

OPTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA. MINIMIZAÇÃO DO CUSTO DA ENERGIA RESPEITANDO CRITÉRIOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

PEDRO LUÍS CAMPOS DE ALMEIDA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

JULHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha família

*Worry about achievement? I worry about a lot of things but I don't worry about achievement.
I worry, primarily, about whether there are nightclubs in Heaven.*

Tom Waits

AGRADECIMENTOS

O autor deseja manifestar a sua gratidão às seguintes pessoas:

- Ao Professor Manuel Maria Pacheco Figueiredo, orientador desta dissertação, pela disponibilidade e entusiasmo demonstrado pelo tema durante as reuniões que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho;
- À Engenheira Ana Costa por ter possibilitado, com o seu contributo, a realização deste trabalho e se ter prontificado a participar numa reunião onde, conjuntamente com o Professor Pacheco Figueiredo, se discutiram aspectos relevantes para a sua concretização;
- A todos os Amigos que a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto proporcionou e que constituem o maior ganho deste percurso de cinco anos;
- A seus Pais e Irmão, com o maior reconhecimento e admiração.

RESUMO

Este trabalho teve como objectivo a incorporação da qualidade da água num algoritmo computacional que procura a estratégia mais económica para o funcionamento das bombas de uma estação elevatória.

O ponto de partida deste estudo foi o trabalho desenvolvido por Ana Costa (2009): nele, a autora apresenta um programa em linguagem Matlab que, em conjunto com o simulador hidráulico Epanet 2.0, procura a melhor política operacional para uma estação elevatória real, tendo em consideração a regularização dos caudais elevados e a minimização dos custos com a energia eléctrica.

O algoritmo escrito neste trabalho assenta, portanto, na minimização do valor de uma função objectivo de natureza não linear sujeita a restrições, composta por três parcelas: regularização do caudal elevado pelos grupos electrobomba da estação elevatória; minimização do custo com o consumo de energia eléctrica; minimização dos desvios de concentração de cloro residual, à saída dos reservatórios, em relação a um dado valor de referência.

Tal como no trabalho atrás referido, o sistema adutor que serviu de base ao estudo é um trecho do sistema multimunicipal a cargo da Águas do Cávado, S. A., nomeadamente no percurso estabelecido entre a estação de tratamento de água de Areias de Vilar e os reservatórios de regularização de Adães.

PALAVRAS-CHAVE: algoritmo, optimização, estação elevatória, qualidade da água, Epanet.

ABSTRACT

The main objective of this work was to incorporate water quality considerations in a computational algorithm developed to pursue the optimal schedule for pump operations in water supply systems.

The starting point was the work elaborated by Ana Costa (2009) where a program in Matlab language, along with the hydraulic simulator Epanet 2.0, was written in order to determine the most economic procedure regarding, simultaneously, a flow as regular as possible in the main pipe of the system.

Therefore, the algorithm is structured to minimize the value of a nonlinear objective function formed by three summands: the first one represents the regularity of the flow; the second, the cost associated with energy consumption; the third, the sum of the deviations of the value of chlorine residual's concentration, in the water flowing out of the tanks, from an user's established reference value for that parameter.

The network in which the program was tested is the same used in Ana Costa's work and is part of the supply system of the multi-municipal system ruled by Águas do Cávado, S.A., more precisely, the connection between the water treatment station of Areias de Vilar and the tanks of Adães.

KEYWORDS: algorithm, optimization, pump station, water quality, Epanet.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO 1

2. OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA..... 3

2.1. BREVE CARACTERIZAÇÃO DO SECTOR DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM PORTUGAL.....	3
2.1.1. A ÁGUAS DE PORTUGAL, S.A.	3
2.1.2. O PEAASAR I E O PEAASAR II.....	4
2.2. CONSUMO DE ENERGIA ELÉCTRICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS	5
2.3. ESTRATÉGIAS DE REDUÇÃO DOS CUSTOS COM A ENERGIA ELÉCTRICA	6
2.4. A QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	7
2.4.1. O ENQUADRAMENTO LEGAL	7
2.4.2. O USO DE CLORO COMO DESINFECTANTE	8
2.4.3. MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA	11
2.4.4. OS FENÓMENOS DE DECAIMENTO DE CLORO ...	14
2.5. REVISÃO DA LITERATURA.....	17

3. O SISTEMA ADUTOR EM ESTUDO..... 21

3.1. A ÁGUAS DO CÁVADO, S.A.	21
3.1.1. O SISTEMA MULTIMUNICIPAL	21
3.1.2. O CONSUMO DE ENERGIA ELÉCTRICA ...	23
3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ADUTORA ESTUDADA	24
3.2.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) ...	25
3.2.2. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA ...	26
3.2.3. ADUTORAS	28
3.2.4. VÁLVULAS	29
3.2.5. RESERVATÓRIOS	30
3.3. PADRÃO HORÁRIO DE CONSUMO DE ÁGUA.....	31

3.4. PADRÃO HORÁRIO DA TARIFA ELÉCTRICA	33
--	-----------

4. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO 37

4.1. A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	37
---	-----------

4.2. MINIMIZAÇÃO DO CUSTO COM A ENERGIA ELÉCTRICA.....	37
---	-----------

4.2.1. «O MÉTODO DO FIO TENSO (OU MÉTODO DE CONTI)»	37
---	----

4.2.2. VARIÁVEL DE CONTROLO E FUNÇÃO OBJECTIVO	39
--	----

4.2.3. RESTRIÇÕES DO PROBLEMA.....	41
------------------------------------	----

4.3. INTRODUÇÃO DO PARÂMETRO «QUALIDADE DA ÁGUA» NA FUNÇÃO OBJECTIVO	43
---	-----------

4.4. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS	44
---	-----------

4.4.1. EPANET 2.0	44
-------------------------	----

4.4.1.1. Breve descrição	44
--------------------------------	----

4.4.1.2. Simulação da qualidade da água	46
---	----

4.4.2. MATLAB	47
---------------------	----

4.4.2.1. Breve descrição	47
--------------------------------	----

4.4.2.2. Função de optimização da biblioteca do Matlab utilizada.....	47
---	----

4.5. O PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO.....	48
--	-----------

4.5.1. REGRAS A QUE DEVE OBEDECER A CONSTRUÇÃO DO FICHEIRO COM A REDE MODELADA.....	48
---	----

4.5.2. PREPARAÇÃO DOS FICHEIROS A UTILIZAR PELO PROGRAMA	49
--	----

4.5.3. ESTRUTURA DO PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO	49
---	----

4.5.4. O MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA ESCRITO NO PROGRAMA COM A FUNÇÃO OBJECTIVO.....	52
--	----

4.6. TRANSPOSIÇÃO DOS RESULTADOS DO MATLAB PARA O EPANET	55
---	-----------

5. RESULTADOS 63

5.1. NOTA INTRODUTÓRIA	63
-------------------------------------	-----------

5.2. OS RESULTADOS OBTIDOS	64
---	-----------

5.2.1. RESULTADOS PARA O DIA 8 DE JANEIRO DE 2008	64
---	----

5.2.1.1. Resultados obtidos com o programa em Matlab.....	64
---	----

5.2.1.2. Resultados obtidos após transposição para o Excel	66
--	----

5.2.1.3. Resultados obtidos após simulação no Epanet	68
--	----

5.2.1.4. A qualidade da água avaliada pela concentração de cloro.....	71
---	----

5.2.2. RESULTADOS PARA O DIA 8 DE JULHO DE 2008.....	73
--	----

5.2.2.1. Resultados obtidos com o programa em Matlab.....	73
---	----

5.2.2.2. Resultados obtidos após transposição para o Excel	75
5.2.2.3. Resultados obtidos após simulação no Epanet	76
5.2.2.4. A qualidade da água avaliada pela concentração de cloro	78
5.3. COMENTÁRIO AOS RESULTADOS E DISCUSSÃO DE CENÁRIOS ALTERNATIVOS	80
 6. CONCLUSÕES	 83
 BIBLIOGRAFIA	 85
 ANEXOS	 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da concentração de cloro residual em função da dose de cloro aplicada à água (Valente Neves)	11
Figura 3.1 – Mapa do sistema multimunicipal a cargo da Águas do Cávado, S.A. (www.aguas-cavado.pt, 2010)	22
Figura 3.2 – Vista geral do sistema adutor modelado com o Epanet	25
Figura 3.3 – Representação da ETA de Areias de Vilar no Epanet através de um reservatório de nível fixo	26
Figura 3.4 – Curva característica das bombas da estação elevatória	27
Figura 3.5 – Curva de rendimento das bombas da estação elevatória.....	27
Figura 3.6 – Pormenor do modelo do sistema adutor em que se evidenciam as três bombas existentes.....	28
Figura 3.7 – Representação de parte da conduta adutora após modelação no Epanet	29
Figura 3.8 – Exemplo de dois tipos de válvulas instaladas no sistema	30
Figura 3.9 – Pormenor da modelação dos reservatórios do sistema adutor no Epanet.....	31
Figura 3.10 – Factores horários de consumo de água do dia 8 de Janeiro de 2008.....	32
Figura 3.11 – Consumos médios horários de água pela rede de distribuição para o dia 8 de Janeiro de 2008.....	32
Figura 3.12 – Factores horários de consumo de água do dia 8 de Julho de 2008	33
Figura 3.13 – Consumos médios horários de água pela rede de distribuição para o dia 8 de Julho de 2008.....	33
Figura 3.14 - Preços horários de energia eléctrica praticados nos Períodos I e IV, durante o ano 2010, para consumidores intensivos de energia eléctrica em alta tensão.....	36
Figura 3.15 - Preços horários de energia eléctrica praticados nos Períodos II e III, durante o ano 2010, para consumidores intensivos de energia eléctrica em alta tensão.....	36
Figura 4.1 – Ilustração das curvas construídas para aplicação do «método do fio tenso»	38
Figura 4.2 – Representação de um quadro de resultados apresentado pelo programa em Matlab que indica o número de bombas utilizadas em cada período tarifário	55
Figura 4.3 - Reprodução de um quadro de resultados apresentado pelo programa em Matlab que mostra o factor de utilização de cada uma das bombas para cada período tarifário	55
Figura 4.4 - Reprodução de um quadro de resultados apresentado pelo programa em Matlab que revela as alturas iniciais e finais de água nos RNV's para cada período tarifário.....	56
Figura 4.5 - Reprodução de um quadro de resultados apresentado pelo programa em Matlab que indica o factor de utilização global de cada bomba e o respectivo custo diário.....	56
Figura 4.6 - Exemplo de controlos com condições múltiplas que comandam o estado de uma bomba e de uma tubagem em função do nível de água num RNV (LNEC, 2002)	57

Figura 4.7 - Exemplo de controlos com condições múltiplas que comandam o estado de uma bomba em função do nível de água num RNV (LNEC, 2002)	57
Figura 5.1 - Volumes consumidos e elevados acumulados, para o dia 8 de Janeiro de 2008, de acordo com o programa em Matlab	66
Figura 5.2 - Variação horária das alturas de água nos reservatórios, para o dia 8 de Janeiro de 2008, calculadas por dois processos diferentes	69
Figura 5.3 - Representação gráfica de caudais produzidos e caudais consumidos pelo sistema para o dia 8 de Janeiro de 2008	70
Figura 5.4 - Variação da concentração de cloro à saída dos reservatórios, para o dia 8 de Janeiro de 2008, avaliada por três processos distintos	72
Figura 5.5 – Relatório de reacção do Epanet para o dia 8 de Janeiro de 2008	73
Figura 5.6 - Volumes consumidos e elevados acumulados, para o dia 8 de Julho de 2008, de acordo com o programa em Matlab	75
Figura 5.7 - Variação horária das alturas de água nos reservatórios, para o dia 8 de Julho de 2008, calculadas por dois processos diferentes	77
Figura 5.8 - Representação gráfica de caudais produzidos e caudais consumidos pelo sistema para o dia 8 de Julho de 2008	78
Figura 5.9 - Variação da concentração de cloro à saída dos reservatórios, para o dia 8 de Julho de 2008, avaliada por três processos distintos	79
Figura 5.10 – Relatório de reacção do Epanet para o dia 8 de Julho de 2008	79

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Distribuição percentual do consumo energético da Águas do Cávado em 2007 (Ana Costa, 2009)	23
Quadro 3.2 - Distribuição percentual dos custos de energia da Águas do Cávado em 2007 (Ana Costa, 2009)	23
Quadro 3.3 - Caudais elevados, potências, alturas manométricas e rendimentos para as diversas combinações de operação dos GE's (Ana Costa, 2009)	26
Quadro 3.4 - Características dos reservatórios de Adães (Ana Costa, 2009)	30
Quadro 3.5 - Tarifas aplicadas ao consumidor final de energia eléctrica em alta tensão durante o ano 2010 (ERSE, 2009a)	34
Quadro 3.6 - Divisão horária da tarifa de energia eléctrica de um dia útil de Inverno para efeito de simulação no Epanet	35
Quadro 3.7 - Divisão horária da tarifa de energia eléctrica de um dia útil de Verão para efeito de simulação no Epanet	35
Quadro 4.1 - Alturas de água obtidas após aplicação do método desenvolvido com o Microsoft Excel..	60
Quadro 4.2 - Tempos de utilização obtidos após aplicação do método desenvolvido com o Microsoft Excel	60
Quadro 5.1 - Factores de utilização das bombas, dados pelo programa em Matlab, para o dia 8 de Janeiro de 2008	64
Quadro 5.2 - Alturas de água iniciais e finais, por período, para o dia 8 de Janeiro de 2008, dadas pelo programa em Matlab	65
Quadro 5.3 - Factores de utilização global de cada uma das bombas e respectivos custos, para o dia 8 de Janeiro de 2008, segundo o programa em Matlab	65
Quadro 5.4 - Factores de utilização de cada bomba, por período, para o dia 8 de Janeiro de 2008, obtidos com o Excel	67
Quadro 5.5 - Alturas de água iniciais e finais para cada período, para o dia 8 de Janeiro de 2008, dadas pelo Excel	67
Quadro 5.6 - Factores de utilização global de cada bomba, para o dia 8 de Janeiro de 2008, segundo os cálculos em Excel	68
Quadro 5.7 - Alturas de água, nos instantes iniciais e finais de cada período, obtidas após simulação da rede com o Epanet, para o dia 8 de Janeiro de 2008	68
Quadro 5.8 - Relatório de energia dado pelo Epanet para a simulação do dia 8 de Janeiro de 2008	69
Quadro 5.9 - Factores de utilização das bombas, dados pelo programa em Matlab, para o dia 8 de Julho de 2008	73
Quadro 5.10 - Alturas de água iniciais e finais, por período, para o dia 8 de Julho de 2008, dadas pelo programa em Matlab	74

Quadro 5.11 - Factores de utilização global de cada uma das bombas e respectivos custos, para o dia 8 de Julho de 2008, segundo o programa em Matlab	74
Quadro 5.12 - Factores de utilização de cada bomba, por período, para o dia 8 de Julho de 2008, obtidos com o Excel	75
Quadro 5.13 - Alturas de água iniciais e finais para cada período, para o dia 8 de Julho de 2008, dadas pelo Excel	76
Quadro 5.14 - Factores de utilização global de cada bomba, para o dia 8 de Julho de 2008, segundo os cálculos em Excel	76
Quadro 5.15 - Alturas de água, nos instantes iniciais e finais de cada período, obtidas após simulação da rede com o Epanet, para o dia 8 de Julho de 2008	76
Quadro 5.16 - Relatório de energia dado pelo Epanet para a simulação do dia 8 de Julho de 2008	77

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Alfabeto latino

C – concentração de cloro num dado instante t

C' - diferença de valor de concentração de cloro lido no ponto de leitura de jusante e o decaimento dado pela lei de decaimento de cloro no seio do escoamento

C_0 – concentração inicial de cloro

C_i – concentração de uma substância na água, na conduta i

C^i – valor médio da concentração de cloro à saída dos RNV durante a hora i

C_{aff} – concentração de cloro na água que entra no RNV

C_M – concentração de cloro no ponto de leitura de montante

C_{ref} – concentração de cloro de referência

C_{RNV} – concentração de cloro na água armazenada no RNV

C_s - fonte de concentração externa afluente ao nó k

C_T – concentração de cloro na água do reservatório no momento t

$Cap_{máx}$ – volume máximo de água armazenado no RNV

$Cap_{mín}$ – volume mínimo de água armazenado no RNV

$Cons^i$ – caudal consumido pela rede de distribuição durante a hora i

D – diâmetro da conduta

d – difusão molecular

E^i – energia consumida durante o incremento temporal de ordem i

e – número de Neper

F – função objectivo do modelo desenvolvido no Microsoft Excel

F_{obj} – função objectivo do programa principal

I_k – conjunto de condutas que fazem chegar água ao nó k

I_T – conjunto de condutas que fazem chegar água ao reservatório

K^{3B} - «peso» atribuído à parcela relativa à diferença de tempos, dados pelo programa em Matlab e pelo Excel, de operação simultânea de três bombas

K^{2B} - «peso» atribuído à parcela relativa à diferença de tempos, dados pelo programa em Matlab e pelo Excel, de operação simultânea de duas bombas

K^{1B} - «peso» atribuído à parcela relativa à diferença de tempos, dados pelo programa em Matlab e pelo Excel, de operação de uma bomba

K^{0B} - «peso» atribuído à parcela relativa à diferença de tempos, dados pelo programa em Matlab e pelo Excel, em que nenhuma bomba opera

k – nó genérico de uma rede de distribuição

k_b – constante de decaimento de uma espécie química por reacções no seio do escoamento

k_f – coeficiente de transferência de massa

k_w – constante de decaimento de uma espécie química por reacções nas paredes das tubagens

L^i – comprimento do segmento de recta representativo do traçado da função de controlo no incremento temporal de ordem i

L_j – comprimento total da conduta j

O_T – conjunto de condutas que recebem água do reservatório

p^i – custo unitário de energia associado ao incremento temporal de ordem i

Q_{aff} – caudal afluyente ao RNV

Q_{eff} – caudal efluente do RNV

Q_{elev} – função representativa do caudal elevado ao longo do tempo

Q_j – caudal escoado na conduta j

Q_s – caudal externo afluyente ao nó k

Q^{3B} – caudal elevado por três bombas a operar em paralelo

Q^{2B} – caudal elevado por duas bombas a operar em paralelo

Q^{1B} – caudal elevado por uma bomba

R – taxa de reacção de uma substância no escoamento

Re – número de Reynolds

R_H – raio hidráulico da conduta

Sc – número de Schmidt

Sh – número de Sherwood

t^{3B} – tempo de operação de três bombas em paralelo calculado pelo modelo em Excel

t^{2B} – tempo de operação de duas bombas em paralelo calculado pelo modelo em Excel

t^{1B} – tempo de operação de uma bomba calculado pelo modelo em Excel

t^{0B} – duração do intervalo de tempo, calculado pelo modelo em Excel, durante o qual nenhuma bomba está ligada

t^{3B}_{Matlab} – tempo de operação de três bombas em paralelo calculado pelo programa

t^{2B}_{Matlab} – tempo de operação de duas bombas em paralelo calculado pelo programa

t^{1B}_{Matlab} – tempo de operação de uma bomba calculado pelo programa

t^{0B}_{Matlab} – duração do intervalo de tempo, calculado pelo programa, durante o qual nenhuma bomba está ligada

U – velocidade média do escoamento

U_i – velocidade média do escoamento na conduta i

$V_{elev,acum}^i$ – volume elevado acumulado no final da hora i

$V_{cons,acum}^i$ – volume consumido acumulado no final da hora i

$V_{horário}^i$ – volume elevado durante a hora i

V_{RNV}^i – volume de água no RNV no final da hora i

$V_{RNV,inicial}^i$ – volume de água no RNV no início da hora i

V_{RNV} – volume de água contido no reservatório

$V_{RNV,inicial}$ – volume de água no RNV no início da simulação

V_T – volume de água no reservatório no instante t

w_C - «peso» da parcela «regularização da concentração de cloro à saída dos RNV's» na função objectivo

w_E - «peso» da parcela «custo com a energia eléctrica consumida» na função objectivo

w_L – «peso» da parcela «regularização do caudal elevado» na função objectivo

Alfabeto grego

ΔC^i – desvio absoluto da concentração média horária de cloro à saída dos RNV's, em relação ao valor de referência, verificada durante a hora i

Δt – duração do intervalo de tempo entre dois incrementos temporais

Δt^{3B} – diferença das durações do intervalo de tempo, durante o qual operam três bombas simultaneamente, dadas pelo programa em Matlab e pelo método desenvolvido em Excel

Δt^{2B} – diferença das durações do intervalo de tempo, durante o qual operam duas bombas simultaneamente, dadas pelo programa em Matlab e pelo método desenvolvido em Excel

Δt^{1B} – diferença das durações do intervalo de tempo, durante o qual opera uma bomba, dadas pelo programa em Matlab e pelo método desenvolvido em Excel

Δt^{0B} – diferença das durações do intervalo de tempo, durante o qual nenhuma bomba está ligada, dadas pelo programa em Matlab e pelo método desenvolvido em Excel

θ – factor de ponderação da integração numérica

ν – viscosidade cinemática da água

Abreviaturas

AdC – Águas do Cávado
AdP – Águas de Portugal
AT – Alta tensão
BT – Baixa tensão
BTE – Baixa tensão especial
BTN – Baixa tensão normal
CCB – Curva característica da bomba
CIE – Instalações consumidoras intensivas de energia
DBP – *Disinfection by-products*
DGS – Direcção-Geral da Saúde
DM – *Dinamic method*
DVM – *Discrete volume method*
EE – Estação elevatória
EPA – *United States Environmental Protection Agency*
EPAL – Empresa Pública das Águas Livres
ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
ETA – Estação de tratamento de água
FDM – *Finite difference method*
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GE – Grupo elevatório
L – Unidade de comprimento
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
M – Unidade de massa
MAOT – Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território
MAT – Muito alta tensão
MT – Média tensão
MVA – Mega Volt Ampère
OMS – Organização Mundial de Saúde
PCQA – Plano de Controlo da Qualidade da Água
PDR – Plano de Desenvolvimento Regional

PEAASAR – Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais

PNAEE – Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética

PRV – *Pressure reducing valve* [válvula redutora de pressão]

PSV – *Pressure sustaining valve* [válvula de alívio]

RNF – Reservatório de nível fixo

RNV – Reservatório de nível variável

SABESP – Companhia de Saneamento de São Paulo

SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

T – Unidade de tempo

TCV – *Throttle control valve* [válvula de borboleta]

TDM – *Time-driven method*

THM – Trihalometanos

UV – Radiação ultra-violeta

1

INTRODUÇÃO

Há já várias décadas que se estudam e aplicam modelos optimizadores às mais diversas áreas de actividade humana.

