0.340

;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 2

procuraz2	0.680	0.650	0.620	0.500	0.580	0.800
procuraz2	1.080	1.100	1.220	1.350	1.420	1.450
procuraz2	1.100	0.900	0.750	0.650	0.730	1.000
procuraz2	1.200	1.470	1.450	1.400	1.200	0.700

;PADRAO DE CONSUMO DE AGUA DA ZONA 3

procuraz3	0.389	0.351	0.432	0.561	1.108	1.217
procuraz3	1.316	1.338	1.300	1.267	1.223	1.216
procuraz3	1.234	1.265	1.351	1.440	1.469	1.432
procuraz3	1.297	0.818	0.603	0.528	0.441	0.404

;PADRAO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA

pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
pbomba1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

## Anexos

---

### [CURVES]

;ID	X-Value	Y-Value
;CURVA CARACTERISTICA DA BOMBA		
cbomba1	0	64.0
cbomba1	37.85	48.8
cbomba1	56.8	30.5

### [CONTROLS]

### [RULES]

### [ENERGY]

Global Efficiency		75	
Global Price		1	
Demand Charge		1	
Pump	bomba1	Price	1
Pump	bomba1	Pattern	tarifario

### [EMITTERS]

;Junction	Coefficient
-----------	-------------

### [QUALITY]

;Node	InitQual
-------	----------

### [SOURCES]

;Node	Type	Quality	Pattern
-------	------	---------	---------

### [REACTIONS]

;Type	Pipe/Tank	Coefficient
-------	-----------	-------------

### [REACTIONS]

Order Bulk		1
Order Tank		1
Order Wall		1

---

Global Bulk	0
Global Wall	0
Limiting Potential	0
Roughness Correlation	0

## [MIXING]

;Tank	Model
-------	-------

## [TIMES]

Duration	24:00
Hydraulic Timestep	1:00
Quality Timestep	0:05
Pattern Timestep	1:00
Pattern Start	0:00
Report Timestep	1:00
Report Start	0:00
Start ClockTime	12 am
Statistic	None

## [REPORT]

Status	Full
Summary	Yes
Pagesize	0
Energy	Yes
Nodes	All
Links	All

## [OPTIONS]

Units	LPS
Headloss	H-W
Specific Gravity	1
Viscosity	1
Trials	40
Accuracy	0.001
CHECKFREQ	2
MAXCHECK	10

## Anexos

---

DAMPLIMIT           0  
Unbalanced           Continue 10  
Pattern               1  
Demand Multiplier   1.0  
Emitter Exponent    0.5  
Quality               None mg/L  
Diffusivity          1  
Tolerance            0.01

### [COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
no1s	1975.00	4516.67
no1d	3275.00	4516.67
no01	4525.00	4516.67
no03	8275.00	6916.67
no08	6025.00	7783.33
no09	5341.67	6566.67
no10	10358.33	5333.33
no12	5991.67	2716.67
no13	9441.67	3133.33
no14	3241.67	2833.33
no15	2225.00	1050.00
no16	8608.33	5233.33
no20	10208.33	6766.67
no26	6291.67	4983.33
no27	4525.00	2750.00
no28	6075.00	883.33
no29	4341.67	1083.33
r1	1191.67	6183.33
t1	7525.00	9383.33

### [VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
tb1s	1191.67	4516.67
tb15	7525.00	8500.00

```
[LABELS]
;X-Coord      Y-Coord      Label \& Anchor Node

[BACKDROP]
DIMENSIONS    0.00      0.00      10000.00    10000.00
UNITS         None
FILE
OFFSET        0.00      0.00

[END]
```



# Referências Bibliográficas

- [1] AARTS, E., KORST, J. & MICHIELS, W. (2005). Simulated Annealing. In E.K. Burke & G. Kendall, eds., *Search Methodologies*, 187–210, Springer US. 41
- [2] ABEBE, A. & SOLOMATINE, D. (1998). Application of global optimization to the design of pipe networks. *Proc. Int. Conf. Hydroinformatics*, **98**, 989–995. 50
- [3] ALPEROVITS, E. & SHAMIR, U. (1971). Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, **13(6)**, 885–900. 10, 50
- [4] BARRY, J.A. (02/2007). Watergy: Energy and water efficiency in municipal water supply and wastewater treatment. Cost-effective savings of water and energy. Tech. rep., The Alliance to Save Energy. 62
- [5] BELLMAN, R. (2003). *Dynamic Programming*. Dover Books on Mathematics, Dover. 52
- [6] BORREGO, C., COUTINHO, M., SILVA, M., FIDÉLIS, T., FIGUEIREDO, J., LEÃO, F., PINHO, R., BENTO, S. & MATA, P. (07/04/2006). Plano Municipal da Água – Diagnóstico. Tech. rep., AMRia – Associação de Municípios da Ria. 61
- [7] CAMPOS, A.G.D.D.A. (2005). *Modelação e Análise Numérica do Comportamento Mecânico e Térmico de Ligas de Alumínio*. Ph.D. thesis, Universidade de Aveiro. 32
- [8] CASEIRO, J. (2009). *Estratégias Evolucionárias de Optimização de Parâmetros Reais*. Master’s thesis, Universidade de Aveiro. Departamento de Engenharia Mecânica. 50

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [9] CHIN, D.A. (2006). *Water-Resources Engineering*. Pearson Prentice Hall. 17
- [10] COELLO, C., LAMONT, G. & VAN VELDHUSEN, D. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Genetic and Evolutionary Computation Series, Springer. 29
- [11] COELLO COELLO, C. (1999). Treating constraints as objectives for single-objective evolutionary optimization. *Engineering Optimization*, **32**, 275–308. 30
- [12] COELLO COELLO, C. (2002). Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **191**, 1245–1287. 29, 66
- [13] COHEN, G. (1982). *Optimisation and control of dynamic operational research models*, chap. Optimal control of water supply networks, 251–276. North-Holland systems and control series, North-Holland Pub. Co., editor: Tzafestas, S.G. 64
- [14] CROSS, H. (1936). Analysis of flow in networks of conduits or conductors. *Engineering Experiment Station*, **286**. 8
- [15] CUNHA, M. & SOUSA, J. (1999). Water distribution network design optimization: Simulated Annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **125**, 215–221. 12
- [16] DAS, S. & SUGANTHAN, P.N. (2010). Problem definitions and evaluation criteria for CEC 2011 competition on testing Evolutionary Algorithms on real-world optimization problems. Disponível em [http://www3.ntu.edu.sg/home/epnsugan/index\\_files/CEC11-RWP/CEC11-RWP.htm](http://www3.ntu.edu.sg/home/epnsugan/index_files/CEC11-RWP/CEC11-RWP.htm), consultado em 1 de Março de 2012. 102
- [17] DAS CIÊNCIAS DE LISBOA, A. (2001). *Dicionário da Língua Portuguesa Contemporânea da Academia das Ciências de Lisboa*, vol. 1. Verbo. 3
- [18] DAS ÁGUAS LIVRES, E.E.P. (2010). Relatório de Sustentabilidade 2010. <http://www.epal.pt/epal/Helios/asp/download.aspx?id=2318>, consultado em 15 de Fevereiro de 2012. 4



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [19] DAS ÁGUAS LIVRES, E.E.P. (2011). Jornal Águas Livres. <http://www.epal.pt/epal/Helios.aspx/download.aspx?id=2260>, consultado em 15 de Fevereiro de 2012. 4
- [20] DE MINISTROS, C. (2008). Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE). <http://dre.pt/pdf1sdip/2008/05/09700/0282402865.pdf>, consultado em 1 de Dezembro de 2011. 4
- [21] DEB, A. & SARKAR, A. (1971). Optimization in design of hydraulic networks journal. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, **97–SA2**, 141–159. 10
- [22] DEB, K. (2005). Multi-objective optimization. In E.K. Burke & G. Kendall, eds., *Search Methodologies*, 273–316, Springer US. 43
- [23] DO AMBIENTE E DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO, M. (2001). Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA). [http://www.inag.pt/inag2004/port/quem\\_somos/pdf/uso\\_eficiente\\_agua.pdf](http://www.inag.pt/inag2004/port/quem_somos/pdf/uso_eficiente_agua.pdf), consultado em 1 de Dezembro de 2011. 4
- [24] DONG, X.L., LIU, S.Q., TAO, T., LI, S.P. & XIN, K.L. (2012). A comparative study of Differential Evolution and Genetic Algorithms for optimizing the design of water distribution systems. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, **13**, 674–686. 35
- [25] DORIGO, M. (2007). Ant Colony Optimization. <http://dx.doi.org/10.4249/scholarpedia.1461>. 37
- [26] DORIGO, M. & STÜTZLE, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Bradford Books, MIT Press. 37
- [27] DORIGO, M., MANIEZZO, V. & COLORNI, A. (1996). Ant System: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **26**, 29–41. 12
- [28] ELSAYED, S.M. (2011). GA with a new multi-parent crossover for solving IEEE-CEC 2011 competition problems. In *Evolutionary Computation (CEC), 2011 IEEE Congress*, 1034–1040. 51