No sector dos sistemas de abastecimento de água, sendo muitas vezes o consumo de energia eléctrica das estações elevatórias o maior encargo financeiro das entidades gestoras destas infra-estruturas, vários investigadores têm-se ocupado com a formulação matemática do problema, procurando obter o modelo ideal de operação dos grupos elevatórios, isto é, a satisfação das necessidades dos consumidores de água conseguida com o menor custo para a empresa.

Os algoritmos optimizadores são elaborados, portanto, de forma a minorarem o custo energético decorrente do funcionamento das bombas determinando soluções exequíveis, leia-se cumpridoras do conjunto de limitações físicas e operacionais a que uma rede de distribuição de água está sujeita: são exemplos, respectivamente, a lei de conservação de massa e as pressões nos nós da rede.

Contudo, há um aspecto que a maior parte dos trabalhos debruçados sobre esta temática negligencia: a qualidade da água. De facto, é sabido que as características hidráulicas do escoamento, tais como velocidades e tempos de retenção no sistema, participam determinantemente na evolução da concentração de uma substância não conservativa contida na massa de água, de que o cloro usado para desinfecção, em grande parte dos sistemas de distribuição de água, é o principal exemplo.

Com este trabalho procurou-se, assim, incluir a problemática da qualidade da água num algoritmo optimizador da operação de uma estação elevatória. Para tal, foi complementado o trabalho realizado por Ana Costa (2009) onde se acrescentou, à função objectivo, uma parcela que reflecte a preocupação com aquele aspecto.

Foram utilizados, essencialmente, dois programas informáticos: o Matlab e o Epanet 2.0. O primeiro como base para a escrita do algoritmo optimizador e o segundo como simulador hidráulico para analisar o comportamento hidráulico do sistema estudado em relação às soluções propostas.

Por uma questão de oportunidade, o sistema de referência adoptado neste estudo foi o mesmo que Ana Costa (2009) usou e que consiste num trecho do Sistema Multimunicipal da Águas do Cávado, S.A. (AdC), nomeadamente o percurso desde a estação de tratamento de água (ETA) de Areias de Vilar até aos reservatórios de Adães.

Uma vez concluído, o programa foi aplicado a dois dias cujos consumos de água foram registados pela AdC. Pretendeu-se, desta forma, avaliar dois cenários distintos no que ao consumo de água diz respeito, pois um dia pertence ao Inverno - 8 de Janeiro de 2008 - e outro ao Verão - 8 de Julho de 2008.

No final, foram comparados os resultados obtidos através de processos diferentes: os primeiros dizem respeito aos resultados fornecidos pelo programa escrito em Matlab, nos quais se inclui a estimativa

dos valores horários da concentração de cloro à saída dos reservatórios decorrentes da aplicação da política operacional otimizada; os segundos são os que resultam da simulação hidráulica do sistema adutor no programa Epanet, uma vez escritas as regras que comandam o estado (ligado ou desligado) das várias bombas e que têm como objectivo a reprodução dos resultados determinados pelo programa em Matlab.

Em relação à transposição dos resultados apresentados pelo programa em Matlab para controlos com condições múltiplas do Epanet, descreve-se ainda, neste trabalho, o modo como se desenvolveu, com o Microsoft Excel, uma folha de cálculo que permite agilizar este processo.

2

OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1. BREVE CARACTERIZAÇÃO DO SECTOR DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM PORTUGAL

2.1.1. A ÁGUAS DE PORTUGAL, S.A.

A Águas de Portugal, S.A. (AdP), fundada no ano 1993, é um grupo empresarial do sector do ambiente encarregado de gerir as actividades relacionadas com o abastecimento de água, saneamento de águas residuais e tratamento e valorização de resíduos sólidos urbanos, intervindo, para o efeito, em todas as fases do ciclo urbano da água.

Com a sua criação pretendeu-se agregar numa só entidade as responsabilidades de gestão e exploração de sistemas que, até àquela data, eram de competência municipal, onde, por via das circunstâncias, muitas vezes se descurava uma visão estratégica global no planeamento das infra-estruturas.

A única excepção no panorama nacional, era, na altura, protagonizada pela EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres – que a partir de 1935 alargou a sua área geográfica de intervenção para o exterior do concelho de Lisboa e contava, em 1993, com mais dezoito concelhos abastecidos «em alta», para além daquele.

Até 1993, em virtude da Lei nº 46/77 de 8 de Julho – lei de delimitação de sectores – não era permitida a participação de empresas privadas, ou outras entidades do género, em determinados sectores de actividade económica, entre eles o do abastecimento de água e drenagem de águas residuais.

Dada «a necessidade de promover uma verdadeira indústria da água e do tratamento de resíduos sólidos», o Decreto-Lei nº 372/93 de 29 de Outubro alterou a mencionada lei de 1977 e veio abrir a possibilidade de aquelas empresas, em associação com entidades do sector público – desde que estas possuam, necessariamente, posição maioritária de capital na nova sociedade, - exercerem actividade no sector em regime de concessão outorgado pelo Estado.

Nesse mesmo ano, um novo Decreto-Lei, nº 379/93 de 5 de Novembro, criou a figura legal dos sistemas multimunicipais e estipulou as regras para a gestão e exploração dos sistemas multimunicipais e municipais de captação, tratamento e distribuição de água para consumo público; de recolha, tratamento e rejeição de efluentes; de recolha e tratamento de resíduos sólidos.

Este mesmo Decreto-Lei esclarece, da seguinte forma, as características pelas quais um determinado sistema é classificado como «municipal» ou «multimunicipal»:

- a) os sistemas multimunicipais são sistemas «em alta», «de importância estratégica, que abrangam a área de pelo menos dois municípios e exijam um investimento predominante do Estado»;
- b) os sistemas municipais são «todos os restantes, independentemente de a sua gestão poder ser municipal ou intermunicipal».

É agora oportuno citar o Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto para esclarecer o leitor menos familiarizado com a terminologia usada neste sector. Assim, de acordo com aquele documento, uma entidade gestora de um sistema de abastecimento público «em alta» é «a entidade responsável por um sistema destinado, no todo ou em parte, ao represamento, à captação, à elevação, ao tratamento, ao armazenamento e à adução de água para consumo público».

Por outro lado, uma empresa «em baixa» é a entidade «responsável por um sistema destinado, no todo ou em parte, ao armazenamento, à elevação e à distribuição de água para consumo público aos sistemas prediais, aos quais liga através de ramais de ligação».

Em 1995, como consequência do rumo traçado para o sector da Água pelo Decreto-Lei nº 379/93 de 5 de Novembro, foram criados quatro novos sistemas multimunicipais de abastecimento de água: Águas do Douro e Paiva, Águas do Cávado, Águas do Barlavento e Águas do Sotavento.

Graças ao novo enquadramento legal de 1993, em 1995 inicia-se a gestão e exploração, por parte de uma entidade privada, da captação, tratamento e distribuição de água no concelho de Mafra. O contrato de concessão estabelecido entre a Câmara Municipal e essa empresa, a 15 de Dezembro de 1994, caracterizou-se por ser o primeiro daquele género celebrado em Portugal.

2.1.2. O PEAASAR I E O PEAASAR II

No ano 2000, o Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território (MAOT) publicou o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais I (PEAASAR I). Este documento definiu os objectivos que o sector deveria atingir durante o período 2000-2006, o mesmo abrangido pelo III Quadro Comunitário de Apoio e pelo Plano de Desenvolvimento Regional (PDR). Entre esses objectivos, destacam-se:

- a) o cumprimento da legislação em vigor, tanto nacional como comunitária;
- b) o alcance dos níveis de atendimento de serviço de 95% e 90% para, respectivamente, o abastecimento de água potável e a drenagem e tratamento de águas residuais.

Estes objectivos deveriam ser atingidos através da seguinte estratégia:

- a) promoção de soluções integradas de carácter plurimunicipal, contemplando as particularidades das respectivas bacias hidrográficas e englobando a articulação das fases fundamentais do ciclo urbano da água, isto é, o abastecimento de água e a drenagem de águas residuais;

- b) promoção de iniciativas de gestão do tipo empresarial, de forma a assegurar a sustentabilidade dos sistemas pelo controlo e optimização dos investimentos realizados, bem como da geração de receitas adequadas à exploração e manutenção das infra-estruturas.

Sendo elaborado com especial enfoque para o fomento da articulação dos vários sistemas «em alta», nesse contexto surgiram 15 novos sistemas multimunicipais de abastecimento de água e/ou saneamento. Criadas por Decreto-Lei, estas novas empresas são constituídas maioritariamente por capitais públicos, com a AdP na posição de accionista maioritário.

No ano 2006, em virtude de todos os investimentos realizados, estimava-se que 91% da população beneficiaria de abastecimento público de água, enquanto somente 66% seria abrangida por redes de drenagem e tratamento de águas residuais.

Actualmente, e durante o período 2007-2013, vigora a segunda versão do PEAASAR – o PEAASAR II. Neste novo documento evidenciam-se os seguintes objectivos estratégicos:

- a) universalidade, continuidade e qualidade do serviço;
- b) sustentabilidade do sector;
- c) protecção dos valores de saúde pública e ambientais.

Em 2013, chegado ao fim o período de vigência do plano, espera-se que 95% da população portuguesa seja servida por sistemas públicos de abastecimento de água e 90% por sistemas de recolha e tratamento de águas residuais.

2.2. CONSUMO DE ENERGIA ELÉCTRICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

Para que um determinado volume de água se desloque de um ponto situado a uma dada cota até outro a uma cota superior, é necessário que o escoamento possua energia suficiente para vencer as forças que se opõem ao movimento ascendente dessa massa de água.

Nessas situações, na impossibilidade de se contar com a acção da gravidade como agente promotor do movimento desejado, é então imprescindível o recurso a equipamentos capazes de transmitir ao fluido a energia mecânica necessária.

Esses equipamentos, as bombas hidráulicas, têm a capacidade de transformar a energia eléctrica em energia mecânica, transmitindo-a, por sua vez, ao escoamento, e são fundamentais em qualquer sistema de abastecimento de água.

As estações elevatórias são infra-estruturas dos sistemas de abastecimento de água que alojam um conjunto de dispositivos encarregados de fazer chegar água aos pontos do sistema localizados a cotas mais elevadas.

Dado o grau de dependência destes equipamentos face à energia eléctrica para accionamento dos respectivos motores, estas infra-estruturas constituem-se, muito frequentemente, como as maiores responsáveis pelos gastos energéticos de uma empresa de abastecimento de água. Segundo alguns autores, podem mesmo representar 90% dos encargos com a energia eléctrica.

Para melhor ilustrar a realidade portuguesa, a empresa Águas do Douro e Paiva, S.A. contabiliza 85% do consumo de energia eléctrica como decorrente da operação da ETA de Lever e das estações elevatórias Lever Jusante, Lever Montante, Jovim e Ponte da Bateira.

Tomando o Brasil como cenário de referência, e segundo dados do PROCEL SANEAR (2005) - Programa Nacional de Conservação de Energia Eléctrica -, 49% do consumo de energia do sector industrial é atribuído a motores eléctricos, sendo 2,3% desse valor da responsabilidade do sector de saneamento básico.

A Companhia de Saneamento de São Paulo (SABESP) é a empresa que mais energia consome em todo o Estado de São Paulo, com um valor de referência de cerca de 3% de toda a energia facturada naquele Estado. Analisando mais detalhadamente as componentes do consumo, constata-se que 90% do valor referido resulta da operação dos grupos electrobomba, 7,5% de encargos com serviços auxiliares e os restantes 2,5% de despesas com a iluminação.

Desde as últimas três décadas, e graças, em grande parte, aos apelos da comunidade científica, as sociedades dos países mais desenvolvidos têm-se consciencializado da importância de consumir recursos naturais de forma racional e sustentável.

Hoje em dia estão reunidas todas as condições para que os órgãos com competências legislativas e de regulação adoptem medidas orientadoras que suscitem práticas ambientalmente responsáveis.

O Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (2008-2015) (PNAEE), lançado pelo Ministério da Economia e Inovação, é disso um bom exemplo. Este plano contempla, entre outras, a meta de atingir, no ano 2020, o valor de 31% de energia eléctrica produzida através de fontes renováveis.

O Decreto-Lei nº 71/2008 de 15 de Abril regula uma das medidas previstas no PNAEE – o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE).

Como muitas estações elevatórias atingem um consumo, por ano, superior a 500 toneladas equivalentes de petróleo, são consideradas, em virtude do exposto no Decreto-Lei nº 71/2008, instalações Consumidoras Intensivas de Energia (CIE). A estas, o referido Decreto-Lei estabelece medidas que fomentam a monitorização dos seus consumos e a sua eficiência energética.

2.3. ESTRATÉGIAS DE REDUÇÃO DOS CUSTOS COM A ENERGIA ELÉCTRICA

Existem três grandes campos de actuação quando se pretende reduzir os encargos com a energia eléctrica numa estação elevatória, classificados por Tsutiya (2001) *apud* Filho (2006):

a) Redução do custo sem diminuição do consumo de energia eléctrica:

Estas medidas podem ainda ser agrupadas em dois conjuntos diferentes, isto é, nas que não carecem de investimento e naquelas cujo investimento é necessário.

Como exemplo de medidas do primeiro caso, podem citar-se a alteração da potência contratada pela empresa e a alteração do tarifário negociado com o fornecedor de energia. Estas medidas, fruto da sua natureza, são também designadas por acções administrativas.

As acções operacionais, comportando já investimento, podem englobar, por exemplo, a melhoria do factor de carga¹ ou, ainda, a mudança da tensão de alimentação da estação elevatória.

1 – O factor de carga expressa a relação entre a energia consumida, durante um dado período, e a energia consumida na hipótese de, durante o mesmo intervalo de tempo, se utilizar continuamente a carga máxima.

b) Redução do custo pela diminuição do consumo de energia eléctrica:

Estas medidas podem consistir na redução da altura manométrica da instalação, através da diminuição das perdas de carga. Se após o estudo do diâmetro mais económico para a conduta de impulsão se constatar que o resultado não se aproxima do diâmetro existente, então é possível que se consiga reduzir a altura manométrica das bombas pela mitigação da perda de carga contínua do escoamento em virtude da substituição da conduta por uma de diâmetro mais favorável.

O controlo das fugas de água, quer no sistema adutor quer na própria rede de distribuição, pode também revelar-se uma medida eficaz na minoração da energia eléctrica consumida na consequência de os volumes elevados passarem a ser inferiores.

Uma outra possibilidade é a mudança dos grupos elevatórios por equipamentos energeticamente mais eficientes.

c) Redução do custo pela alteração da política operacional:

É possível atingir uma maior economia se se mantiverem os grupos elevatórios ligados durante intervalos de tempo estritamente imprescindíveis nos períodos tarifários em que o preço da energia eléctrica por kW.h é mais elevado.

Um outro artifício interessante é o recurso a variadores de frequência nos grupos electrobomba que possibilitam um melhor ajuste entre caudal elevado e consumo de água pela rede.

De entre todas as possibilidades atrás citadas, este trabalho dedica-se a estudar «regras» de operação dos grupos elevatórios, pelo que as metodologias propostas podem ser consideradas como medidas operacionais que procuram a redução do custo associado ao consumo de energia eléctrica.

2.4. A QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.4.1. O ENQUADRAMENTO LEGAL

Actualmente, o documento que sustenta o regime de qualidade da água destinada ao consumo humano em Portugal é o Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto.

Este diploma resultou da necessidade de rever o Decreto-Lei nº 243/2001 de 5 de Setembro e de suprir as lacunas que este evidenciava no ajuste para norma jurídica interna da Directiva nº 98/83/CE do Conselho de 3 de Novembro.

Os principais aspectos revistos relacionaram-se com a frequência de amostragem das zonas de abastecimento com volumes médios diários inferiores a 100 m³. Foram igualmente introduzidos novos parâmetros de controlo de qualidade para atender às especificidades das características da água em algumas zonas do país, tais como elevada dureza ou florescências de cianobactérias.

Apesar da necessidade de actualização sentida, um diploma anterior ao de 2001 – o Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de Agosto – havia já clarificado as obrigações das entidades gestoras de sistemas públicos de abastecimento de água que constituem, ainda hoje, o cerne do corrente quadro legal português.

No início de cada ano civil, as entidades gestoras devem possuir um Plano de Controlo da Qualidade da Água (PCQA) aprovado pela autoridade competente - a Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, I.P. (ERSAR, I.P.) – e cumpri-lo na íntegra, comunicando à autoridade eventuais alterações realizadas face ao estabelecido.

As entidades gestoras são obrigadas a divulgar, com periodicidade mínima trimestral, os resultados analíticos decorrentes da prática do PCQA, caso sejam empresas «em baixa». As empresas «em alta» devem, com a mesma regularidade, apresentar junto das empresas «em baixa» e por ponto de entrega, dados analíticos obtidos pela execução do PCQA.

A qualidade da água destinada a consumo humano é aferida pela análise, em laboratórios de ensaios classificados como aptos pela ERSAR, I.P., de parâmetros microbiológicos, parâmetros químicos e parâmetros indicadores e seus respectivos valores paramétricos, isto é, valores máximos ou mínimos fixados para cada um dos parâmetros a controlar.

2.4.2. O USO DE CLORO COMO DESINFECTANTE

No já mencionado Decreto-Lei nº 306/2007, no nº 2 do artigo 8º, pode ler-se que «compete às entidades gestoras garantir que a água destinada ao consumo humano seja salubre, limpa e desejavelmente equilibrada.» Na alínea a) do mesmo número pormenoriza-se que a água não deve conter «nenhum microrganismo, parasita ou substância em quantidade ou concentração que possa constituir um perigo potencial para a saúde humana».

Apesar do exposto, o regulamento não estabelece a obrigatoriedade de desinfecção da água. Na verdade, o nº 3 do artigo 9º abre a possibilidade às entidades gestoras de se verem dispensadas pela autoridade da saúde – o delegado regional de saúde ou a própria DGS, consoante a dimensão do sistema - da aplicação deste tratamento, desde que «demonstrem não terem tido incumprimentos aos parâmetros microbiológicos sem recurso à desinfecção».

Estes casos excepcionais não abundam, pelo que uma das etapas fundamentais do processo de tratamento de água para consumo humano é a sua desinfecção. Para o efeito existem métodos físicos e métodos químicos.

Os primeiros abrangem tanto a «popular» fervura da água como a sofisticada aplicação de radiação ultra-violeta (UV) para aniquilar microrganismos prejudiciais à saúde humana.

O método UV, para que seja eficiente, deve ser aplicado a camadas de água de diminuta espessura (entre 50 mm e 80 mm), fazendo-se sentir a obrigatoriedade de instalação de vários dispositivos para que se possam debitar maiores volumes de água tratada. Não obstante a eficácia do método, este torna-se bastante dispendioso. Para além desta contrariedade, a radiação UV não produz efeito residual - isto é, o seu efeito é instantâneo, não persistindo ao longo do sistema de distribuição de água.

Como exemplo de um método químico pode referir-se a adição de ozono à água. Esta substância instável, de acordo com Valente Neves, é produzida no próprio local de aplicação fazendo uma corrente de ar atravessar dois eléctrodos. Tem a vantagem de não originar, no decurso das reacções que protagoniza com outros constituintes da água, produtos nocivos à saúde humana. Contudo, tal como a radiação UV, não é capaz de gerar efeitos residuais e, principalmente, é uma solução bastante mais onerosa do que uma à base de cloro. Segundo Valente Neves, a instalação de um sistema de desinfecção com ozono é dez vezes mais cara do que um com cloro; acrescendo, ainda, o preço da obtenção de uma quantidade de ozono ser quatro vezes o que se paga pela mesma quantidade de cloro.

Precisamente, um dos desinfectantes químicos mais utilizados é o cloro. Para além da desinfecção, é ainda adoptado como oxidante – agente promotor de alterações nas características da água (cheiro ou sabor) pela oxidação dos compostos nela existentes.

O modo como é utilizado varia e pode ser sob a forma de cloro gasoso (em grandes instalações), hipoclorito de sódio (em pequenas instalações) ou hipoclorito de cálcio.

De acordo com Sheila (1994), a partir de 1902, e ao contrário da prática até então usual de somente se aplicar cloro no tratamento de água quando surgiam surtos epidémicos, a Bélgica principiou o uso sistematizado de cloração para o tratamento de água destinada ao consumo humano.

A referida autora, no seu trabalho, evoca a evolução dos processos de cloração apresentados por Rossin (1987):

- a) 1908 a 1918: dá-se o início da cloração da água com a aplicação de baixas quantidades de cloro;
- b) 1918 a 1928: aumento considerável do uso de cloro líquido no tratamento da água;
- c) 1928 a 1938: inicia-se a aplicação de amónia juntamente com o cloro. Com este procedimento pretendia-se provocar a formação de cloraminas que possuem propriedades desinfectantes e efeito residual;
- d) 1948 a 1958: aperfeiçoamento do uso da cloração com a determinação das formas de cloro combinado e cloro livre.

O seu modo de anular o malefício dos agentes patogénicos presentes no meio aquoso deve-se à destruição de uma enzima (triosefosfato di-hidrogenase) essencial ao metabolismo desses microrganismos por intervir na oxidação da glicose.

A eficácia da cloração não depende exclusivamente da concentração com que o produto é adicionado à água. De facto: o tempo de contacto; as características físico-químicas, a temperatura e o pH da água; o tipo e concentração de microrganismos; e a forma como o cloro se apresenta, são variáveis que determinam a eficácia da desinfecção da água por este método. Um ambiente aquoso com um pH baixo e temperatura elevada potenciam a acção neutralizante do cloro.

Alternativamente ao cloro, outras substâncias foram utilizadas ao longo dos anos, mesmo que algumas apenas esporadicamente e em escala não muito alargada, para produzir o mesmo efeito. Entre elas, destacam-se o iodo, a prata e o permanganato de potássio. No entanto, os efeitos adversos na saúde pública e/ou o elevado custo favoreceram a escolha do cloro.

Na realidade, esta substância é amplamente adoptada em virtude de várias características enumeradas por vários autores como vantajosas, nomeadamente:

- a) a eficácia na eliminação de agentes perniciosos para a saúde humana;
- b) o seu efeito residual;
- c) a oxidação de substâncias causadoras de cor, sabor e odor que tornam o seu uso menos «apelativo» ao consumidor;
- d) o seu custo razoável quando comparado com as alternativas químicas e físicas.

Apesar de todos os aspectos positivos, o cloro não é o desinfectante que se possa considerar ideal: ao reagir com a matéria orgânica do meio aquoso, como acontece com o ácido húmico e o ácido fúlvico, formam-se produtos secundários – em língua inglesa nomeados *disinfection by-products* (DBP). Nesta gama de produtos encontra-se a classe dos trihalometanos (THM) que se crêem despoletadores de doenças cancerígenas. São exemplos destas substâncias o clorofórmio (CHCl_3), o bromodiclorometano (CHBrCl_2), o dibromoclorometano (CHBr_2Cl) e o bromofórmio (CHBr_3). Por essa razão, o Decreto-Lei nº 306/2007 para além de fixar em 100 $\mu\text{g/l}$ o valor paramétrico para o total de THM presentes na água, sustenta ainda que «devem ser adoptadas todas as medidas necessárias para reduzir, tanto quanto possível, a concentração de THM na água destinada ao consumo humano».

Entre vários factores, a quantidade de cloro adicionada à água influencia a formação de THM. Quanto mais elevada for, mais potenciada é a sua formação. Outro aspecto relacionado com o cloro e a origem de THM é a forma em que aquele se encontra em solução: as formas de cloro livre – molecular (Cl_2), ácido hipocloroso (HOCl) e ião hipoclorito (OCl^-) – favorecem mais o aparecimento de THM do que as formas de cloro combinado – as cloraminas.

O cloro combinado é o cloro existente na água sob a forma de cloraminas. A monocloramina (NH_2Cl) e dicloramina (NH_2Cl_2) pertencem a esse grupo e são substâncias formadas pela reacção do cloro com amónia ou nitrogénio orgânico.

Embora o cloro combinado seja um desinfectante menos eficaz que o cloro livre, a sua formação é por vezes provocada pela adição conjunta de cloro e amónia porque o seu efeito residual faz-se sentir por maiores períodos de tempo.

Assim, sempre que se utiliza o termo «cloro residual» está, na realidade, a referir-se a quantidade de cloro elementar presente na água sob a forma de cloro livre e combinado.

Quanto a valores considerados aceitáveis, a Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda que a concentração de cloro na água potável se situe entre 0,20 mg/l e 0,50 mg/l.

Por outro lado, a legislação nacional sobre esta matéria, contida no Decreto-Lei nº 306/2007, e ao contrário do que acontece para uma série de parâmetros químicos e parâmetros indicadores, não define nenhum valor paramétrico, mas antes recomenda que os valores de concentração de cloro residual se situem dentro da gama [0,20; 0,60] mg/l.

Para se determinar qual a dosagem ideal de cloro a adicionar a uma massa de água é imprescindível, antes de mais, conhecer com algum rigor a sucessão de reacções químicas suscitadas pela introdução daquela substância no meio aquoso.

Quando o cloro é inicialmente adicionado à massa de água, uma grande porção da sua quantidade é imediatamente consumida nas reacções com compostos orgânicos e substâncias redutoras minerais.

Dito isto, é plausível que a dosagem de cloro seja tal que acautele a perda nestas reacções iniciais (ramo A da curva da figura 2.1). Caso assim seja, passa-se à segunda «etapa» de reacções: dá-se a formação de cloraminas (ramo B da curva da figura 2.1). Consumada a formação de cloraminas, o cloro residual atinge a concentração máxima e, a partir desse momento, com a oxidação das cloraminas, verifica-se o decréscimo da concentração de cloro residual (ramo C da curva da figura 2.1). À concentração mínima atingida no decurso desta fase atribui-se a designação *break-point*, que o autor se sente tentado a traduzir como «ponto de viragem» por representar, efectivamente, uma mudança de comportamento na curva representativa da evolução da concentração de cloro residual: a partir do momento em que o «sistema» ultrapassa este ponto, qualquer adição de cloro contribui instantaneamente para o acréscimo de concentração de cloro residual na componente livre – constituída por ácido hipocloroso e ião hipoclorito (ramo D da curva da figura 2.1).

Desta forma pode-se compreender a razão pela qual, hoje em dia, a metodologia de cloração ao *break-point* é a mais utilizada.

Atente-se na figura 2.1 que pretende ilustrar as várias etapas do fenómeno acabadas de descrever.

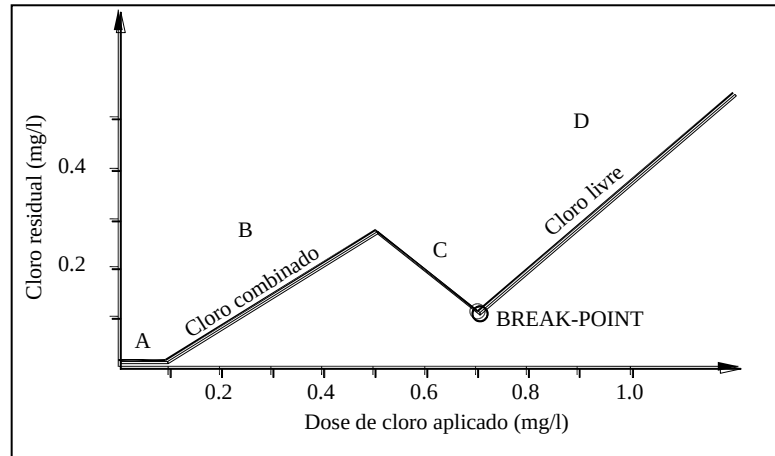


Figura 2.1 - Curva representativa da evolução da concentração de cloro residual em função da dose de cloro aplicada à água. Fonte: Valente Neves.

2.4.3. MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA

Na modelação da qualidade da água ao longo de um sistema de distribuição é prática corrente admitir a mistura instantânea e completa nos nós da rede e supor o movimento unidireccional sem dispersão longitudinal.

A formulação matemática do problema assenta em duas equações fundamentais: a equação de transporte e a equação de conservação de massa.

A primeira é usada para determinar a concentração de uma substância num ponto de uma dada conduta para um determinado instante.

A segunda pode assumir duas formas diferentes em consequência de reflectir a condição de fronteira imposta por um nó ou por um reservatório de nível variável.

A equação unidimensional de transporte e difusão pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -U_i \cdot \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} + d \cdot \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2} + R[C_i(x,t)] \quad (2.1)$$

Nesta equação, as variáveis intervenientes têm o seguinte significado:

$C_i(x, t)$ – concentração da substância na água na conduta i e à distância x para o instante t ;

U_i – velocidade média do escoamento na conduta i ;

$d \cdot \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2}$ – parcela representativa da dispersão longitudinal da substância na conduta;

d – difusão molecular da substância não conservativa na água;

$R[C_i(x, t)]$ - taxa de reacção da substância no escoamento.

Regra geral - salvo situações de condutas longas onde a água circule a baixas velocidades - a parcela da dispersão longitudinal pode ser desprezada sem grande prejuízo da bondade da representação do fenómeno.

O mesmo não se pode aplicar à última parcela, que reflecte um conjunto de reacções da substância no seio do escoamento e nas paredes da tubagem.

A expressão ilustrativa dessas interacções, para uma reacção cinética de primeira ordem, é:

$$R[C_i(x, t)] = k_b \cdot C_i(x, t) + \frac{k_w \cdot k_f}{R_H \cdot (k_w + k_f)} \cdot C_i(x, t) \quad (2.2)$$

Em que:

k_b – é a constante de decaimento da substância na massa do escoamento (T^{-1});

$C_i(x, t)$ – adquire o mesmo significado que na expressão anterior;

k_w – é a constante de decaimento da substância na parede da tubagem ($L T^{-1}$);

k_f – é o coeficiente de transferência de massa ($L T^{-1}$);

R_H – é o raio hidráulico da conduta i (L).

A equação fronteira interposta pela existência de um nó genérico k na rede, supondo que ocorre mistura total e instantânea da substância no seu interior, é dada por uma equação de conservação de massa com a seguinte configuração:

$$C_i|_{x=0} = \frac{\sum_{j \in \{I_k\}} Q_j \cdot C_j|_{x=L_j} + Q_s \cdot C_s}{\sum_{j \in \{I_k\}} Q_j + Q_s} \quad (2.3)$$

Onde:

i – é a conduta que recebe o caudal do nó k ;

C_i – é a concentração da substância na conduta i ;

I_k – representa o conjunto de condutas que fazem chegar água ao nó k ;

L_j – é o comprimento total da conduta j ;

Q_j – é o caudal na conduta j ;

Q_s – é o caudal externo afluente a k ;

C_s – é a fonte de concentração externa afluente a k .

Se, em vez de um nó, o escoamento se deparar com um reservatório, então uma outra equação deve ser aplicada, continuando a admitir-se a mistura completa:

$$\frac{\partial(V_T \cdot C_T)}{\partial t} = \sum_{i \in \{I_T\}} Q_i \cdot C_i|_{x=L_i} - \sum_{j \in \{O_T\}} Q_j \cdot C_T + R(C_T) \quad (2.4)$$

Sendo:

V_T – o volume de água no reservatório para o instante t ;

C_T – a concentração de cloro na água do reservatório no momento t ;

I_T – o conjunto de condutas que fazem chegar água ao reservatório;

O_T – o conjunto de condutas que recebem água do reservatório.

Sabendo quais as equações que regem a evolução da qualidade da água numa rede, é oportuno abordar os vários métodos de resolução das expressões apresentadas.

Em primeiro lugar, deve ser estabelecido qual o tipo de análise a efectuar: se estática ou dinâmica.

Numa análise estática, a solução que se obtém é representativa dos valores das características hidráulicas nesse instante.

Ao invés, uma simulação dinâmica constitui-se como uma sucessão de simulações levadas a cabo sempre que se verifique alguma alteração nos valores das condições fronteira.

Alguns autores (Coelho *et al.*, 2006) desaconselham o uso da designação «simulação dinâmica», sugerindo o emprego de «simulação em período alargado» por, na realidade, aqueles cálculos serem aplicados a uma série de regimes permanentes, afirmando-se portanto, na sua essência, como simulações estáticas.

Dado reproduzirem mais fielmente a evolução de uma substância ao longo de uma rede, as simulações em período alargado assumem maior preponderância em estudos deste género.

Os modelos que permitem uma análise alargada no tempo podem ser classificados espacialmente por modelos Eulerianos e modelos Lagrangeanos.

Os modelos Eulerianos começam por segmentar as condutas em vários volumes de controlo cujos extremos são os pontos de estudo a cada incremento do passo de cálculo.

Alternativamente, os Lagrangeanos estudam a evolução da concentração em pequenos volumes de água (volumes de controlo) ao longo do seu percurso na rede.

Alguns dos métodos numéricos adoptados para a resolução de modelos Eulerianos são: o Método das Diferenças Finitas – *Finite Difference Method* (FDM) – o Método de Volume Discreto – *Discrete Volume Method* (DVM) – e o Método Dinâmico – *Dinamic Method* (DM).

Nos modelos Lagrangeanos, os métodos numéricos aplicados podem ser controlados pelo tempo – *time-driven* – ou controlados por eventos – *event-driven*. Para o primeiro caso, o sistema é «actualizado» a intervalos de tempo fixos. No segundo, isso apenas acontece quando um evento, por exemplo a chegada ao nó de jusante da conduta de uma nova parcela de água, se concretizar.

Relativamente ao desempenho de cada um deles, Sá Marques e Oliveira Sousa (2008) fazem uma síntese comparativa e concluem, nomeadamente, que os métodos Lagrangeanos são mais eficientes quanto ao tempo de execução e uso da memória do computador. Sugerem, ainda, a utilização do método Lagrangeano *Time-Driven Method* (TDM) para a avaliação da idade da água em grandes redes de distribuição.

Por último, refere-se que é precisamente o método Lagrangeano TDM o usado pelo Epanet nas suas simulações da qualidade da água.

2.4.4. OS FENÓMENOS DE DECAIMENTO DE CLORO

Depois de aplicado na ETA, o cloro possui efeito residual, isto é, continua presente na água, exercendo a sua função desinfectante ao longo do percurso da rede de distribuição.

Contudo, no decurso de um vasto conjunto de reacções químicas que se estabelecem entre o cloro e as substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água, a concentração daquela substância decresce ao longo do tempo – fenómeno correntemente designado por «decaimento do cloro».

Consequentemente, para que a água chegue ao consumidor final com uma concentração de cloro tal que viabilize a desejada acção desinfectante, por vezes as entidades gestoras dos sistemas de distribuição de água vêm-se na necessidade de instalar, em pontos estrategicamente seleccionados da rede, estações de recloragem.

O decaimento desta substância dá-se pela ocorrência de reacções que constituem duas parcelas de naturezas distintas: o decaimento de cloro no seio do escoamento e o decaimento na interface com os elementos físicos do sistema, tais como as paredes de tubagens e reservatórios.

As reacções com a matéria orgânica e inorgânica presente no meio aquoso são as que compõem o primeiro grupo.

Para além destas, o cloro reage ainda com o próprio material da conduta, com o biofilme aderente à sua superfície e/ou com os produtos de corrosão (casos de condutas metálicas) e, ainda, com sedimentos acumulados em secções de baixa velocidade. Estes eventos enquadram-se no lote de fenómenos ocorridos na interface física dos componentes do sistema.

A expressão (2.2) consiste na modelação destes eventos através de uma lei cinética de reacção de primeira ordem. De acordo com esta abordagem, a velocidade de reacção é proporcional à concentração de cloro (Coelho *et al.*, 2006).

Nela, é visível o uso da constante cinética k_b associada à parcela respeitante às reacções no seio do escoamento. O seu valor, por sua vez, é estimado através de ensaios laboratoriais de simples concretização.

Em Coelho *et al.* (2006) vem descrito o procedimento de cinco passos que culmina com a obtenção da grandeza daquela constante:

- a) Preparação de um grande volume de água fortificada pela mistura de água da rede com um reagente de cloro;

- b) Divisão desta mistura por vários frascos de vidro escuro do tipo Winkler completamente cheios e hermeticamente fechados. Estes frascos foram submetidos a uma preparação prévia de modo a eliminar a carência de cloro do material;
- c) Manutenção dos frascos a uma temperatura constante;
- d) Ao fim de intervalos de tempo pré-determinados, abertura de um frasco e determinação da concentração do cloro residual;
- e) Representação gráfica dos valores da concentração de cloro em função do tempo.

Conhecidos os valores de concentração ao longo do tempo, o valor de k_b é o que permite o melhor ajuste da expressão (2.5) aos resultados obtidos:

$$C = C_0 \cdot e^{k_b \cdot t} \quad (2.5)$$

Em que:

C – é a concentração de cloro num dado instante t [$M L^{-3}$];

C_0 – é a concentração inicial de cloro [$M L^{-3}$];

e – é o número de Neper;

k_b – é a constante cinética de decaimento do cloro [T^{-1}];

t – tempo decorrido desde o instante inicial (na realidade corresponde ao tempo de percurso) [T].

No outro grupo de reacções – na interface física – intervém igualmente uma constante. Ao contrário do que se passa com k_b , k_w dificilmente se pode estimar em laboratório devido, inclusivamente, à dependência do seu valor em relação ao material da tubagem. Assim sendo, e dado os sistemas serem compostos por tubagens de várias idades e materiais, torna-se inoportuno o custo para a sua determinação sob essas condições.

A alternativa consiste, em conhecida a lei de decaimento no seio da água, efectuar medições da concentração de cloro em troços criteriosamente seleccionados.

Para tal, é necessário identificar troços entre pontos de amostragem onde se verifique um tempo de percurso suficiente para permitir identificar o «efeito da parede» a partir da diferença entre as medições de cloro residual nas secções de montante e de jusante (Coelho *et al.*, 2006).

Se ao valor estimado pela lei cinética de decaimento no seio da massa de água se deduzir o valor efectivamente lido *in situ*, o diferencial obtido corresponderá, em princípio, ao valor de cloro decaído em resultado das reacções estabelecidas nas interfaces físicas.

Posteriormente ao tratamento dos dados, com aplicação da expressão (2.6) passa-se a obter uma estimativa da constante de decaimento do cloro na parede da tubagem, k_w :

$$C' = C_M \cdot e^{\left(\frac{k_w}{R_H} \cdot t\right)} \quad (2.6)$$

Onde:

C' – é a diferença entre o valor de concentração no ponto de leitura de jusante e o decaimento dado pela lei de decaimento no seio do escoamento [$M L^{-3}$];

C_M – é a concentração de cloro lida no ponto de leitura de montante [$M L^{-3}$];

k_w – é a constante de decaimento do cloro na parede do tubo [$L T^{-1}$];

R_H – é o raio hidráulico da tubagem [L];

t – tempo de percurso entre o ponto de montante e o de jusante [T].

No que à expressão (2.6) concerne, afigura-se oportuno acrescentar que, em virtude da intervenção do raio hidráulico como denominador na expressão, constata-se um decaimento nas paredes das condutas tanto maior quanto menores forem os diâmetros em causa pois, em escoamentos internos, o valor daquela grandeza corresponde a um quarto (1/4) do diâmetro do tubo.

Por último, falta mencionar o coeficiente de transferência de massa, k_f . A sua incorporação pretende ilustrar a realidade da «troca» de cloro entre o escoamento e a parede da conduta. Nesse sentido, tal como retrata a expressão (2.7), participam na definição da sua grandeza o diâmetro da conduta, a difusão molecular do cloro e, de forma a tomar em linha de conta a natureza do escoamento, recorre-se ao número adimensional de Sherwood:

$$k_f = \frac{Sh}{D} \quad (2.7)$$

Em que:

Sh – é o número de Sherwood [adimensional];

d – é a difusão molecular do cloro na água: $1,204 \times 10^{-9} m^2/s$ a $20^\circ C$;

D – é o diâmetro da conduta [m].

Por sua vez, o número de Sherwood, para escoamentos turbulentos (número de Reynolds superior a 4000) – caso geral em Hidráulica Urbana – assume a seguinte forma de cálculo:

$$Sh = 0,023 \cdot Re^{0,83} \cdot Sc^{0,333} \quad (2.8)$$

Sendo:

Re – o número de Reynolds, dado por $U \cdot D / \nu$ [adimensional];

Sc – o número de Schmidt, dado por ν / d [adimensional].

Substituindo (2.8) em (2.7), chega-se à seguinte expressão para cálculo de k_f :

$$k_f = 0,023 \cdot U^{0,83} \cdot D^{-0,17} \cdot \nu^{-0,497} \cdot d^{0,667} \quad (2.9)$$

Nesta expressão participam as seguintes grandezas:

U – velocidade média de escoamento da água [m/s];

D – diâmetro da conduta [m];

ν – viscosidade cinemática da água: $1,011 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;

d – difusão molecular do cloro na água: $1,204 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

2.5. REVISÃO DA LITERATURA

O estudo de técnicas que visam o aumento da eficiência da gestão de redes de abastecimento de água possui já alguns anos.

Segundo Filho (2006), o trabalho de Karmeli *et al.*, publicado em 1968, onde se desenvolvem técnicas de optimização de procedimentos neste tipo de sistemas, foi um dos primeiros nesta área.

Durante os anos seguintes, e até aos dias de hoje, a investigação tem procurado responder às necessidades de optimização quer de projectos de novos sistemas de abastecimento de água quer de práticas óptimas de gestão de redes já em exploração.

De acordo com Lansey e Mayes (1989), citado por Filho (2006), existe mais investigação na área do projecto de novas redes. Nesse domínio, privilegiam-se a definição do traçado da rede e o dimensionamento das respectivas condutas.

Uma das razões apontadas como contribuição relevante para que tal se tenha verificado baseia-se na constatação de que a maior parte do investimento realizado pelas entidades responsáveis pelos sistemas é direccionado para a expansão da rede e não para a procura da excelência de exploração daquilo que já se encontra em serviço.

Contudo, nos últimos anos, evidenciou-se uma maior atenção dada à investigação relacionada com a optimização da exploração das redes, nomeadamente no que ao consumo de energia eléctrica diz respeito. O aumento das tarifas e as crises energéticas vividas por alguns países conduziram à necessidade de definir políticas operacionais que permitam economizar os gastos das empresas com aquele recurso.

Ormsbee e Lansey (1994) recorreram a algoritmos genéticos multi-objectivo, procurando determinar quais as bombas que deveriam funcionar durante cada intervalo de tempo, minimizando os custos energéticos concomitantemente com a satisfação das restrições hidráulicas e físicas do sistema.

Neste trabalho, os autores realizam também um «apanhado» das metodologias que até então tinham sido aplicadas a estudos relacionados com a procura das políticas óptimas de operação de estações elevatórias, apontando as vantagens e desvantagens de cada uma.

Ormsbee *et al.* (1989), evocado em Albuquerque (2007), estudaram parte do sistema de distribuição de Washington, nos Estados Unidos da América, e chegaram, através de programação dinâmica, à trajectória óptima do nível de água no único reservatório de distribuição do sistema, assim como as regras de funcionamento das bombas adequadas à minimização do consumo energético. Desta forma, foram capazes de reduzir o custo anual com a energia eléctrica em 6,7% em relação ao estimado durante a fase de projecto.

León *et al.* (2000) *apud* Albuquerque (2007) lograram reduzir em 25% os custos de energia do sistema de abastecimento de água da cidade de Sevilha, tendo para tal recorrido a um algoritmo híbrido que permite gerir de forma mais conveniente o nível de água nos reservatórios.

Quando, em estações elevatórias, para além da minimização do custo com a energia eléctrica se tenta alcançar um modelo óptimo de operação que maximize, por exemplo, o tempo em que as bombas estão «paradas», entra-se no domínio da optimização multi-critério.

Foi exactamente com aqueles dois pressupostos que López-Ibáñez *et al.* (2005) desenvolveram o seu trabalho utilizando o Epanet como simulador hidráulico da rede e o algoritmo evolucionário multi-objectivo *Strenght Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA 2), Filho (2006).

Apesar de a eficiência económica procurada por todos estes trabalhos de investigação assentar no respeito por certas restrições dos sistemas, sendo os consumos da rede um exemplo, poucos são os que incorporam a avaliação da qualidade da água.