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [29] ELSAYED, S.M. (2012). Matlab source codes for optimization problem solving. Disponível em <http://seit.unsw.adfa.edu.au/staff/sites/rsarker/Saber-Page.html>, consultado em 5 de Fevereiro de 2012. 101
- [30] EUSUFF, M. & LANSEY, K. (2003). Optimization of water distribution network design using the Shuffled Frog Leaping Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **129**, 210–225. 12
- [31] FARMANI, R., SAVIC, D.A. & WALTERS, G.A. (2005). Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. *Engineering Optimization*, **37**, 167–183. 44
- [32] FUJIWARA, O. & KHANG, D. (1990). A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research*, **Vol. 26, N**, 539–549. 11
- [33] FUJIWARA, O., JENCHAIMAHAKOON, B. & EDIRISINGHE, N. (1987). Modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research*, **23(6)**, 977–982. 11, 50
- [34] GESSLER, J. (1981). Analysis of pipe networks. In M. Chaudhry & V. Yevjevich, eds., *Closed-conduit Flow*, chap. 4, 61–100, Water Resources Publications. 11
- [35] GESSLER, J. (1982). Optimization of pipe networks. In *International Symposium on Urban Hydrology Hydraulics and Sediment Control*, University of Kentucky, Lexington, KY. 11
- [36] GESSLER, J. (1985). Pipe network optimization by enumeration. In H.C. Torno, ed., *Computer Applications in Water Resources*, 572–581, American Society of Civil Engineers (ASCE), New York. 11
- [37] GOLDMAN, F.E. (1998). *The Application of Simulated Annealing for Optimal Operation of Water Distribution Systems*. Ph.D. thesis, Arizona State University. 64
- [38] GRAEME, C.D., SIMPSON, A. & MURPHY, L. (1996). An improved genetic algorithm for pipe network optimization. *Water Resources Research*, **32**. 12

- [39] HILLIS, W. (1990). Co-evolving parasites improve simulated evolution as an optimization procedure. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **42**, 228–234. 13
- [40] HODGE, A. (2002). *Roman Aqueducts & Water Supply*. Duckworth Archaeology Series, Duckworth. 8
- [41] HOLLAND, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: an Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. University of Michigan Press. 32
- [42] HOLLAND, J. (2006). Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, **19**, 1–8. 14
- [43] HUDSON, W. (1973). *Computerizing Pipeline Design*. Journal of the Transportation Engineering Division, Vol. 99, No. 1. 8
- [44] JAMES, K., S., C., & GODLOVE, C. (2002). Watery: Taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems. Tech. rep., Alliance to Save Energy, U.S. Agency for International Development (USAID). 61
- [45] JEPSON, R.W. (1976). *Analysis of flow in pipe networks*. Ann Arbor Science. 8
- [46] KAPELAN, Z.S., SAVIC, D.A. & WALTERS, G.A. (2003). Multiobjective Sampling Design for Water Distribution Model Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, **129**. 12
- [47] KARMELI, D., GADISH, Y. & MEYERS, S. (1968). *Design of Optimal Water Distribution Networks by Dynamic Programming*. Technion-I.I.T., Faculty of Agricultural Engineering. 10
- [48] KARP, R.M. (1990). *An Introduction to Randomized Algorithms*. Technical Report – International Computer Science Institute, International Computer Science Institute. 10
- [49] KENNEDY, J. & EBERHART, R. (1995). Particle Swarm Optimization. In *International Symposium on Neural Networks*, vol. 4, 1942–1948. 11, 35

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [50] KESSLER, A. & SHAMIR, U. (1989). Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. *Water Resources Research*, **25**(7), 1469–1480. 11, 50
- [51] KIRKPATRICK, S., GELATT, C. & VECCHI, M. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, **220**, 671–680. 11, 40
- [52] LANSEY, K. & MAYS, L. (1989). Optimization model for water distribution system design. *Journal of Hydraulic Engineering*, **115**, 1401–1418. 11
- [53] LASDON, L. & WAREN, A. (1977). *Generalized Reduced Gradient Software for Linearly and Nonlinearly Constrained Problems*. Working paper (University of Texas at Austin. Graduate School of Business), Graduate School of Business, University of Texas at Austin. 11
- [54] LASDON, L., A. WAREN, A. & RATNER, M. (1984). GRG2 users guide. Tech. rep., University of Texas at Austin. 11
- [55] LIANG, T. (1971). Design conduit system by dynamic programming. *Journal of the Hydraulics Division*. 10
- [56] LIONG, S. & ATIQUZZAMAN, M. (2004). Optimal design of water distribution network using Shuffled Complex Evolution. *Journal of the Institution of Engineers, Singapore*, **44**. 13
- [57] LOGANATHAN, G., GREENE, J. & AHN, T. (1995). Design heuristic for globally minimum cost water–distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **121**. 11
- [58] LÓPEZ-IBÁÑEZ, M. (2009). *Operational Optimisation of Water Distribution Networks*. Ph.D. thesis, Edinburgh Napier University. 65
- [59] LÓPEZ-IBÁÑEZ, M., PRASAD, T. & PAECHTER, B. (2008). Ant Colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **134**, 337–346. 65
- [60] MAASS, A. (1966). Benefit–cost analysis: Its relevance to public investment decisions. *The Quarterly Journal of Economics*, **80**, 208–226. 8