No trabalho de Goldman *et al.* (2000) foi desenvolvido um método que procura definir o melhor planeamento de operação das bombas de uma estação elevatória, com vista a obter os menores encargos com a energia eléctrica consumida, respeitando condicionantes de natureza operacional, hidráulica e de qualidade da água. A metodologia proposta utiliza o Epanet como simulador hidráulico e de qualidade da água em parceria com um programa de optimização de funções não-lineares, o GRG2 (Lasdon e Waren, 1986).

O problema foi modelado através da escrita de três funções objectivo: a primeira minimiza os desvios de concentração de uma determinada substância em relação a um dado valor estipulado; a segunda minimiza o tempo total de operação das bombas; por fim, a terceira minimiza os custos totais com a energia.

Os autores consideraram que o rendimento dos grupos elevatórios, assim como a tarifa de energia eléctrica, são constantes.

Neste estudo, a variável de controlo (independente) é o intervalo de tempo durante o qual uma determinada bomba está a funcionar. As variáveis de estado, que são funções implícitas da variável de controlo, são, para cada instante t : o caudal escoado em cada tubo; a pressão em cada nó da rede; o nível de água em cada reservatório do sistema; e a concentração da substância em estudo em cada tubagem.

O processo de busca da melhor forma de operar as bombas inicia-se quando o GRG2 calcula as variáveis de controlo para, de seguida, o Epanet proceder ao cálculo das variáveis de estado com base nos valores providenciados por esse código de optimização.

De forma a não «sobrecarregar» as funções objectivo com as restrições das variáveis de estado, os autores optaram pelo método Lagrangeano aumentado de penalidade, introduzindo, por essa via, as condicionantes como termos penalizadores nas funções objectivo.

Assim, quando por exemplo, numa iteração, o valor de pressão num nó da rede excede o valor máximo permitido, a função de penalidade «acorda» e faz aumentar o valor da função objectivo. Dessa forma, essa solução será futuramente preterida por uma em que não haja nenhum desrespeito pelos limites impostos, caminhando o processo de tentativa em tentativa até à solução óptima.

O modelo proposto foi aplicado a uma rede hipotética composta por 17 nós, 26 troços de tubagem, uma bomba, um reservatório de nível fixo (a montante da bomba) e um reservatório de nível variável.

No final, os autores alcançaram os objectivos propostos, mas os resultados obtidos dependem de um grande número de arranques e paragens dos grupos elevatórios, o que conduz à inviabilidade prática de implementação do modelo. Note-se que os autores não tiveram em consideração o desgaste dos equipamentos elevatórios e os custos de manutenção que dependem, em grande parte, do número de arranques das bombas.

3

O SISTEMA ADUTOR EM ESTUDO

3.1. A ÁGUAS DO CÁVADO, S.A.

3.1.1. O SISTEMA MULTIMUNICIPAL

A Águas do Cávado, S.A. (AdC), formada após a publicação em Diário da República do Decreto-Lei nº 102/95 de 19 de Maio, é a empresa pertencente ao Grupo Águas de Portugal, S.A., responsável pela gestão e exploração do sistema multimunicipal de captação, tratamento e adução de água aos seguintes concelhos: Barcelos, Esposende, Maia (parte norte da cidade), Póvoa de Varzim, Santo Tirso, Trofa, Vila do Conde e Vila Nova de Famalicão.

Recentemente, o Decreto-Lei nº 41/2010 de 29 de Abril criou o Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento do Noroeste e constituiu, ainda, a sociedade gestora Águas do Noroeste, S.A. como a empresa concessionária do sistema.

Esta nova sociedade resulta da fusão de três empresas do Grupo AdP: Águas do Cávado, S.A., Águas do Minho e Lima, S.A. e Águas do Ave, S.A.

A 4 de Junho de 2010 a Águas do Noroeste, S.A. iniciou as suas funções, actuando numa área de cerca de seis mil quilómetros quadrados, num conjunto de trinta e dois municípios.

O sistema multimunicipal a cargo da AdC, de acordo com os dados acessíveis na sua página de internet, é constituído pela ETA de Areias de Vilar, por 18 estações elevatórias, 4 reservatórios de regularização, 54 reservatórios de distribuição e aproximadamente 252 km de condutas.

Na figura 3.1 apresenta-se um mapa do sistema explorado pela AdC.



Figura 3.1 - Mapa do sistema multimunicipal a cargo da Águas do Cávado. Fonte: www.aguas-cavado.pt, 2010.

3.1.2. O CONSUMO DE ENERGIA ELÉCTRICA

De acordo com o apresentado por Ana Costa (2009), dados de 2007 referem que as 60 instalações consumidoras de energia eléctrica da empresa constituíam uma potência instalada de 15 768 MVA, responsáveis por um consumo de 26 840 846 kWh, traduzido numa factura de 1 477 997 €.

No cômputo geral, as infra-estruturas que mais «peso» acarretam para a empresa, em termos energéticos, são a ETA de Areias de Vilar e as estações elevatórias.

No quadro 3.1 discriminam-se as percentagens, do total consumido pela AdC, associadas à ETA e a cinco estações elevatórias do sistema. Constata-se que, em conjunto, essas seis unidades alcançam 97% do valor global de energia consumida.

Quadro 3.1 - Distribuição percentual do consumo energético da Águas do Cávado em 2007. Fonte: Ana Costa (2009).

Consumo energético da AdC em 2007		
Instalação		
Nome	Tipo	Valor (%)
Areias de Vilar	Estação elevatória	46
Areias de Vilar	ETA	24
Barradas	Estação elevatória	12
Casais	Estação elevatória	11
Laúndos	Estação elevatória	2
Bouro	Estação elevatória	2
Outros	Vários	3

Passando, agora, à prestação relativa à factura de energia, essas mesmas seis unidades abrangem 94% dos custos da empresa com esse recurso, sendo 73% resultado da exploração das cinco estações elevatórias referidas – quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Distribuição percentual dos custos de energia da Águas do Cávado em 2007. Fonte: Ana Costa (2009).

Custos energéticos da AdC em 2007		
Instalação		
Nome	Tipo	Valor (%)
Areias de Vilar	Estação elevatória	42,6
Areias de Vilar	ETA	22,9
Barradas	Estação elevatória	12,6
Casais	Estação elevatória	12,9
Laúndos	Estação elevatória	1,4
Bouro	Estação elevatória	1,6
Outros	Vários	5,9

A AdC tem já tradição na pesquisa continuada de práticas que promovam a diminuição do consumo através da eficiência energética, havendo implementado, em 2002, um plano de eficiência energética.

Em 2010, a AdC foi a primeira empresa portuguesa a receber o Prémio *GreenLight*, atribuído pela Comissão Europeia, em virtude da redução de 39,4% do consumo de energia eléctrica na iluminação exterior das instalações da ETA de Areias de Vilar.

No primeiro semestre do mesmo ano, a AdC aderiu voluntariamente ao *Motor Challenge Programme*. Com esta iniciativa da Comissão Europeia, a AdC compromete-se a melhorar a eficiência energética por via da prática de um plano de acção conducente à redução efectiva do consumo de energia, com especial enfoque nos equipamentos de accionamento das bombas.

3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ADUTORA ESTUDADA

Ana Costa (2009) aplicou o programa desenvolvido no seu trabalho a uma parte de uma adutora do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Baixo Cávado e Ave.

Para tal, recorreu ao ficheiro Epanet fornecido pela empresa contendo esse troço do sistema adutor modelado.

O aspecto geral da parte do sistema adutor em estudo modelado no Epanet representa-se na figura 3.2.

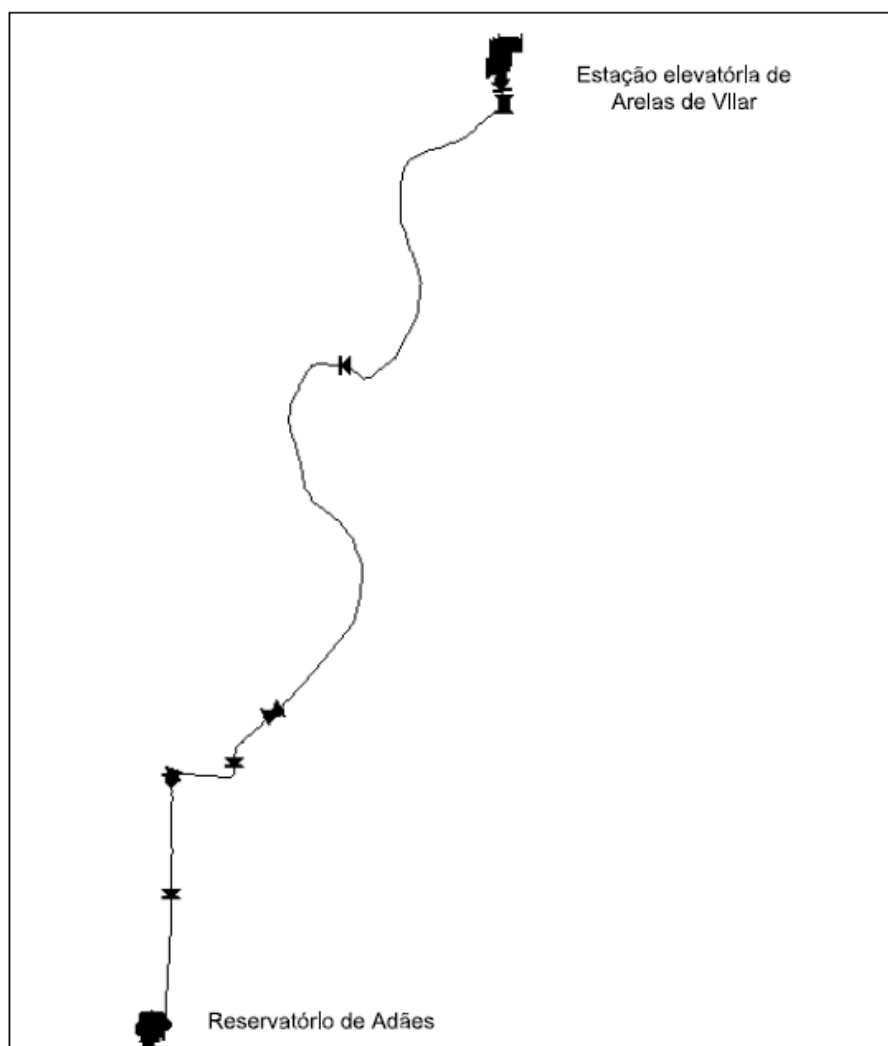


Figura 3.2 - Vista geral do sistema adutor modelado com o Epanet.

3.2.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

A estação de tratamento de água (ETA) de Areias de Vilar, cujo reservatório tem uma capacidade igual a 20 000 m³, é aqui representado por um reservatório de nível fixo (RNF) – figura 3.3.

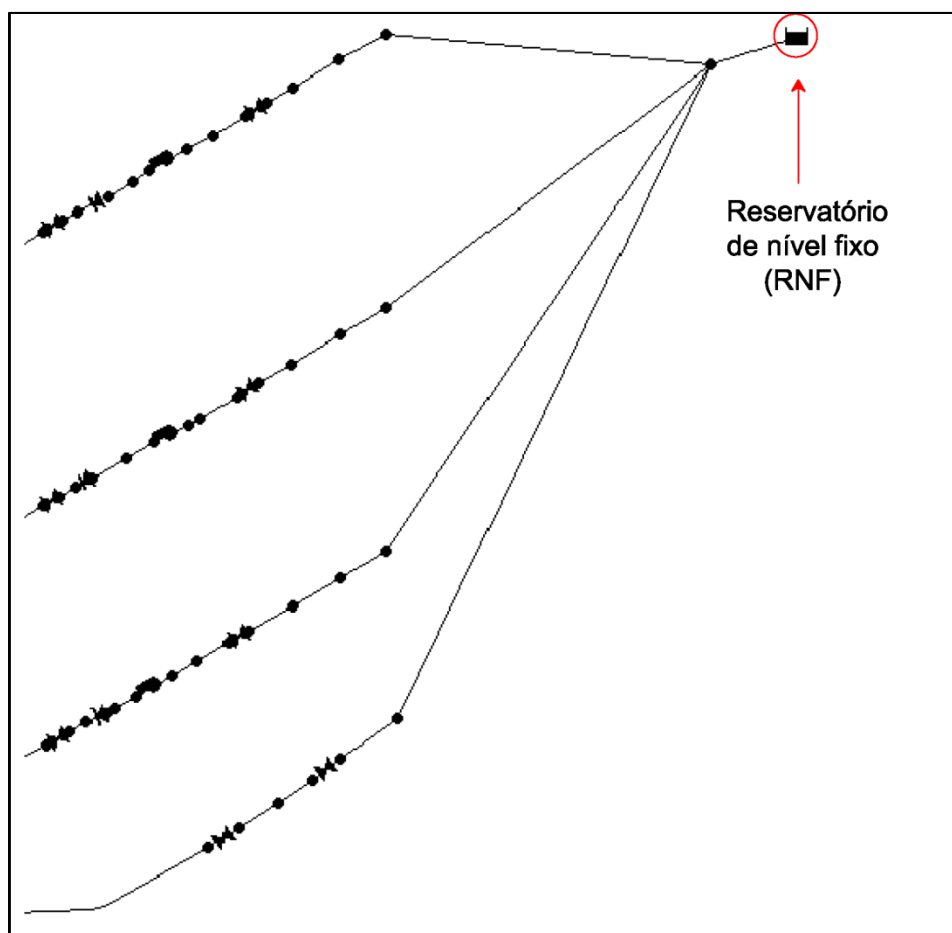


Figura 3.3 - Representação da ETA de Areias de Vilar no Epanet através de um reservatório de nível fixo.

3.2.2. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

A estação elevatória desta adutora comporta três bombas iguais, modelo 350-LNN-725, marca Worthington, dispostas de forma a operarem em paralelo.

Em funcionamento simultâneo, têm a capacidade de elevar um caudal de 2966 l/s com uma altura manométrica de 133 m.

No quadro 3.3 apresentam-se os vários caudais elevados e as respectivas alturas manométricas para cada combinação possível de funcionamento dos grupos electrobomba.

Quadro 3.3 - Caudais elevados, potências, alturas manométricas e rendimentos para as diversas combinações de operação dos GE's. Fonte: Ana Costa (2009).

Estado da bomba			Caudal elevado	Potência	Altura mano.	Rendimento
Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	(l/s)	(kW)	(m)	(%)
Desligado	Desligado	Desligado	0	0	0	0
Ligado	Desligado	Desligado	1038,7	1599	128,9	81,98
Ligado	Ligado	Desligado	2036,1	3180	130,8	81,98
Ligado	Ligado	Ligado	2966,3	4654	133,4	83,18

A curva característica das bombas definida no ficheiro Epanet da AdC com o sistema adutor modelado é a que se representa na figura 3.4.

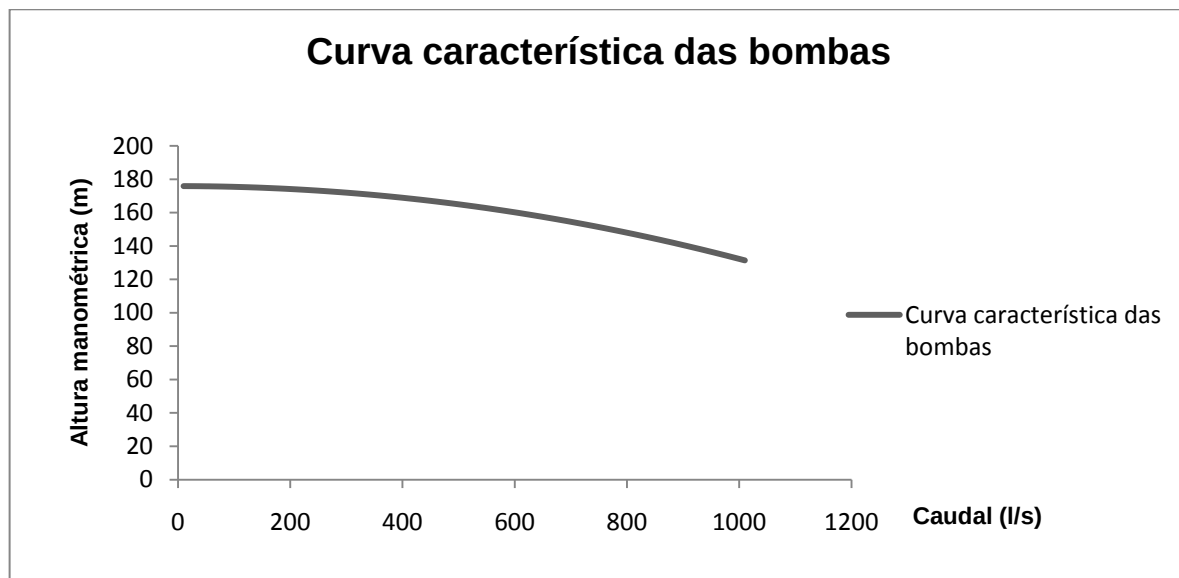


Figura 3.4 - Curva característica das bombas da estação elevatória.

Contudo, esse ficheiro não possuía qualquer curva de rendimento, pela que Ana Costa (2009) arbitrou a que se encontra representada na figura 3.5. Na falta de dados mais precisos, esta foi também a curva adoptada neste trabalho.

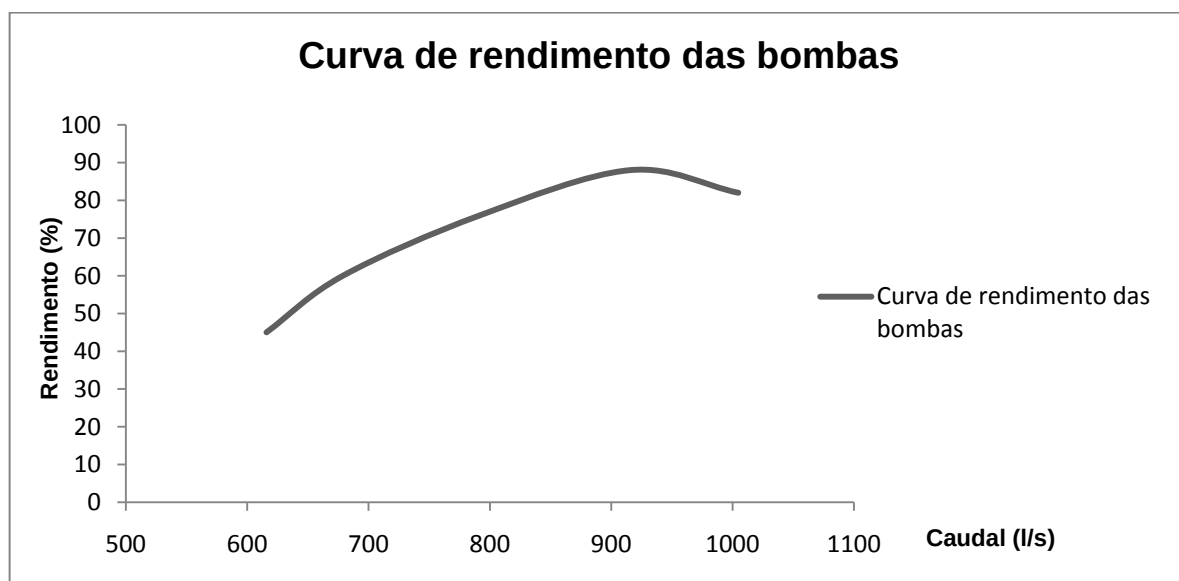


Figura 3.5 - Curva de rendimento das bombas da estação elevatória.

Na figura 3.6 é visível a forma como as bombas são consideradas na janela de edição do programa Epanet. Trata-se da representação de uma parte do sistema adutor estudado, mais precisamente da estação elevatória.

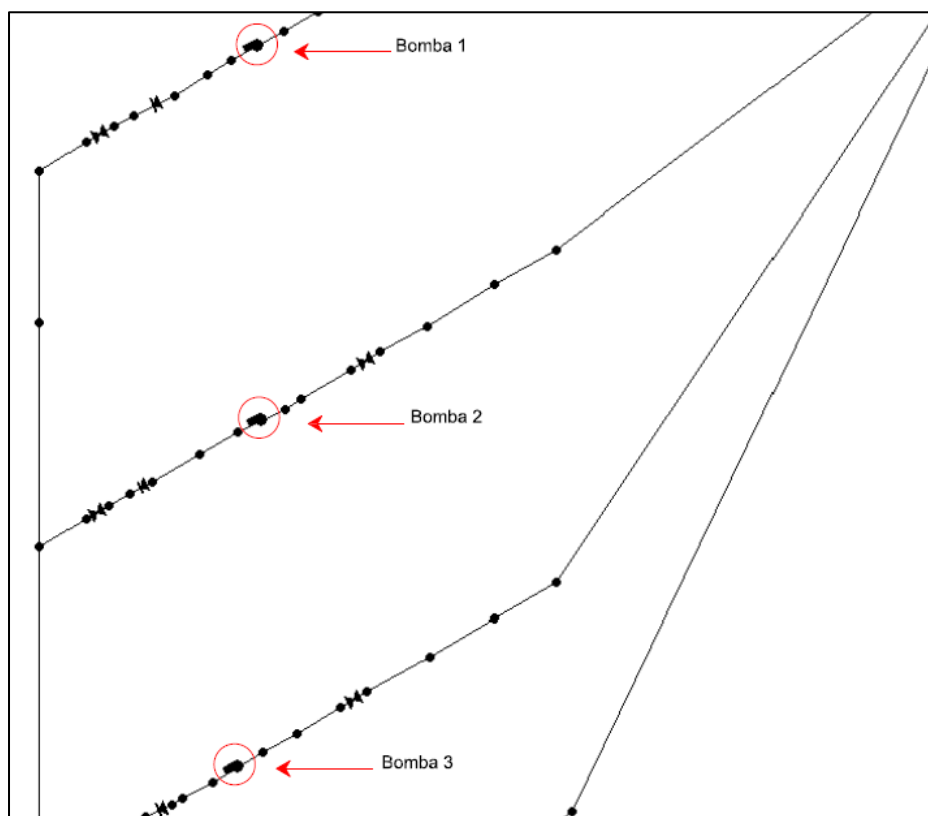


Figura 3.6 - Pormenor do modelo do sistema adutor em que se evidenciam as três bombas existentes.

3.2.3. ADUTORAS

As condutas que formam o sistema adutor são de ferro fundido dúctil e possuem diâmetros nominais que vão desde 100 mm até 1400 mm. No total, é atingida uma extensão de cerca de 3744 m de tubagens.

Na figura 3.7 visualiza-se um trecho da adutora que transporta água desde a ETA de Areias de Vilar até aos reservatórios de Adães.

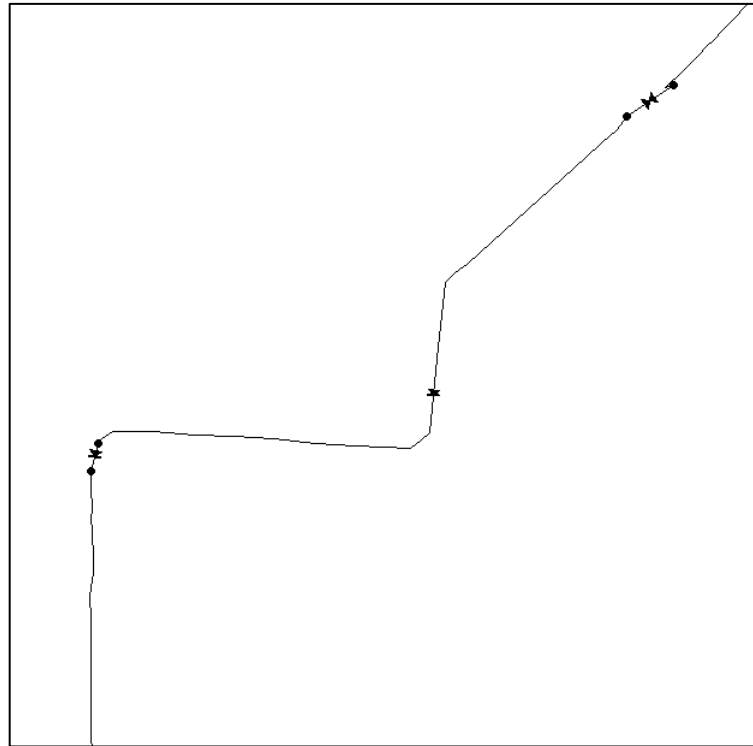


Figura 3.7 - Parte da adutora após modelação da rede no Epanet.

3.2.4. VÁLVULAS

O Epanet possibilita uma representação mais fiel da rede simulada ao dispor de um conjunto de válvulas. Neste caso particular, estão presentes na adutora os seguintes tipos: válvulas de controlo de perda de carga (*throttle control valve*, TCV); válvulas de retenção – para que o escoamento se processe apenas num sentido; válvulas de controlo da pressão a montante (*pressure sustaining valve*, PSV) e válvulas de controlo da pressão a jusante (*pressure reducing valve*, PRV).

Na figura 3.8 pode observar-se uma válvula de retenção disposta a jusante da bomba que na figura 3.6 se designou por «Bomba 1». Igualmente, pode verificar-se a existência de uma válvula de controlo de perda de carga a montante do equipamento que se nomeou «Bomba 2».

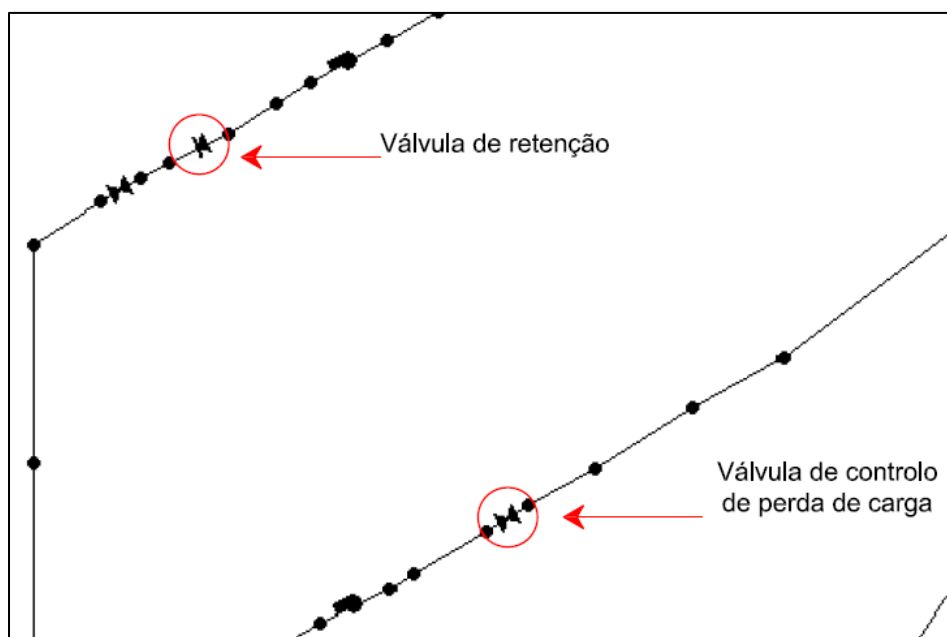


Figura 3.8 - Exemplo de dois tipos de válvulas instaladas no sistema.

3.2.5. RESERVATÓRIOS

Os reservatórios de Adães, de características sintetizadas no quadro 3.4, são modelados com a introdução de dois reservatórios de nível variável (RNV).

No entanto, de forma a facilitar os cálculos do programa, foi utilizado somente um reservatório cuja capacidade máxima é igual à soma das capacidades de cada um deles. Por esse raciocínio, atribuiu-se a esse reservatório a designação «reservatório equivalente». Consequentemente, quando daqui em diante se utilizar a designação «reservatório» no contexto do sistema adutor estudado, é a este reservatório equivalente que o autor se refere.

Quadro 3.4 - Características dos reservatórios de Adães. Fonte: Ana Costa (2009).

Reservatório	Díâmetro	Capacidade	Altura máxima de água	Cota (m)	
	(m)			Base	Pleno
RNV 1	25,4	2523,4	4,98	143,7	148,68
RNV 2	25,4	2523,4	4,98	143,7	148,68
RNV Equivalente	35,92	5046,8	4,98	143,7	148,68

A figura 3.9 é interessante porque esclarece a forma como os reservatórios e dispositivos complementares foram tratados para simular o sistema no Epanet.

Destaca-se também, na figura 3.9, o nó onde termina o sistema adutor modelado e ao qual estão associados os consumos da rede de distribuição.

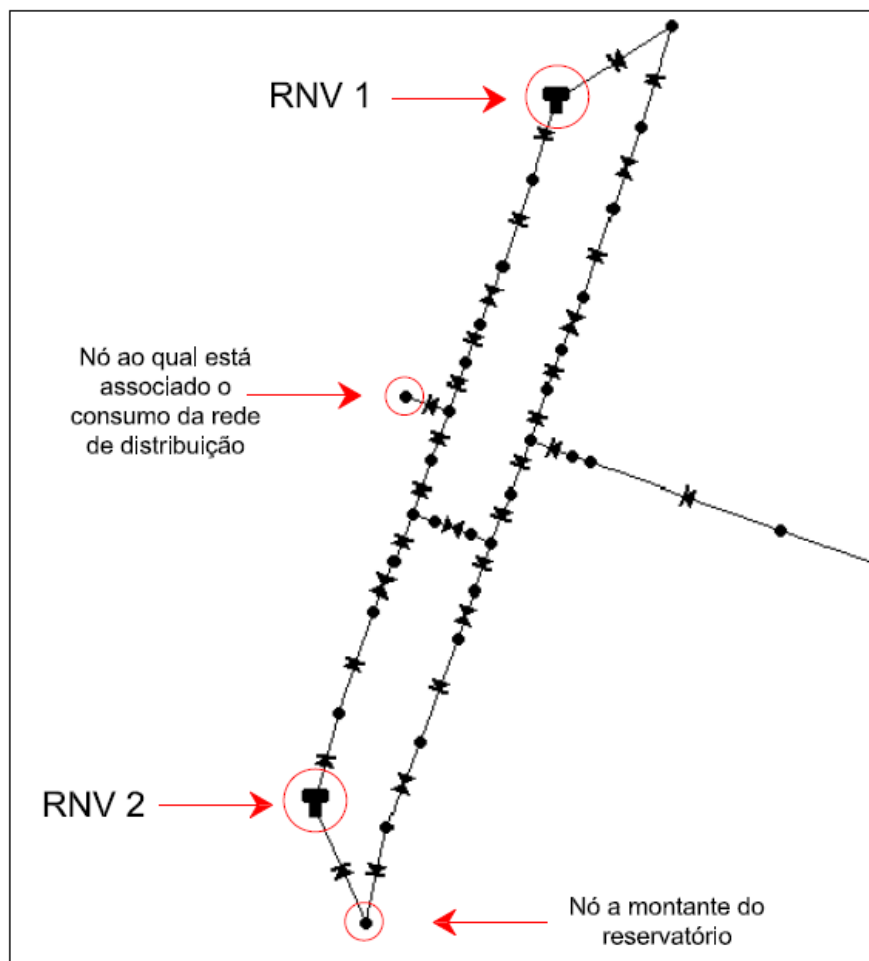


Figura 3.9 - Pormenor da modelação dos reservatórios do sistema adutor no Epanet.

3.3. PADRÃO HORÁRIO DE CONSUMO DE ÁGUA

Neste trabalho, por razões de coerência, serão usados os mesmos valores de consumo de água facultados pela AdC a Ana Costa para o desenvolvimento do seu trabalho.

Para a adutora em estudo a empresa efectua avaliações do caudal à saída dos reservatórios de Adões com uma periodicidade de dez minutos. Esses valores são estimados tendo em consideração os níveis de água no reservatório e os caudais de entrada nos mesmos, aferidos por caudalímetros.

Utilizando registos de dois dias do ano de 2008 – o dia 8 de Janeiro e o dia 8 de Julho – que contêm o consumo diário de cada um e as médias das leituras horárias de caudal, calcularam-se os factores horários de consumo, que resultam do quociente entre o caudal médio horário e o caudal médio diário.

As grandezas dos factores horários de consumo de água correspondentes a cada uma das vinte e quatro horas dos dias estudados constam das figuras 3.10 e 3.12. Os caudais horários médios consumidos encontram-se nas figuras 3.11 e 3.13.

Os factores horários de consumo são dados de entrada fundamentais no Epanet sempre que se pretende fazer uma simulação dinâmica de uma rede, isto é, uma simulação caracterizada pelo cálculo de soluções de equilíbrio hidráulico sempre que se registarem alterações, no tempo, dos valores das condições de fronteira do sistema.

Assim, sabendo que os consumos dos dias 8 de Janeiro e de 8 de Julho foram iguais, respectivamente, a 73 733 m³ e 92 192 m³, dividindo esses valores por 86 400 segundos (número de segundos de um dia), obtêm-se os respectivos valores de caudais médios diários: 0,853 m³/s e 1,067 m³/s.

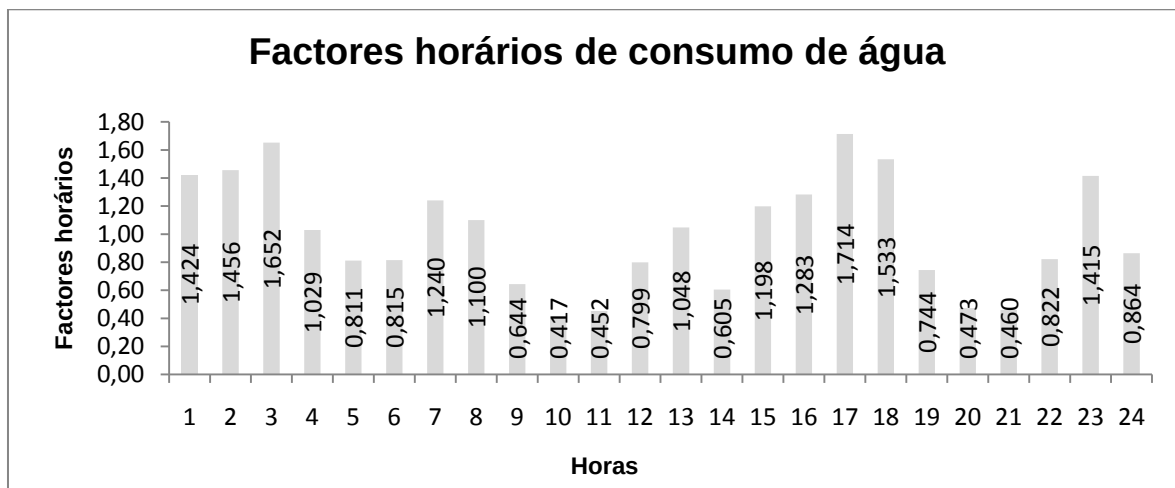


Figura 3.10 - Factores horários de consumo de água do dia 8 de Janeiro de 2008.

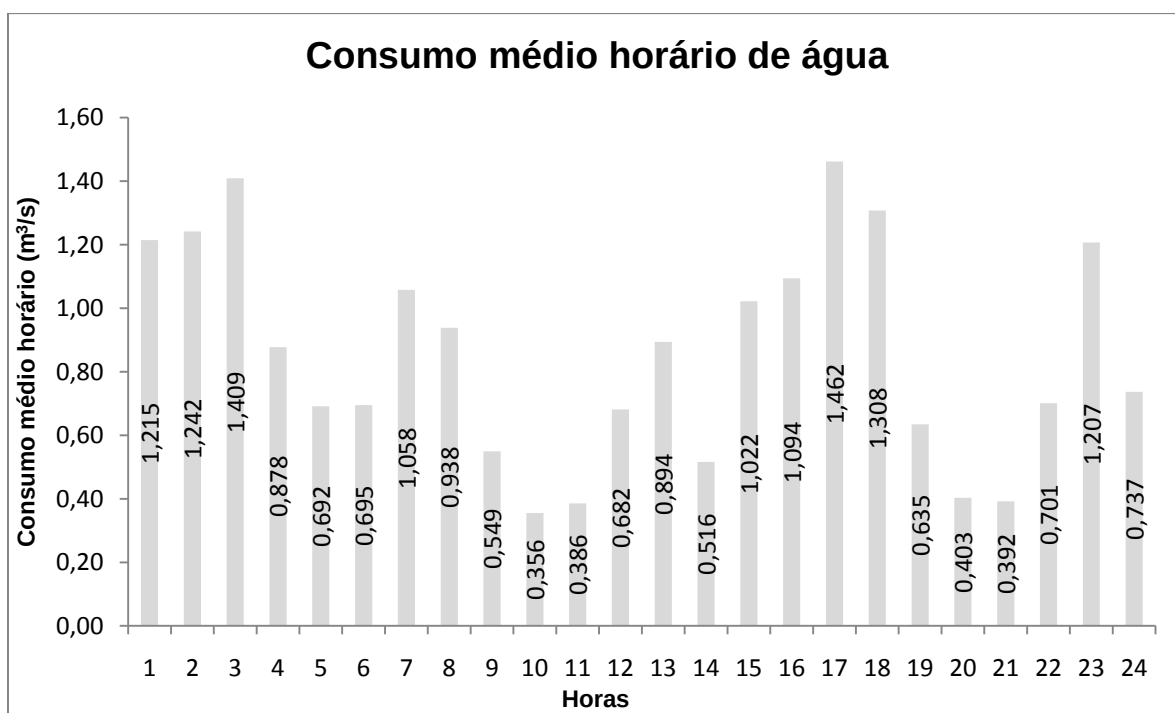


Figura 3.11 - Consumos médios horários de água pela rede de distribuição para o dia 8 de Janeiro de 2008.

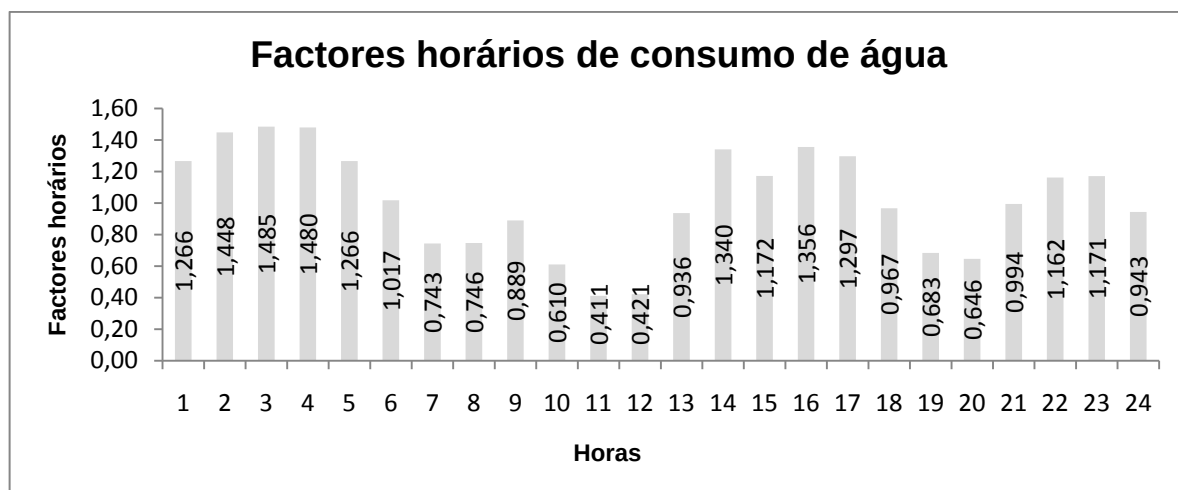


Figura 3.12 - Factores horários de consumo de água do dia 8 de Julho de 2008.

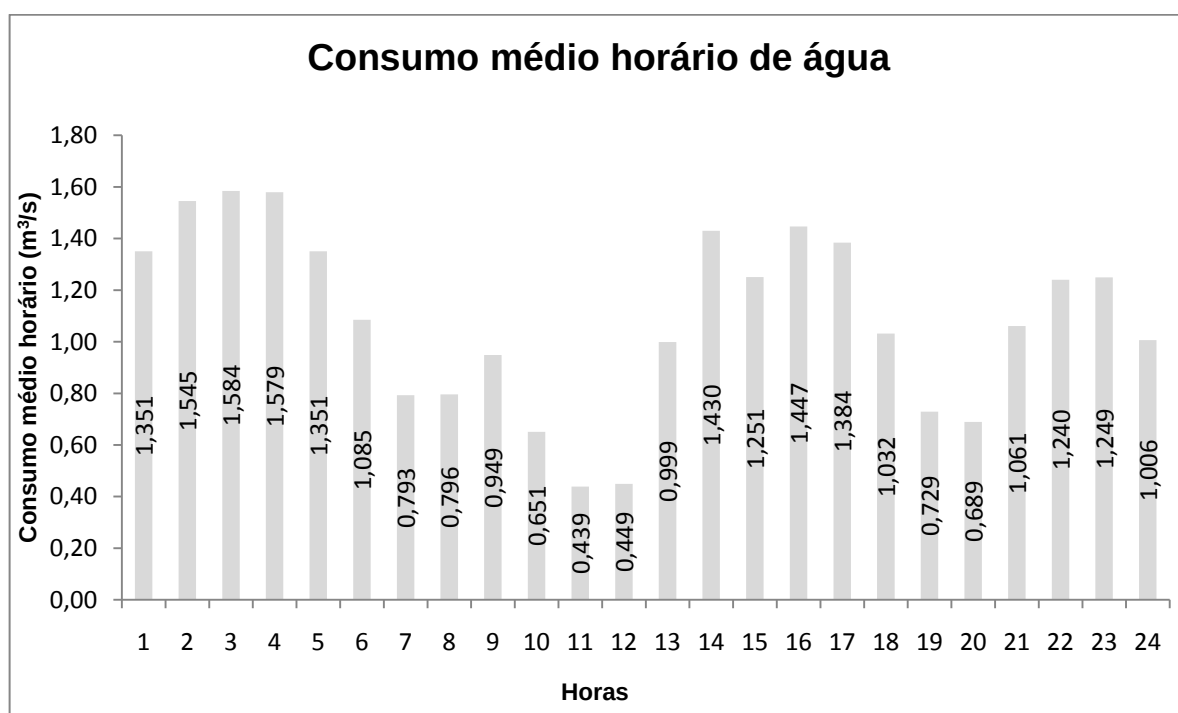


Figura 3.13 – Consumos médios horários de água pela rede de distribuição para o dia 8 de Julho de 2008.

3.4. PADRÃO HORÁRIO DA TARIFA ELÉCTRICA

A Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) é a entidade responsável pela fixação das tarifas de venda de energia eléctrica a clientes finais em Portugal Continental, Região Autónoma da Madeira e Região Autónoma dos Açores.

A ERSE tem em linha de conta o nível de tensão e tipo de fornecimento – muito alta tensão (MAT); alta tensão (AT); média tensão (MT); baixa tensão especial (BTE); baixa tensão normal (BTN) e baixa tensão (BT) - no momento de definir as tarifas para cada ano civil.

Esta entidade, na sua publicação *Regulamento Tarifário do Sector Eléctrico*, de Dezembro de 2009, no artigo 26º, estabelece os seguintes períodos tarifários: períodos trimestrais e períodos horários.

Os períodos trimestrais definidos são os seguintes:

- a) Período I: de 1 de Janeiro a 31 de Março;
- b) Período II: de 1 de Abril a 30 de Junho;
- c) Período III: de 1 de Julho a 30 de Setembro;
- d) Período IV: de 1 de Outubro a 31 de Dezembro.

Dentro destes quatro períodos, o tarifário de energia é ainda sujeito a uma estrutura horária, designadamente:

- a) Horas de ponta;
- b) Horas cheias;
- c) Horas de vazio normal;
- d) Horas de super vazio.

Em 15 de Dezembro de 2009 a ERSE publicou o documento *Tarifas e preços para a energia eléctrica e outros serviços em 2010*, onde, face ao ano de 2009, se regista um aumento médio de 2,9% em relação às tarifas aplicadas em Portugal Continental.

A AdC é consumidora de energia em AT, pelo que, de acordo com este último documento, está sujeita às tarifas, durante o ano 2010, expressas no Despacho nº 21/2009 da ERSE, evocadas no quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Tarifas aplicadas ao consumidor final de energia eléctrica em alta tensão durante o ano 2010 (ERSE, 2009a).