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [61] MAASS, A., HUFSCHMIDT, M., DORFMAN, R., THOMAS, H., S., M. & FAIR, G. (1962). *Design of Water-Resource Systems: New Techniques for Relating Economic Objectives, Engineering Analysis, and Governmental Planning*, vol. VIII. Harvard University Press, Cambridge. 8, 10
- [62] MAIER, H., SIMPSON, A., ZECCHIN, A., FOONG, W., PHANG, K., SEAH, H. & TAN, C. (2003). Ant Colony optimization for design of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **129**. 12
- [63] MARTIN, D.W. & PETERS, G. (1963). The application of Newton's method to network analysis by digital computer. *Journal of the Institute of Water Engineers*, **17**, 115–129. 8
- [64] MAYS, L.W. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill handbooks, McGraw-Hill. 7, 20, 31, 60
- [65] MAYS, L.W. (2010). *Water Resources Engineering*. John Wiley & Sons. 21
- [66] METROPOLIS, N., A., R., ROSENBLUTH, M., TELLER, A. & TELLER, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, **21(6)**, 1087–1092. 40
- [67] MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, T.E.C. (1995). Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto. <http://www.dre.pt/pdf1s/1995/08/194B00/52845319.pdf>. 15
- [68] MINISTÉRIO DO AMBIENTE, D.O.D.T.E.D.D.R. (2007). Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (PEAASAR II) 2007–2013. <http://www.maotdr.gov.pt/Admin/Files/Documents/PEAASAR.pdf>, consultado em 5 de Janeiro de 2012. 4
- [69] MORGAN, D. & GOULTER, I. (1985). Optimal urban water distribution design. *Water Resources Research*, **Vol. 21, N**, 642. 11
- [70] MOTWANI, R. & RAGHAVAN, P. (1995). *Randomized Algorithms*. Cambridge University Press. 10

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [71] MURPHY, L., SIMPSON, A. & DANDY, G. (1993). Design of a pipe network using Genetic Algorithms. *Water, Journal of the Australian Water and Wastewater Association*, **20**(4), 40–42. 11
- [72] NICKLOW, J., REED, P., SAVIC, D., DESSALEGNE, T., HARRELL, L., CHANHILTON, A., KARAMOUZ, M., MINSKER, B., OSTFELD, A., SINGH, A. & ZECHMAN, E. (2010). State of the Art for Genetic Algorithms and beyond in water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136**, 412–432. 31
- [73] OF ENERGY, U.D. (1998). United States industrial motor systems market opportunities assessment, acedido em 1 de Agosto de 2012. 61
- [74] OF TECHNOLOGY: EVOLUTIONARY COMPUTATION PAGES, L.U. (2011). The function testbed. Disponível em <http://www.it.lut.fi/ip/evo/>, consultado em 12 de Janeiro de 2012. 52
- [75] PARKER, R.G. & RARDIN, R.L. (1988). *Discrete Optimization*, 117–131. Academic Press, New York, NY, USA. 9
- [76] POPPER, K. (2002). *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. Routledge Classics, Taylor & Francis. 45
- [77] PRICE, K.V., STORN, R.M. & LAMPINEN, J.A. (2005). *Differential Evolution: A Practical Approach To Global Optimization*. Natural Computing Series, Springer. 11, 34
- [78] PROGRAM, H.W. (1971). *The Economics of Water Supply and Quality*. Water Pollution Control Research Series, Environmental Protection Agency, Water Quality Office. 8
- [79] QUINDRY, G., LIEBMAN, J. & BRILL, E. (Jul/Aug 1981). Optimization of looped water distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, **Vol. 107**,, 665–679. 11
- [80] RAO, S.S. (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. John Wiley & Sons. 28