Tarifa de venda a clientes finais em Alta Tensão		
Tarifas de longas utilizações		
	Períodos I e IV	Períodos II e III
	(€/kW.h)	
Horas de ponta	0,0833	0,0834
Horas cheias	0,0653	0,0676
Horas de vazio normal	0,0449	0,0464
Horas de super vazio	0,0416	0,0431

Adoptando a mesma divisão em períodos tarifários horários utilizada por Ana Costa (2009) para os dias úteis de Inverno (períodos I e IV) e de Verão (períodos II e III) construíram-se, respectivamente,

os quadros 3.6 e 3.7. Repare-se que foi necessário fazer algumas alterações aos horários dos períodos porque, por exemplo, nos períodos trimestrais II e III o período de ponta inicia-se às 9h15m. Acontece que a definição dos factores de custo de energia eléctrica do Epanet tem precisão de uma hora. Assim, neste exemplo em particular, optou-se por considerar que o começo do período de ponta tem lugar às 9h em ponto.

Quadro 3.6 - Divisão horária da tarifa de energia eléctrica de um dia útil de Inverno para efeito de simulação no Epanet.

Períodos I e IV (Inverno)			
Hora			Preço
Período	Início	Fim	(€/kW.h)
1	00:00	02:00	0,0449
2	02:00	06:00	0,0416
3	06:00	07:00	0,0449
4	07:00	09:00	0,0653
5	09:00	12:00	0,0833
6	12:00	18:00	0,0653
7	18:00	21:00	0,0833
8	21:00	24:00	0,0653

Quadro 3.7 - Divisão horária da tarifa de energia eléctrica de um dia útil de Verão para efeito de simulação no Epanet.

Períodos II e III (Verão)			
Hora			Preço
Período	Início	Fim	(€/kW.h)
1	00:00	02:00	0,0464
2	02:00	06:00	0,0431
3	06:00	07:00	0,0464
4	07:00	09:00	0,0676
5	09:00	12:00	0,0834
6	12:00	24:00	0,0676

Os dados dos quadros 3.6 e 3.7 foram expandidos em intervalos de uma hora e representados nas figuras 3.14 e 3.15.

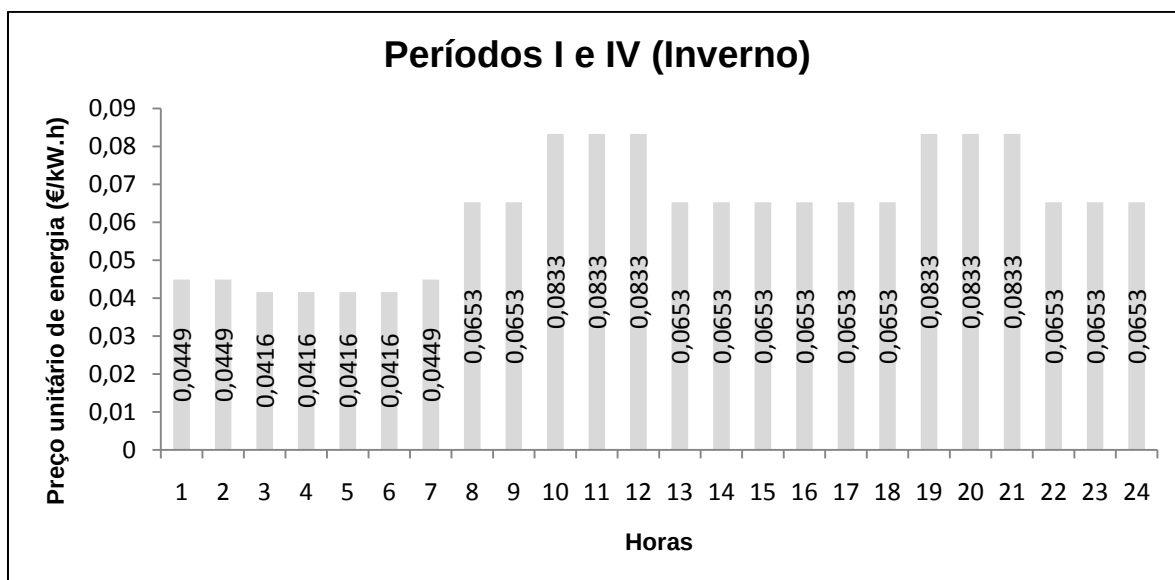


Figura 3.14 - Preços horários de energia eléctrica praticados nos Períodos I e IV, durante o ano 2010, para consumidores intensivos de energia eléctrica em alta tensão.

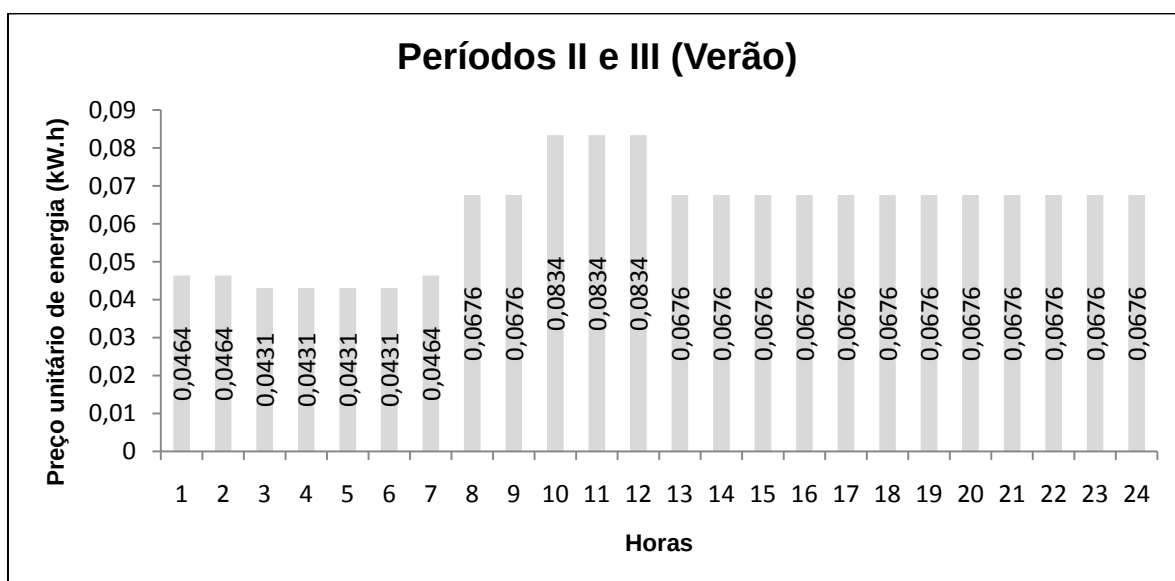


Figura 3.15 - Preços horários de energia eléctrica praticados nos Períodos II e III, durante o ano 2010, para consumidores intensivos de energia eléctrica em alta tensão.

4

DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO

4.1. A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Imagine-se o leitor como sendo o responsável pela operação de uma estação elevatória prestes a iniciar, às zero horas, o seu trabalho. Suponha-se detentor dos seguintes dados: média do consumo diário de água pela rede a jusante da EE, estimado para esse dia através dos volumes referentes ao dia em apreço observados em anos anteriores e que se encontram registados na base de dados da empresa; caudais bombados por cada combinação de grupos elevatórios e as respectivas alturas manométricas; potência de cada grupo electrobomba; capacidades mínimas e máximas dos reservatórios e suas alturas de água iniciais; factores horários de consumo de água pela rede a jusante dos reservatórios; e, finalmente, a estrutura tarifária desse dia, conjuntamente com os preços por kWh aplicáveis.

O leitor começará, mesmo que iniciado na tarefa, muito provavelmente, por procurar gerir os níveis de água nos reservatórios de forma a permitir-lhe ligar as bombas durante o menor intervalo de tempo no período tarifário em que a energia é mais cara – as designadas horas de ponta.

Mesmo que seja bem sucedido e chegue ao final do dia sem reclamações da parte dos consumidores queixando-se de falta de água, não deixará de se colocar, por exemplo, as seguintes questões: terá sido usada a conjugação ideal do número de bombas ligadas nos diversos períodos? O número de arranques dos grupos elevatórios foi adequado? A evolução temporal do nível de água nos reservatórios foi a ideal?

Terão sido, certamente, questões semelhantes a estas o ponto de partida de vários trabalhos de investigação sobre a política ideal de operação de estações elevatórias de água.

4.2. MINIMIZAÇÃO DO CUSTO COM A ENERGIA ELÉCTRICA

4.2.1. «O MÉTODO DO FIO TENSO (OU MÉTODO DE CONTI)»

O método do fio tenso ou método de Conti é utilizado em Hidrologia quando se pretende determinar a curva de máxima regularização possível do caudal turbinado para a capacidade de reserva de uma dada albufeira.

Num problema desse género procura-se, consoante a respectiva curva de caudais afluentes à secção em estudo, encontrar o regime que permita, ao longo do tempo, explorar a albufeira com o menor número de variações de caudal turbinado – daí o termo «máxima regularização».

Transpondo este método para os sistemas de abastecimento de água é interessante constatar a analogia que se pode estabelecer entre albufeira e reservatório.

Contudo, repare o leitor que enquanto em Hidrologia a variável independente é o caudal afluente a uma dada secção do rio, em Hidráulica Urbana essa mesma variável é o consumo da rede a jusante do reservatório.

Na figura 4.1 encontra-se a representação de duas curvas fundamentais quando se aplica o método do fio tenso, com os seus significados adaptados ao tipo de problema em consideração: a curva *A* representa a curva de volumes consumidos acumulados à qual foi adicionada a capacidade máxima do reservatório; a curva *B* ilustra a evolução dos volumes consumidos acumulados adicionados da capacidade mínima do reservatório. Com esta metodologia, sempre que para qualquer abcissa se calcular a diferença entre a respectiva ordenada da curva *A* e a respectiva ordenada da curva *B*, o resultado obtido é igual à capacidade de reserva do reservatório, isto é, a diferença entre o volume associado ao nível máximo de água no reservatório e o volume respeitante à altura mínima.

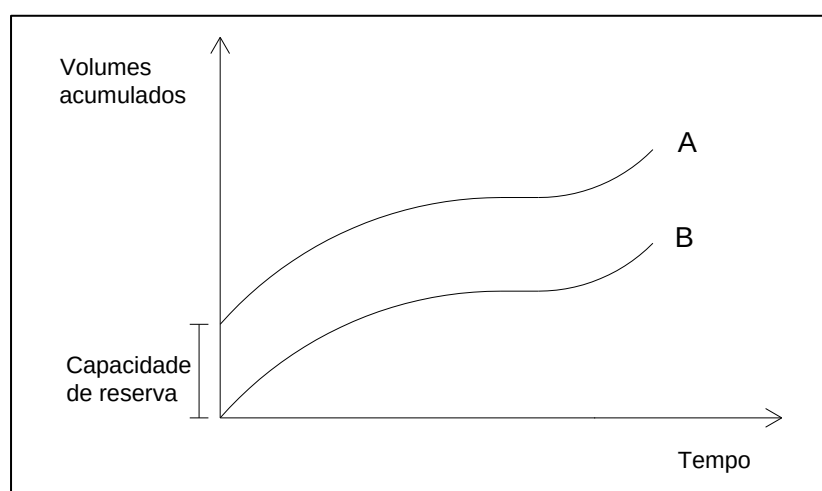


Figura 4.1 - Ilustração das curvas construídas para aplicação do «método do fio tenso».

Como neste sistema de eixos são representados volumes em função do tempo, se se traçar uma recta tangente num ponto qualquer de uma das curvas, o declive dessa recta corresponde ao caudal consumido nesse instante.

Recordando o significado de volume acumulado, pode-se dizer que, para um instante genérico, o seu valor representa o volume total de água afluente ao reservatório - «volume bombado acumulado» - ou o volume total de água efluente do reservatório - «volume consumido acumulado» - desde o início da contagem do tempo até esse momento.

Sabendo isso, ao pretender-se representar no mesmo sistema de eixos a curva dos volumes bombados acumulados adicionados do volume de água inicial no RNV, percebe-se que, nos limites, essa curva ou é coincidente com a curva *A* ou é coincidente com a curva *B*, não devendo, em nenhum caso, verificar-se uma transgressão ao espaço definido por essas duas curvas.

Em relação à primeira hipótese, caso isso acontecesse, significaria que nesse instante *i* a diferença entre o volume elevado acumulado e o volume consumido acumulado seria superior à diferença entre o volume máximo de água no reservatório e o volume inicial de água no reservatório, ou seja:

$$V_{elev,acum}^i - V_{cons,acum}^i > Cap_{m\acute{a}x} - V_{RNV,inicial} \quad (4.1)$$

Ora, analisando o segundo termo da inequação constata-se que de acordo com essa hipótese a água extravasaria o RNV porque ter-se-ia excedido a capacidade de armazenagem da infra-estrutura.

A eventual transgressão ao limite inferior, isto é, à curva *B*, implicaria a verificação da seguinte desigualdade:

$$V_{cons,acum}^i - V_{elev,acum}^i > V_{RNV,inicial} - Cap_{m\acute{i}n} \quad (4.2)$$

Nesta última situação observa-se que a diferença entre o consumo acumulado por parte da rede e o volume de água até esse instante elevado pelas bombas é superior ao volume útil de água no reservatório, o que necessariamente implica o desrespeito por um nível mínimo de água no RNV supostamente fixado pela entidade gestora com o intuito de o salvaguardar para situações de emergência ou consumos extraordinários.

O caudal elevado por um conjunto de bombas é, no mínimo, igual a zero. Por esta razão, outra regra a que deve obedecer a curva de volumes elevados acumulados prende-se a esta imposição que não permite que o valor do volume elevado acumulado para um dado instante seja inferior ao do instante predecessor. Quer isto dizer que, num caso extremo, o declive de uma tangente tirada a essa curva tem valor nulo.

O mesmo princípio aplica-se igualmente às curvas *A* e *B*, pois, naturalmente, não podem ser consumidos pela rede de distribuição caudais inferiores a zero.

Esclarecidos os pressupostos em que assenta a adopção do «método do fio tenso» em problemas de Hidráulica Urbana, percebe-se agora que esta metodologia pode ser útil na optimização da operação de uma estação elevatória ao contribuir para a pesquisa da política operacional em que o caudal bombado pelos grupos elevatórios seja o mais regular possível ao longo do tempo: a procura desse objectivo passa por tentar encontrar uma curva de volumes elevados acumulados cujas inclinações das diversas tangentes que se possam traçar sejam o mais semelhantes possível – isto é, como já se teve oportunidade de referir, o caudal elevado em cada instante.

4.2.2. VARIÁVEL DE CONTROLO E FUNÇÃO OBJECTIVO

Seguindo a proposta de Figueiredo e Martins (2007) *apud* Ana Costa (2009) para o modelo de controlo em problemas de optimização deste tipo, Ana Costa (2009) escreveu um algoritmo de optimização que procura minimizar o custo da energia consumida tentando, simultaneamente, manter o mais regular possível o volume de água elevado pelos GE's em cada hora.

A função objectivo utilizada, cujo valor interessa minimizar, tem a seguinte forma:

$$F_{obj} = w_L \sum_{i=1}^{24} L^i + w_E \sum_{i=1}^{24} E^i \cdot p^i \quad (4.3)$$

Na expressão (4.3) as variáveis participantes tomam os seguintes significados:

L^i - é o comprimento do segmento de recta representativo do traçado da função de controlo no incremento temporal de ordem i ;

E^i - é a energia consumida durante o incremento temporal de ordem i ;

p^i - corresponde ao custo unitário de energia associado a esse incremento temporal.

De forma que se possa obter uma solução com mais pendor para a regularização dos volumes elevados ou, alternativamente, para a minimização dos custos de energia, w_L e w_E são, respectivamente, os «pesos» atribuídos pelo utilizador a cada uma das parcelas envolvidas no cálculo do valor final da função objectivo. No limite, se se atribuir a um deles o valor zero significa que a correspondente parcela não é considerada no cálculo do valor de F_{obj} .

Para além do factor da regularidade de operação dos GE's é aconselhada, por alguns autores, a introdução da parcela L^i por esta evitar que o algoritmo convirja para uma solução correspondente a um mínimo local.

O leitor mais atento terá certamente reparado que o somatório de L^i corresponde ao comprimento da curva de regularização do «método do fio tenso». De facto, um dos compromissos do algoritmo prende-se com a regularidade do volume horário elevado, daí ter sido utilizado este método, pela sua simplicidade de cálculo, para desempenhar aquela função.

Tomando a figura 4.1 como referência, onde em abcissas se encontra o tempo e em ordenadas os volumes acumulados, uma vez desenhada num mesmo sistema de eixos a curva dos volumes elevados acumulados pela estação elevatória, obtém-se da seguinte forma o valor de L^i :

$$L^i = \sqrt{(V_{elev,acum}^i - V_{elev,acum}^{i-1})^2 + \Delta t^2} \quad (4.4)$$

A variável de controlo idealizada, isto é, a variável ponderada a cada iteração do algoritmo optimizador e que condiciona as outras variáveis envolvidas no problema, é o volume horário de água elevado pelos GE's.

No entanto, acabou por se utilizar, como variável de controlo, o volume elevado acumulado no final de cada incremento temporal, $V_{elev,acum}^i$, por esta formulação resultar num melhor desempenho por parte do algoritmo. O seu valor, calculado entre o instante inicial e o incremento temporal i , é dado pela expressão (4.5):

$$V_{elev,acum}^i = \int_0^i Q_{elev}(t) dt \quad (4.5)$$

Para além desta forma, é ainda possível obter os valores de $V_{elev,acum}^i$ através de:

$$V_{elev,acum}^i = V_{elev,acum}^{i-1} + V_{horário}^i \quad (4.6)$$

Na expressão (4.6), $V_{horário}^i$ diz respeito ao volume horário elevado durante o incremento temporal de ordem i .

Assim sendo, a expressão (4.4) pode escrever-se então da seguinte forma:

$$L^i = \sqrt{(V_{horário}^i)^2 + \Delta t^2} \quad (4.7)$$

Finalmente, ainda em relação à expressão (4.3), a energia consumida durante o incremento temporal i , E^i , resulta da soma das várias parcelas constituídas pelo produto da potência inerente a cada conjugação de funcionamento das bombas (ver quadro 3.3) pela respectiva duração do intervalo de tempo em que essa combinação de bombas «actua» nesse incremento temporal.

4.2.3. RESTRIÇÕES DO PROBLEMA

Naturalmente, é necessário definir restrições ao algoritmo para que as soluções propostas respeitem, desde logo, uma série de imposições.

De acordo com Ormsbee e Lansey (1994), os problemas relacionados com sistemas de abastecimento de água estão sujeitos a restrições que podem ser divididas em três grupos:

- a) limitações físicas dos sistemas: são exemplos as características das bombas; as capacidades de reservatórios ou as disponibilidades de água nas origens;
- b) leis físicas: a lei da conservação da massa; a lei da energia e a lei de resistência ao escoamento;
- c) condicionamentos externos: referem-se, a título de exemplo, os consumos de água pela rede de distribuição e as gamas de velocidades e pressões aceitáveis nos diversos pontos do sistema.

Neste caso particular, as limitações físicas do sistema adutor são compostas pelas capacidades dos reservatórios e caudais mínimos e máximos elevados pela estação elevatória.

Tirando partido do Epanet, o cumprimento das leis físicas que regem o fenómeno está desde logo incorporado no algoritmo.

Em relação aos condicionamentos externos assume-se que são satisfeitas as questões inerentes aos valores de velocidade e pressão admissíveis em todo o sistema. De facto, é plausível que assim seja, já que o diâmetro da adutora e o conjunto de válvulas dispostas ao longo do seu traçado constituem, desde a fase de projecto, a garantia de que, em condições normais, as grandezas daquelas variáveis de estado se situam dentro de intervalos de valores aceitáveis.

Voltando, então, às limitações físicas do sistema equacionadas no algoritmo, escreve-se a expressão (4.8) que representa a variação do volume de água num reservatório:

$$V_{RNV}^i = V_{RNV, inicial} + V_{elev, acum}^i - V_{cons, acum}^i \quad (4.8)$$

Onde:

V_{RNV}^i - é o volume de água no reservatório no final da hora i ;

$V_{RNV, inicial}$ - é o volume de água contido no reservatório no início da simulação, ou seja, no instante zero;

$V_{elev, acum}^i$ - é o volume elevado acumulado no final da hora i ;

$V_{cons, acum}^i$ - totaliza o consumo acumulado no final da hora i .

Por conseguinte, a expressão (4.8), fica sujeita às seguintes restrições:

$$Cap_{mín} \leq V_{RNV}^i \leq Cap_{máx} \quad (4.9)$$

Na expressão (4.9), $Cap_{mín}$ e $Cap_{máx}$ dizem respeito, pela mesma ordem, à capacidade mínima e capacidade máxima do reservatório.

Voltando ao «método do fio tenso», a curva de caudais elevados acumulados adicionada do volume inicial de água no reservatório não pode transpor, superiormente, a curva dos consumos acumulados adicionados da capacidade máxima do reservatório nem, inferiormente, a curva dos consumos acumulados adicionados da capacidade mínima. Relembra-se que caso isso acontecesse, na primeira situação, o nível de água no reservatório ultrapassaria o máximo e, no segundo, desceria abaixo do nível mínimo desejado.

Combinando as duas expressões anteriores chega-se à formulação dos impedimentos atrás expostos:

$$\begin{cases} V_{RNV, inicial} + V_{elev, acum}^i \geq Cap_{mín} + V_{cons, acum}^i \\ V_{RNV, inicial} + V_{elev, acum}^i \leq Cap_{máx} + V_{cons, acum}^i \end{cases} \quad (4.10) ; (4.11)$$

No algoritmo de Ana Costa (2009) foram ainda adoptadas restrições de igualdade. A razão por que foram incluídas deve-se à consciencialização de que, seguramente, uma das formas de conseguir otimizar o custo da energia passa por manter, se possível, as bombas desligadas no período tarifário de ponta. Para atingir esse fim, desde que os consumos de água por parte da rede não sejam demasiado elevados, é plausível que se no início dos períodos tarifários de ponta o nível de água estiver no máximo se consiga chegar ao final do período sem que o nível de água tenha desrespeitado o limite inferior.

Aprofundando este raciocínio entende-se que se no final do período de ponta o nível de água no reservatório for superior ao nível mínimo, durante esse intervalo de tempo os grupos elevatórios debitaram um caudal superior ao estritamente necessário para acautelar os consumos da rede.

Assim sendo, e considerando as duas ideias, interessa programar o algoritmo para a procura de soluções onde no início dos períodos tarifários de ponta o nível de água no RNV seja coincidente com o máximo e no final seja igual ao mínimo.

Outra restrição de igualdade impõe que o nível de água no final da simulação, isto é, quando se atingir o término da vigésima quarta hora, seja o mesmo do instante inicial. A razão indicada para esta restrição resulta de neste estudo se considerarem dias médios e, por conseguinte, as características do dia sucessor ao estudado não diferirem significativamente daquele que o antecede.

A realização destas restrições de igualdade consegue-se fazendo coincidir, nos instantes desejados, o valor da variável de controlo com o valor da ordenada da curva «consumo acumulado + capacidade máxima do RNV» quando se pretende que o reservatório esteja com o nível pleno – no início dos períodos de ponta – e com o valor da ordenada da curva «consumo acumulado + capacidade mínima do RNV» nas situações em que se deseje o nível de água no limite mínimo – no final desse mesmo período.

Sabendo, então, que nos dias sujeitos ao tarifário energético de Verão (períodos II e III) existe apenas um período de ponta, nessas situações impõem-se (para além da já referida igualdade de níveis de água nos instantes inicial e final) duas restrições de igualdade – uma para o início e outra para o fim do período. Na eventualidade de o dia em estudo pertencer a um dos períodos em que vigora o tarifário energético de Inverno (períodos I e IV), o programa associa à função objectivo quatro restrições de igualdade como resultado da presença de dois períodos de ponta.

Quando se testou o programa verificou-se que, caso fossem estudadas redes com reservatórios de dimensões consideráveis, por exemplo, de trinta metros de diâmetro, o programa determinava uma solução de volumes elevados acumulados onde, para determinadas horas da simulação, se verificava um não cumprimento da regra que impede que um valor seja inferior ao seu antecedente.

Desta forma, adicionaram-se restrições de desigualdade que encaminham o algoritmo para a procura de soluções que satisfaçam a seguinte condição:

$$V_{elev,acum}^{i+1} - V_{elev,acum}^i \geq 0 \quad (4.12)$$

Estas restrições, uma vez escritas e testado o programa, revelaram-se suficientes para eliminar o constrangimento relatado.

4.3. INTRODUÇÃO DO PARÂMETRO «QUALIDADE DA ÁGUA» NA FUNÇÃO OBJECTIVO

Tal como no trabalho de Goldman *et al.* (2000), neste caso considerou-se adequado incluir o controlo da qualidade da água pela regulação dos desvios de concentração de cloro em relação a um dado valor considerado razoável.

Convém esclarecer, nesta altura, que a rede em estudo é um trecho de um sistema adutor e, como tal, a concentração de cloro considerada ideal à saída do reservatório depende, entre outras condicionantes, do decaimento desta substância ao longo da rede de distribuição. Em função do valor da concentração determinado no ponto mais desfavorável da rede, ou seja, aquele que recebe água com maior tempo de percurso, ajusta-se a dose de cloro administrada na ETA ou, alternativamente ou em conjunto, podem ser instaladas estações de recloragem que se encarreguem de repor a concentração de cloro a níveis aceitáveis.

De acordo com esta abordagem ao problema, a função objectivo – expressão (4.3) - passa a escrever-se da seguinte forma:

$$F_{obj} = w_L \sum_{i=1}^{24} L^i + w_E \sum_{i=1}^{24} E^i \cdot p^i + w_C \sum_{i=1}^{24} \Delta C^i \quad (4.13)$$

Na parcela acrescentada na expressão (4.13) relativamente à expressão (4.3), w_C representa o «peso» atribuído à minimização dos desvios da concentração de cloro, em cada hora, em relação ao valor de «referência» definido pelo utilizador.

Já a parcela ΔC^i é calculada da seguinte forma:

$$\Delta C^i = \sqrt{(C^i - C_{ref.})^2} \quad (4.14)$$

Sendo:

ΔC^i – valor absoluto do desvio da concentração de cloro em relação ao valor de referência [mg/l];

C^i – valor de concentração de cloro, à saída do reservatório, no início da hora i [mg/l];

$C_{ref.}$ – valor de concentração de cloro de referência [mg/l].

4.4. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

O programa desenvolvido utiliza duas ferramentas computacionais independentes: o Epanet e o Matlab.

O primeiro trata-se de um simulador hidráulico e o segundo de um software para cálculos matemáticos.

No decurso da escrita do programa, dada a vantagem retirada do funcionamento conjunto destas duas aplicações informáticas, foi utilizada uma *toolbox* desenvolvida por André Vieira (Engenheiro Civil e Mestre em Hidráulica pela FEUP). Essa *toolbox* permite ao Matlab, entre outras capacidades, a leitura de informação dos ficheiros de extensão *inp* que contêm a definição das redes modeladas pelo Epanet. Dados como, por exemplo, os diâmetros dos reservatórios ou a potência de cada uma das bombas da rede podem ser automaticamente lidos pelo Matlab, dispensando, assim, a sua introdução manual por parte do utilizador.

Para que o leitor se inteire das capacidades e do modo como estes programas contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, segue-se uma breve referência a cada uma deles.

4.4.1. EPANET 2.0

4.4.1.1. BREVE DESCRIÇÃO

Um simulador hidráulico é um programa de computador que permite, genericamente, avaliar o comportamento hidráulico de uma rede de escoamento de água, nomeadamente através das seguintes grandezas: caudais, pressões, velocidades e perdas de carga.

De entre todos os programas deste tipo, crê-se que o mais utilizado seja o Epanet, em virtude de ser o mais referenciado em trabalhos académicos debruçados sobre temáticas relacionadas com sistemas de abastecimento de água.

Esta aplicação informática, cuja versão mais recente (versão 2.00.12) está disponível desde Março do ano 2008, foi desenvolvida pela *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA). Esta Agência para a Protecção do Ambiente dos Estados Unidos da América é uma entidade estatal possuidora de um grande domínio de acção, exercendo tanto a regulação de leis redigidas pelo Congresso como a investigação científica na área do Ambiente.

Para além de ser um programa de distribuição gratuita, a EPA disponibiliza também o código fonte do Epanet, o que contribui ainda mais para a sua popularidade, pois isso permite que sejam desenvolvidas outras ferramentas informáticas complementares que tirem partido da componente de simulação hidráulica deste programa, ou inclusive, a adaptação da sua interface a outros idiomas.

Trata-se, portanto, de uma ferramenta largamente utilizada, com capacidade de efectuar análises estáticas e dinâmicas de uma qualquer instalação hidráulica com escoamento permanente sob pressão, incorporando ainda a determinação de indicadores da qualidade da água.

Relativamente às capacidades de modelação hidráulica destacam-se a ausência de restrições quanto ao número de componentes da rede a analisar; a possibilidade de modelar bombas com velocidade de rotação constante ou variável ou ainda de atribuir, nos nós, consumos variáveis ao longo do tempo.

Quanto às valências relacionadas com a qualidade da água podem referir-se, entre outras, a capacidade de modelar as reacções de decaimento do cloro no seio do escoamento e nas paredes das tubagens; a estipulação da variação temporal da concentração ou de entrada de massa em qualquer ponto da rede e, ainda, o estudo da formação de subprodutos de desinfecção.

Considerando em conjunto todas estas características e citando o manual de utilizador do programa, o Epanet pode efectuar os seguintes tipos de análise no âmbito da qualidade da água:

- a) mistura de água a partir de diversas origens;
- b) determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- c) determinação da perda de cloro residual;
- d) determinação do crescimento de subprodutos de desinfecção;
- e) rastreio da propagação de contaminantes ao longo da rede.

No âmbito da Engenharia Civil, este programa pode ter grande utilidade tanto no dimensionamento de novas redes de distribuição ou adução de água como na simulação do comportamento de redes já em serviço, desempenhando, neste caso, um papel relevante no processo de tomada de decisão quando se pretende estudar a «reacção» da globalidade do sistema, por exemplo, a eventuais alterações de operação de bombas ou novas configurações físicas da própria rede.

Para uma maior familiarização com todas as capacidades e modo de operação do Epanet, o autor sugere a consulta da tradução portuguesa, elaborada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), do original *Epanet 2 user's manual* da autoria de Lewis A. Rossman.

4.4.1.2. SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

O Epanet utiliza o método Lagrangeano (ver 2.4.3.) para determinar o comportamento de uma substância durante o seu percurso pela rede de transporte de água.

Para que os resultados reproduzam com maior aproximação a realidade dos fenómenos, o passo de cálculo da qualidade da água deve ser substancialmente menor do que o estabelecido para o passo de cálculo hidráulico. No Epanet, a maior precisão admitida é o minuto, tendo sido estabelecido, para este estudo, que tanto o passo de cálculo da qualidade como o passo de cálculo hidráulico seria de um minuto.

Este programa possui ainda um conjunto composto por quatro modelos que permitem caracterizar, segundo os princípios de cada um, as reacções de mistura entre a água contida e a água afluente em reservatórios de nível variável, havendo versatilidade para atribuir modelos diferentes aos vários reservatórios de uma rede. Os modelos existentes são:

- a) Modelo de mistura completa;
- b) Modelo de mistura com dois compartimentos;
- c) Modelo de escoamento em êmbolo FIFO;
- d) Modelo de escoamento em êmbolo LIFO.

O primeiro modelo constitui-se como a abordagem mais simples ao problema já que pressupõe que a mistura da água que entra no reservatório com a que lá existe é instantânea e completa. É um modelo adequado à modelação de reservatórios de nível variável que operem em sucessivos ciclos completos de enchimento e esvaziamento (Coelho *et al.*, 2006).

O modelo com dois compartimentos admite igualmente mistura completa. No entanto, um designado primeiro compartimento destina-se a receber o volume de água afluente ao reservatório, dando-se a reacção de mistura, cedendo apenas ao outro compartimento o volume que extravasa a sua capacidade.

Da mesma forma que entra no reservatório para o primeiro compartimento, a água abandona-o também por essa fracção de volume. Com este princípio de funcionamento, este modelo pode ser útil para simular, com o primeiro compartimento, um curto-circuito entre o caudal afluente e efluente e, com o segundo compartimento, o volume de água «morto» do RNV (Coelho *et al.*, 2006).

Caso pretenda adoptar este modelo, o utilizador necessita de especificar a fracção do volume total do RNV que pretende destinar ao primeiro compartimento.

A designação do terceiro modelo, FIFO, resulta da expressão em língua inglesa *first-in-first-out*. De acordo com esta concepção, as diversas parcelas de água não se misturam, pelo que a primeira a entrar no reservatório será a primeira a deixá-lo. Segundo Coelho *et al.* (2006), este modelo é indicado para a modelação do comportamento de reservatórios com septo que operem com simultaneidade de caudal de entrada e caudal de saída.

O último processo de cálculo das reacções nos RNV's, LIFO, deve a sua designação à expressão *last-in-first-out*. Ao contrário do modelo anterior, a primeira parcela a sair é a que deu entrada mais recente. Isto deve-se à consideração de que a água entra e sai pelo fundo do RNV, amontoando-se as diversas parcelas umas sobre as outras, não havendo mistura entre si.

Este modelo pode ser adoptado caso se pretenda simular um reservatório de secção estreita face à altura, ou até mesmo um tubo vertical aberto, com entrada e saída lenta de caudal pelo fundo (Coelho *et al.*, 2006).

Neste trabalho admitiu-se que a mistura nos reservatórios é instantânea e completa, pelo que quando foi utilizado o Epanet se escolheu a opção *mixed*, na janela de propriedades dos RNV's, no campo de edição *mixing model*.

4.4.2. O MATLAB

4.4.2.1. BREVE DESCRIÇÃO

O Matlab é um programa de cálculo científico cuja principal característica, à data da sua introdução no mercado, constituía-se pela facilidade de execução de operações matemáticas envolvendo matrizes, derivando mesmo o seu nome da junção das primeiras três letras de cada uma das seguintes palavras: *Matrix Laboratory*.

Dada a grande versatilidade do programa, este rapidamente se difundiu junto da comunidade científica e académica, sendo hoje uma aplicação informática amplamente utilizada.

Esta ferramenta dispõe de uma linguagem de programação própria semelhante a outras como o Fortran ou o Microsoft Visual C++.

No contexto deste trabalho, o Matlab é usado para escrever o algoritmo do modelo de optimização proposto que, por sua vez, calcula os valores da variável de controlo.

4.4.2.2. FUNÇÃO DE OPTIMIZAÇÃO DA BIBLIOTECA DO MATLAB UTILIZADA

De todas as funções disponíveis na biblioteca do Matlab, a função de optimização utilizada foi a *fmincon*. Esta função, partindo de uma aproximação inicial de x , determina o valor mínimo de uma função $f(x)$ sujeita a restrições não lineares. Para o efeito, recorre ao cálculo da Hessiana da Lagrangeana por uma aproximação quasi-Newton.

As restrições a que se sujeita $f(x)$ devem ser escritas da seguinte forma:

$$\min f(x) \text{ de forma que } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (4.15)$$

De acordo com esta estrutura, x , b , beq , lb , e ub são vectores; A e Aeq são matrizes; $c(x)$ e $ceq(x)$ são funções das quais resultam vectores e de $f(x)$ resulta um escalar. Deste conjunto, $f(x)$, $c(x)$ e $ceq(x)$ podem ser funções não lineares.

4.5. O PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO

A estrutura do programa de optimização pode ser dividida em duas partes.

A primeira parte consiste num conjunto de procedimentos em que o programa recolhe uma série de dados da rede que serão necessários ao desempenho da função de optimização. Após a introdução, pelo utilizador, do nome do ficheiro de extensão *inp* com a rede a optimizar modelada e dos diâmetros dos reservatórios, assim como as correspondentes alturas máximas e mínimas de água, o programa serve-se das funções da *toolbox* para armazenar em variáveis próprias a informação de que necessitará posteriormente, inicialmente contida no ficheiro *inp*.

De seguida, durante a segunda parte, na posse de todos os elementos imprescindíveis, o programa ocupa-se da definição das restrições do problema e, na fase seguinte, é requerido o cálculo da função objectivo. Uma vez encontrado o valor da variável de controlo que minimiza aquela função, dá-se uma sucessão de cálculos que preparam a saída dos resultados finais para a janela do Matlab.

4.5.1. REGRAS A QUE DEVE OBEDECER A CONSTRUÇÃO DO FICHEIRO COM A REDE MODELADA

Embora o programa tenha versatilidade suficiente que possibilite a sua utilização em qualquer sistema adutor composto por uma ou várias bombas e um ou mais reservatórios, devem ser respeitadas algumas regras na construção do modelo com o Epanet para que o programa funcione correctamente.

Conforme referido, o programa está formatado para a recolha de uma série de informações da rede. Para tal, escreveram-se rotinas que fazem com que certos parâmetros sejam lidos de acordo com a identificação atribuída pelo utilizador aquando da modelação da rede com o Epanet.

Assim sendo, para que não haja erros ou conflitos, deve ter-se em consideração os seguintes aspectos:

- a) A rede deve ser cuidadosamente «desenhada» e com atenção para a correcta atribuição de comprimentos de tubagens, diâmetros e rugosidades;
- b) Deve ser verificado o método usado pelo programa para o cálculo da perda de carga e a unidade de caudal. Relativamente a este último aspecto, é imperioso que esteja escolhida a opção *LPS – liter per second* – ou seja, litros por segundo. Caso seja outra a unidade definida, o programa dá erro e solicita a correcção;
- c) Numa simulação ao longo de 24 horas, tal como esta, é indispensável a definição do padrão horário de consumo de água pela rede de distribuição para que a simulação hidráulica dinâmica entre em linha de conta com a variação temporal do consumo. Inicialmente, no quadro de edição do nó localizado à saída do reservatório, no campo de edição *base demand* (consumo base) deve constar o consumo médio diário (para o dia em análise) na unidade litros por segundo. Recorda-se que no padrão de consumo, para cada intervalo de tempo de duração de uma hora, associa-se o respectivo factor horário de consumo que, multiplicado pelo consumo base, resulta no caudal médio consumido durante essa mesma hora. Atente o leitor, ainda, na importância de atribuir o rótulo (*ID*) «P_C» ao padrão de consumo de água, pois o programa está formatado para o reconhecimento e leitura de dados com essa identificação;
- d) De forma semelhante, o padrão tarifário da energia eléctrica deve ser também definido, mas com a designação «P_E». Neste caso, no quadro de edição de cada grupo elevatório, no campo

de edição *energy price* (preço de energia), deve ser escrito o número 1. Assim sendo, os valores definidos pelo utilizador no padrão tarifário representarão o próprio custo de energia em cada período de uma hora, em €/kWh;

- e) Com recurso à funcionalidade *curves*, a curva característica de cada bomba (CCB) deve ser definida, assim como as respectivas curvas de rendimento. Uma vez que, neste caso, as bombas são todas do mesmo modelo, basta escrever uma CCB e uma curva de rendimento;
- f) Na opção *quality*, depois de seleccionada a opção *options* deve ser escolhido, no campo de edição *parameter*, a hipótese *chemical*. Desta forma fica definido que as simulações de qualidade da água que futuramente se fizerem incidirão sobre a concentração de uma substância química, neste caso o cloro residual. De seguida, deve ser quantificada a concentração de cloro na água que eflui do RNF (que representa a ETA), bem como estipulado o valor das constantes de decaimento de cloro no seio do escoamento e nas paredes das tubagens. A concentração de cloro na água à saída do RNF pode ser editada na janela de propriedades desse «objecto» no campo de edição *initial quality*. Já os outros dois valores devem ser escritos nos campos de edição, respectivamente, *global bulk coeff.* e *global wall coeff.*, depois de escolhida a opção *reactions*, após, por sua vez, ter sido seleccionada o parâmetro *options*.

4.5.2. PREPARAÇÃO DOS FICHEIROS A UTILIZAR PELO PROGRAMA

Como é já sabido, o funcionamento do programa depende da existência do ficheiro Epanet, em formato *inp*, contendo a rede modelada. Contudo, é ainda necessário um ficheiro em formato *txt* (bloco de notas) com informação dos períodos e tarifas praticadas. Ressalta-se que este ficheiro deve ser escrito da mesma forma que os utilizados neste trabalho, sugerindo-se, portanto, a consulta do anexo A6. O cabimento desta nota prende-se com a forma como o programa está estruturado para a leitura da informação armazenada nesses ficheiros. Consequentemente, se o dia em estudo se incluir no período tarifário I ou IV o nome desse ficheiro deverá ser «tarifario_inverno». Por outro lado, aos dias constituintes do período II ou III atribuir-se-á a designação «tarifario_verão».

Uma vez realizada a modelação da rede em ambiente Epanet pode criar-se o ficheiro *inp* através da escolha da função *export*, seguida de *network*, na opção *file* da janela de comandos daquele programa.

4.5.3. ESTRUTURA DO PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO

Recuperando o trabalho de Ana Costa (2009), as várias operações que compõem o programa de optimização são:

- a) **Declaração das variáveis:** carregamento das variáveis da biblioteca de funções da *toolbox* do Epanet (por *script*) e declaração de outras variáveis globais adicionais;
- b) **Entrada de dados e definições de ficheiros:** introdução, por parte do utilizador, do nome do ficheiro, de formato *inp*, que contém a rede modelada. Concatenação do nome do problema com as extensões *inp*, *rep*, *out* e *hyd*;
- c) **Abertura da rede modelada:** importação do ficheiro «nome_problema.inp»;

- d) **Verificação de unidades:** é verificado se a unidade de caudal definida no ficheiro é litros por segundo. Caso assim não seja, surge uma mensagem de erro na janela do Matlab e o programa encerra;
- e) **Abertura dos ficheiros «nome_problema_inicial.inp» e «nome_problema_final.inp»:** estes dois ficheiros são criados e abertos pelo programa;
- f) **Contagem dos componentes da rede a simular:** número de nós, tubos, reservatórios, válvulas, bombas, etc;
- g) **Determinação dos *indexes*:** são criadas matrizes que armazenam os números através dos quais esses componentes são identificados pelo Epanet. Bombas, reservatórios e o nó ao qual está associado o padrão de consumo são os componentes inventariados neste passo do programa;
- h) **Contagem de elementos:** nesta fase contam-se o número de incrementos temporais do padrão de consumo; o número de curvas características de bombas e o número de controlos simples;
- i) **Leitura e armazenagem dos *indexes* do padrão de consumo de água e do padrão tarifário de energia eléctrica;**
- j) **Leitura de passos de tempo:** quando o programa atinge esta fase é lida a duração da simulação hidráulica da rede; o passo de cálculo hidráulico (*hydraulic time step*) e o passo do padrão de consumo de água;
- k) **Cálculo dos volumes máximos e mínimos de água nos reservatórios:** surge no ecrã uma sucessão de três mensagens que solicitam o utilizador a esclarecer se os reservatórios são iguais e quais as alturas mínimas e máximas de água em cada um deles. Em função dos dados introduzidos são calculados os volumes máximos e mínimos para cada uma das estruturas;
- l) **Atribuição das alturas máximas e mínimas de água nos reservatórios:** em função dos valores definidos pelo utilizador no ponto anterior, o programa recorre à *toolbox* para associar ao ficheiro «nome_problema_final.inp» as alturas limites de água;
- m) **Realização de uma simulação hidráulica:** é novamente feito uso de uma função da *toolbox* que permite executar, recorrendo ao Epanet, uma simulação hidráulica para a obtenção dos caudais de cada uma das bombas; as respectivas potências e as alturas manométricas;
- n) **Leitura do tarifário de energia:** surge, neste momento, uma mensagem pedindo que o utilizador defina se o dia em questão pertence ao tarifário de Verão ou de Inverno. Em função da resposta é lido o correspondente ficheiro de formato *txt* e guardada a informação sobre o número de períodos tarifários, respectivas horas de início e fim e ainda os custos em €/kWh;
- o) **Realização de uma simulação hidráulica:** desta feita pretende-se obter um vector, de dimensão igual ao número de horas que dura a simulação, onde é alocado, em cada linha, o respectivo consumo horário de água da rede de distribuição;

- p) **Cálculo dos seguintes vectores:** volume horário consumido; volume consumido acumulado; volume consumido acumulado adicionado da capacidade mínima do reservatório; volume consumido acumulado adicionado da capacidade máxima do reservatório. Se o leitor evocar o que anteriormente se referiu sobre o método do fio tenso facilmente chegará à conclusão que os dois últimos vectores referidos serão posteriormente adoptados como restrições de desigualdade na função objectivo.