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [81] RECHENBERG, I. (1973). *Evolutionsstrategie: optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution*. Frommann–Holzboog, Stuttgart. 32
- [82] ROSSMAN, L.A. (1993). EPANET water quality model. Tech. rep., Environmental Protection Agency. 9
- [83] ROSSMAN, L.A. (2004). *EPANET Users Manual*. United States Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory. 15
- [84] SAVIC, D. & WALTERS, G. (1997). Genetic Algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **123**, 67–77. 12, 50
- [85] SCHAAKE, J.C. & LAI, D. (1969). *Linear Programming and Dynamic Programming Application to Water Distribution Network Design*. Report (Massachusetts Institute of Technology. Hydrodynamics Laboratory), M.I.T. Hydrodynamics Laboratory. 10, 49
- [86] SCHOENAUER, M. & XANTHAKIS, S. (1993). Constrained GA optimization. In *ICGA*, 573–580. 30
- [87] SIMPSON, A. (2000). Optimization of design of water distribution systems using Genetic Algorithms. *Acta Hydrotechnica*, **18(29)**, 97–106. 5
- [88] SIMPSON, A. (2007). Evolutionary Algorithms for optimisation of design and operation of water distribution systems. <http://www.icewarm.com.au/userfiles/File/GA-Univ-of-Karlsruhe-Feb-2007-C.pdf>. 49
- [89] SIMPSON, A., DANDY, G. & MURPHY, L. (1994). Genetic Algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **120**, 423–443. 11
- [90] SOLOMATINE, D. (1999). Two strategies of adaptive cluster covering with descent and their comparison to other algorithms. *Journal of Global Optimization*. 12
- [91] SOUSA, E. (2001). Saneamento Ambiental I – Sistemas de Distribuição de Água. Disponível em [https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1034941/1/AG\\_5\\_Sistemas\\_distribuicao.pdf](https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1034941/1/AG_5_Sistemas_distribuicao.pdf), acessado em 1 de Fevereiro de 2012. 14, 22

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [92] SUGANTHAN, P.N. (2011). Competition on testing Evolutionary Algorithms on real-world numerical optimization problems – CEC 2011, New Orleans, USA, June 2011. Disponível em [http://www3.ntu.edu.sg/home/epnsugan/index\\_files/CEC11-RWP/CEC11-RWP.htm](http://www3.ntu.edu.sg/home/epnsugan/index_files/CEC11-RWP/CEC11-RWP.htm), consultado em 1 de Março de 2012. 102
- [93] SWAMEE, P.K. & SHARMA, A.K. (2008). *Design of Water Supply Pipe Networks*. John Wiley & Sons. 8
- [94] TEMPLEMAN, A. (1982). Discussion of “optimization of looped water distribution systems” by Quindry et al. *Journal of the Environmental Engineering Division*, **107(EE3)**, 599–602. 9
- [95] TODINI, E. & PILATI, S. (1988). *Computer applications in water supply: vol. 1 – Systems Analysis and Simulation*, 1–20. Research Studies Press Ltd. 8
- [96] VARMA, K., NARASIMHAN, S. & BHALLAMUDI, S. (1997). Optimal design of water distribution systems using an NLP method. *Journal of Environmental Engineering*, **123**, 381–388. 50
- [97] ČERNÝ, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, **45**, 41–51. 11
- [98] WALSKI, T. (2001). The wrong paradigm – Why water distribution optimization doesn’t work. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **127**, 203–205. 66, 72
- [99] WALSKI, T. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Haestad Press. 72
- [100] WHITE, F.M. (2010). *Fluid Mechanics*. McGraw–Hill Series in Mechanical Engineering, McGraw Hill. 17, 21
- [101] WOOD, D.J. & CHARLES, A.M. (1972). Hydraulic network analysis using linear theory. *Journal of the Hydraulics Division*, **98(7)**, 1157–1170. 8
- [102] WOOD, M. & DANTZIG, G. (1949). Programming of interdependent activities: I general discussion. *Econometrica*, **17**, 193–199. 26



# Índice Remissivo

- Algoritmo Genético, 32–34
- Algoritmos Heurísticos, 10
- Coevolução, 13
- Computação Evolutiva, 13, 33
- Convergência Global, 41
- EPANET, 15, 16, 67
- Evolução Diferencial, 34, 36
- Método Simplex, 26, 27
- Metaheurística, 41
- Optimização
  - Multiobjectivo
    - Dominância de Pareto, 12
  - Optimização de Pareto, 43
  - Optimização Multiobjectivo, 43
  - Optimização por Colônia de Formigas, 12, 37, 39
  - Optimização por Enxame de Partículas, 11, 35
    - Pseudocódigo, 38
- Recozimento Simulado, 11, 12, 39, 41
- Shuffled Complex Evolution, 13
- Sistema de Distribuição de Água, 4, 7
- The Harvard Water Program, 8