Com todas estas variáveis estabelecidas é, de seguida, criado o vector que constituirá a aproximação inicial com que o algoritmo optimizador iniciará a procura do óptimo. Esse vector, conforme exposto anteriormente, corresponde ao volume elevado acumulado pelos GE's e constitui a variável de controlo do problema de optimização. Os valores adoptados como primeira estimativa desse vector são os resultados da média aritmética, para cada incremento do padrão de consumo, ou seja, para cada hora, dos valores do vector «volume consumido acumulado adicionado da capacidade mínima do reservatório» e do vector «volume consumido acumulado adicionado da capacidade máxima do reservatório»;

- q) **Introdução das regras simples de operação:** tira-se partido, mais uma vez, de uma funcionalidade da *toolbox* para escrever as regras simples de operação. Nelas, o estado das bombas é definido em função dos níveis de água nos reservatórios: se o nível de água for igual ou inferior ao mínimo, as bombas ligam-se; se o nível igualar ou exceder o valor máximo estipulado, as bombas são automaticamente desligadas. Estas regras pretendem assegurar que no decorrer das simulações hidráulicas do Epanet promovidas pelo Matlab através da *toolbox* o nível de água nos reservatórios não exceda os limites, pois, nesta fase, ainda não estão escritos os controlos com condições múltiplas que mais tarde anularão a utilidade destes comandos;
- r) **Definição das restrições de igualdade e desigualdade;**
- s) **«Chamada» da função objectivo:** definidas as restrições do problema, são mostradas na janela do Matlab as questões sobre os valores a adoptar para cada um dos «pesos» das três parcelas intervenientes no cálculo da função objectivo; o valor da constante de decaimento de cloro no seio do escoamento e o valor da concentração de cloro de referência, à saída dos RNV's. Uma vez introduzidos os valores por parte do utilizador, inicia-se de imediato o processo iterativo que pretende determinar o conjunto de valores para o vector que constitui a variável de controlo e que permitem minimizar o valor global da função objectivo. No final do processo, os valores do vector de volumes elevados acumulados são «decompostos» em: volumes horários elevados; caudais horários elevados; alturas de água nos RNV's no fim de cada hora. Em função do volume a elevar em cada hora sucede-se uma série de cálculos que pretendem determinar, equacionando os caudais bombados por cada combinação de grupos elevatórios, quantas bombas funcionam durante cada período de uma hora e durante quanto tempo cada bomba interveniente opera nesse mesmo período. Posteriormente, esses tempos de funcionamento intervêm no cálculo do custo de energia;
- t) **Envio dos resultados obtidos para a janela do Matlab:** nesta última etapa do programa é feita uma compilação de todos os cálculos efectuados durante a etapa anterior e enviada uma síntese dos resultados para a janela do Matlab, nomeadamente: a percentagem de utilização de cada GE durante cada período tarifário; o número de GE's a utilizar em cada período tarifário;

a percentagem global de funcionamento de cada GE e, por fim, os níveis de água iniciais e finais no RNV para cada período tarifário.

4.5.4. O MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA ESCRITO NO PROGRAMA COM A FUNÇÃO OBJECTIVO

A função objectivo é escrita num ficheiro com o mesmo formato do programa principal, sendo por este «utilizada» a determinada altura do processo de cálculo, mais precisamente a partir do ponto s) (ver 4.5.3).

A fórmula ideal para obtenção dos valores de C^i (ver 4.3) seria tirando partido do módulo de análise da qualidade da água do Epanet, fazendo-se uso da já referida *toolbox* de comunicação com o Matlab. No entanto, tal não foi possível. De facto, sendo a variável de controlo o volume elevado acumulado pela EE, não há nenhuma função da *toolbox* que permita, automaticamente e a partir do Matlab, controlar o funcionamento dos grupos elevatórios. Desta forma, fica inviabilizado o cenário ideal em que, a cada iteração, ajustar-se-iam as regras de operação das bombas para que, em cada hora e período tarifário, os volumes bombados correspondessem a cada uma das soluções da variável de controlo equacionadas pelo algoritmo optimizador. Caso isso fosse possível, a cada iteração recorrer-se-ia ao módulo de cálculo da qualidade da água do Epanet para obter os valores da concentração de cloro à saída do reservatório; de seguida aplicar-se-ia a expressão (4.14) para obtenção do desvio de concentração e, posteriormente, seria calculado o valor da função objectivo representada pela expressão (4.13). Caso necessário, seguir-se-ia uma nova iteração até que um dos critérios de paragem da função optimizadora do Matlab fosse «activado».

Ora, a *toolbox* apenas permite a escrita de regras simples de operação. Estas permitem controlar o estado de bombas (ligado ou desligado) ou válvulas (completamente aberto; fechado; parcialmente aberto) em função da altura de água num RNV; da pressão num nó; do instante da simulação e do instante do dia.

No entanto, comandar o estado das bombas em função das alturas de água no RNV não é suficiente uma vez que é necessário, para além disso, ter em atenção as horas do dia em que essas condições se devem verificar. A introdução, no Epanet, de regras operacionais sujeitas a vários condicionalismos é assegurada pela funcionalidade «controles com condições múltiplas». Contudo, estes não se conseguem escrever através da *toolbox*.

Decidiu-se, então, contornar o problema escrevendo um modelo de qualidade da água materializado pela integração numérica de duas equações diferenciais que regem o processo: a equação de mistura completa nos reservatórios e a equação de balanço nos reservatórios.

Com esta formulação é possível estabelecer uma relação de dependência entre os valores de concentração de cloro à saída do RNV e os valores da variável de controlo (os volumes elevados acumulados). Desta forma, a cada iteração, o algoritmo é capaz de avaliar, consoante os valores atribuídos à variável de controlo, os «efeitos» provocados na concentração de cloro à saída do RNV.

Os fenómenos que regem a mistura de uma massa de água que entra num reservatório com a água que já se encontra no seu interior são bastante complexos, sendo a consideração de mistura instantânea e completa a abordagem mais simplista ao problema. Contudo, conforme já se teve oportunidade de referir em 4.4.1.2., esta é uma aproximação razoável quando se estudam reservatórios que operam em ciclos completos e sucessivos de enchimento e esvaziamento.

A segunda equação trata-se unicamente de um princípio físico, pois a variação do volume de água no reservatório em função do tempo é dada pela diferença entre caudal afluyente e caudal efluente do RNV.

A equação diferencial que representa a mistura completa no volume de água de um reservatório é:

$$\frac{\partial(V_{RNV} \cdot C_{RNV})}{dt} = Q_{afl} \cdot C_{afl} - Q_{efl} \cdot C_{RNV} + k_b \cdot V_{RNV} \cdot C_{RNV} \quad (4.16)$$

Em que:

V_{RNV} – é o volume de água contido no reservatório [m^3];

C_{RNV} – é a concentração de cloro na água armazenada no reservatório [mg/l];

Q_{afl} – é o caudal de água afluyente ao reservatório [m^3/s];

C_{afl} – é a concentração de cloro na água que entra no reservatório [mg/l];

Q_{efl} – é o caudal que eflui do reservatório [m^3/s];

k_b – é a constante de decaimento de cloro no seio do escoamento [dia^{-1}].

A equação de balanço no reservatório expressa-se da seguinte forma:

$$\frac{\partial V_{RNV}}{dt} = Q_{afl} - Q_{efl} \quad (4.17)$$

Onde as variáveis participantes adquirem o mesmo significado que na expressão anterior.

Conjugando as expressões (4.16) e (4.17) obtém-se a expressão (4.18):

$$V_{RNV} \cdot \frac{\partial C_{RNV}}{dt} + (Q_{afl} - k_b \cdot V_{RNV}) \cdot C_{RNV} = Q_{afl} \cdot C_{afl} \quad (4.18)$$

Integrando numericamente a expressão (4.18), em ordem ao tempo, chega-se à expressão (4.19):

$$C_{RNV}^{i+1} = \frac{B \cdot C_{RNV}^i + C + D}{A} \quad (4.19)$$

Nesta expressão, para facilidade de escrita, as parcelas representadas pelas quatro primeiras letras do abecedário latino correspondem, respectivamente, às seguintes expressões:

$$A = \left[\frac{\bar{V}_{RNV}^i}{\Delta t^i} + \theta(Q_{afl}^i - k_b \cdot \bar{V}_{RNV}^i) \right] \quad (4.20)$$

$$B = \left[\frac{\bar{V}_{RNV}^i}{\Delta t^i} - (1 - \theta)(Q_{afl}^i - k_b \cdot \bar{V}_{RNV}^i) \right] \quad (4.21)$$

$$C = (1 - \theta) \cdot Q_{afl}^i \cdot C_{afl}^i \quad (4.22)$$

$$D = \theta \cdot Q_{afl}^{i+1} \cdot C_{afl}^{i+1} \quad (4.23)$$

Dado, neste estudo, se proceder à determinação das concentrações com um passo de cálculo de uma hora, para que se obtenham resultados mais aproximados da realidade, nas expressões (4.20) e (4.21) foi utilizado o conceito de volume médio, pois durante o intervalo de tempo i o volume de água no reservatório não se mantém constante. Consequentemente, os volumes médios foram calculados por intermédio da expressão (4.24) e que corresponde ao volume médio de água no RNV dado pela média dos volumes de água nos instantes inicial e final do intervalo de tempo considerado:

$$\bar{V}_{RNV}^i = \frac{V_{RNV}^i + V_{RNV}^{i+1}}{2} \quad (4.24)$$

Na expressão (4.20) até à expressão (4.23), a letra do alfabeto grego θ presente nessas equações consiste no factor de ponderação da integração numérica em cada intervalo de tempo Δt , neste caso de valor igual a 0,5.

No programa desenvolvido, uma vez estimados, pelo emprego da expressão (4.19), os valores de concentração de cloro à saída do reservatório no fim de cada hora da simulação, seguiu-se o cálculo dos desvios de concentração conforme já descrito em 4.3.

Uma das etapas fundamentais para a aplicação deste modelo é o conhecimento de C_{afl}^i , isto é, do valor da concentração de cloro na água que entra no RNV.

Com esse intuito, utilizou-se a função *ENgetnodevalue* (consultar o anexo A7 para mais informação) da biblioteca de funções da *toolbox* para, através do Matlab, armazenar a informação relativa à simulação da qualidade da água, nomeadamente os valores da concentração de cloro. O nó da rede para o qual foi definida a leitura dessa grandeza é o nó que se encontra imediatamente a montante do «RNV 2» – ver figura 3.9

Na posse dos valores da concentração de cloro ao longo do período de simulação para o nó à entrada do RNV, calcularam-se as médias horárias daquele parâmetro que, posteriormente, participaram nas várias aplicações da expressão (4.22).

Importa esclarecer ainda que os caudais afluentes que intervêm no cálculo das expressões (4.20) – (4.23) resultam do quociente do volume horário elevado pela duração do respectivo intervalo de tempo, portanto, 3600 segundos.

4.6. TRANSPOSIÇÃO DOS RESULTADOS DO MATLAB PARA O EPANET

A execução do programa termina com a exibição, na janela do Matlab, dos seguintes resultados: número de bombas accionadas durante cada período (figura 4.2); o factor de utilização de cada uma das bombas durante cada período, ou seja, a percentagem da duração total do período em que a bomba está ligada (figura 4.3); as alturas de água nos reservatórios no início e fim de cada período (figura 4.4) e, finalmente, o factor de utilização global de cada bomba (em relação à duração total da simulação hidráulica) e respectivo custo, incluindo o custo conjunto final (figura 4.5).

Número de bombas utilizadas em cada período

Período	Hora Início	Hora Fim	Número de bombas
1	0	2	2
2	2	6	2
3	6	7	2
4	7	9	1
5	9	12	1
6	12	24	2

Figura 4.2 - Reprodução de um quadro de resultados apresentado pelo programa em Matlab que indica o número de bombas utilizadas em cada período tarifário para o dia 8 de Julho de 2008.

Factor de Utilização das Bombas em cada Período

Período	Factor de utilização (%)		
	B1	B2	B3
1	100	42.24	0
2	100	50.4	0
3	100	8.747	0
4	85.66	0	0
5	22.9	0	0
6	100	10.62	0

Figura 4.3 - Reprodução de um quadro de resultados apresentado pelo programa em Matlab que mostra o factor de utilização de cada uma das bombas, para cada período tarifário, para o dia 8 de Julho de 2008.

Níveis de água nos RNV em cada período

Período	Nível de Água Inicial (m)	Nível de Água Final (m)
1	2.000	2.000
2	2.000	3.863
3	3.863	4.980
4	4.980	4.980
5	4.980	2.000
6	2.000	2.000

Figura 4.4 - Reprodução de um quadro de resultados apresentado pelo programa em Matlab que revela as alturas iniciais e finais de água nos RNV's, para cada período tarifário, para o dia 8 de Julho de 2008.

Resultados obtidos para o custo da energia

Bomba	Factor de Utilização (percentagem)	Rendimento (percentagem)	Custo (€)
1	89.17	81.98	2061.70
2	17.59	81.98	344.00
3	0.00	83.19	0.00
CUSTO TOTAL (€)		2405.70	

Figura 4.5 - Reprodução de um quadro de resultados apresentado pelo programa em Matlab que indica o factor de utilização global de cada bomba e o respectivo custo diário para o dia 8 de Julho de 2008.

Com estes dados, o que se pretende é escrever controlos com condições múltiplas no Epanet que permitam simular o comportamento hidráulico do sistema para a solução encontrada pelo algoritmo optimizador.

Esta funcionalidade do Epanet permite estipular regras que controlam, por exemplo, o estado de bombas ou válvulas em função do nível de água em reservatórios, da pressão em determinado nó ou, inclusivamente, das horas do dia.

Na figura 4.6 apresenta-se o exemplo de um controlo que estabelece o estado (aberto ou fechado) de uma tubagem (*Pipe 330*) e o estado (ligado ou desligado) de uma bomba (*Pump 335*) em função da altura de água num reservatório (*Tank 1*).

```
RULE 1
IF    TANK    1 LEVEL ABOVE 19.1
THEN PUMP 335 STATUS IS CLOSED
AND   PIPE 330 STATUS IS OPEN

RULE 2
IF    TANK    1 LEVEL BELOW 17.1
THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN
AND   PIPE 330 STATUS IS CLOSED
```

Figura 4.6 - Exemplo de controlos com condições múltiplas que comandam o estado de uma bomba e de uma tubagem em função do nível de água num RNV. Fonte: Manual do utilizador do Epanet, LNEC (2002).

Exemplos de regras que determinam o estado de uma bomba em função das horas e do nível de água num reservatório podem encontrar-se na figura 4.7.

```
RULE 3
IF    SYSTEM CLOCKTIME >= 8 AM
AND   SYSTEM CLOCKTIME < 6 PM
AND   TANK 1 LEVEL BELOW 12
THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN

RULE 4
IF    SYSTEM CLOCKTIME >= 6 PM
OR    SYSTEM CLOCKTIME < 8 AM
AND   TANK 1 LEVEL BELOW 14
THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN
```

Figura 4.7 - Exemplo de controlos com condições múltiplas que comandam o estado de uma bomba em função do nível de água num RNV. Fonte: Manual do utilizador do Epanet, LNEC (2002).

Na posse dos resultados fornecidos pelo Matlab, sabendo, portanto, os níveis de água no início e final de cada período e o factor de utilização de cada bomba accionada durante esse intervalo temporal, procura-se escrever comandos semelhantes aos acabados de reproduzir.

Conforme já foi possível constatar, é necessário regular o estado das bombas pelo nível de água nos reservatórios e/ou pela hora do dia.

No entanto, e voltando aos dados das figuras 4.3 e 4.4 como suporte para a explicitação que se segue, o segundo período, por exemplo, tem uma duração de quatro horas. O nível inicial de água nos reservatórios é igual a 2 metros e o nível final igual a cerca de 3,86 metros, havendo uma bomba que funciona durante a totalidade do período – factor de utilização igual a 100% - e outra que funciona durante, aproximadamente, metade do mesmo tempo – factor de utilização igual a 50,4%.

Supondo que é ligada no início de uma hora e permanece nesse estado, pelo menos, até ao fim da mesma, verifica-se, então, que a «Bomba 2», dentro das quatro horas que compõem o período, possui seis hipóteses de operação possíveis: nas duas primeiras horas; nas duas horas finais; nas duas horas intermédias (segunda e terceira); na primeira e na terceira horas; na segunda e na quarta horas e, finalmente, na primeira e na quarta horas.

Face esta multiplicidade de alternativas importa dispor de um método que permita calcular rapidamente as alturas de água e os instantes em que a «Bomba 2» deve alterar o seu estado.

Uma forma simples de resolver o problema é através do Microsoft Excel e da funcionalidade *solver*, já que, de facto, se trata de um problema de optimização sujeito a restrições.

A expressão (4.25) permite obter o volume de água no reservatório para o final de cada intervalo de tempo de uma hora:

$$V_{RNV}^i = V_{RNV, inicial}^i + (Q^{3B} - Cons^i) \cdot t^{3B} + (Q^{2B} - Cons^i) \cdot t^{2B} + (Q^{1B} - Cons^i) \cdot t^{1B} - Cons^i \cdot t^{0B} \quad (4.25)$$

Nesta expressão, as variáveis intervenientes representam:

V_{RNV}^i - o volume de água no reservatório no final da hora i [m^3];

$V_{RNV, inicial}^i$ - o volume de água no reservatório no início da hora i [m^3];

Q^{3B} - o caudal elevado com as três bombas a operar em paralelo [m^3/s];

Q^{2B} - o caudal elevado com duas bombas a operar em paralelo [m^3/s];

Q^{1B} - o caudal elevado por uma bomba [m^3/s];

t^{3B} - a duração do intervalo de tempo em que operam três bombas em paralelo [s];

t^{2B} - a duração do intervalo de tempo em que operam duas bombas em paralelo [s];

t^{1B} - a duração do intervalo de tempo em que opera uma bomba [s];

t^{0B} - a duração do intervalo de tempo em que nenhuma bomba está ligada [s];

$Cons^i$ - o consumo médio horário de água pela rede de distribuição durante a hora i [m^3].

As variáveis que participam na expressão (4.25) estão, naturalmente, sujeitas às seguintes restrições:

$$\begin{cases} Cap_{mín} \leq V_{RNV, inicial}^i \leq Cap_{máx} \\ Cap_{mín} \leq V_{RNV}^i \leq Cap_{máx} \end{cases} \quad (4.26) ; (4.27)$$

$$t^{3B} + t^{2B} + t^{1B} + t^{0B} = 3600 \quad (4.28)$$

A função objectivo, cujo valor se pretende minimizar, toma a seguinte forma:

$$F = K^{3B} \cdot \Delta t^{3B} + K^{2B} \cdot \Delta t^{2B} + K^{1B} \cdot \Delta t^{1B} + K^{0B} \cdot \Delta t^{0B} \quad (4.29)$$

Sendo:

$$\Delta t^j = \sqrt{(\sum_{i=1}^n t_i^j - t_{Matlab}^j)^2} \quad (4.30)$$

Onde:

$K^{3B}, K^{2B}, K^{1B}, K^{0B}$ - são os «pesos» atribuídos a cada parcela que compõe a função objectivo;

$\Delta t^{3B}, \Delta t^{2B}, \Delta t^{1B}, \Delta t^{0B}$ - representam os valores absolutos dos desvios de tempos dados pelo programa em Matlab e os calculados pelo *solver* do Excel [s];

$t^{3B}, t^{2B}, t^{1B}, t^{0B}$ - são os valores da duração dos intervalos de tempo, durante uma hora, calculados pelo Excel, em que funciona um determinado número de grupos elevatórios e que constituem as variáveis de decisão deste problema de optimização particular [s];

$t_{Matlab}^{3B}, t_{Matlab}^{2B}, t_{Matlab}^{1B}, t_{Matlab}^{0B}$ - são os valores da duração dos intervalos de tempo, durante um determinado período, calculados através dos factores de utilização dados como resultado do programa em Matlab [s];

n - número de horas do período considerado;

j - índice representativo do número de bombas accionadas.

Note-se que não foi necessário impor a igualdade, no início e no final de cada período, entre os volumes de água no reservatório e os volumes correspondentes às alturas de água dadas pelo programa em Matlab. Na verdade, as restrições referidas e uma correcta atribuição dos «pesos» a cada parcela mostraram-se suficientes para que o *solver* encontrasse soluções que satisfizessem essa condição com assinalável aproximação.

Importa igualmente referir que a metodologia acabada de apresentar foi aplicada individualmente a cada período, isto é, a cada um dos oito períodos tarifários - para o dia 8 de Janeiro de 2008 - e seis períodos tarifários - para o dia 8 de Julho de 2008.

Desta forma, o *solver* deve ser executado sequencialmente, isto é, começando pelo primeiro período até se chegar ao último. Pelo mesmo raciocínio, sempre que se efectuar um novo cálculo do *solver* para um determinado período deve ter-se o cuidado de fazer o mesmo para os períodos seguintes, já que o volume de água inicial no reservatório num certo período é o volume de água final para o período predecessor.

Nos quadros 4.1 e 4.2 apresentam-se os resultados obtidos por aplicação desta metodologia ao exemplo atrás iniciado - os dados do segundo período incluídos na figura 4.4.

Quadro 4.1 – Alturas de água obtidas após aplicação do método desenvolvido com o Microsoft Excel.

Instante	Hora	Volume (m ³)	Altura (m)
Início	2:00	2024,764	1,998
Fim	3:00	3648,202	3,600
Início	3:00	3648,202	3,600
Fim	4:00	4831,702	4,768
Início	4:00	4831,702	4,768
Fim	5:00	3634,731	3,587
Início	5:00	3634,731	3,587
Fim	6:00	3909,019	3,857

Quadro 4.2 - Tempos de utilização obtidos após aplicação do método desenvolvido com o Microsoft Excel.

Hora	Tempo de utilização (segundos)		
	2 Bombas	1 Bomba	0 Bombas
2:00 - 3:00	3600	0	0
3:00 - 4:00	3149	451	0
4:00 - 5:00	0	3600	0
5:00 - 6:00	506	3094	0

Se se compararem os resultados do quadro 4.1 com os da figura 4.4 verifica-se a existência de uma diferença de 6 milímetros entre as alturas de água no final do período, o que é irrelevante.

Reparando no quadro 4.2 verifica-se que na primeira hora o estado das duas bombas não é alterado, pois durante os 3600 segundos é debitado caudal por dois grupos elevatórios. Contudo, o mesmo não se passa durante a segunda hora do período em que durante a maior parte do tempo operam duas bombas, estando somente 451 segundos afectos ao funcionamento de apenas um grupo elevatório.

Esta última informação suscita a dúvida: de entre os vários intervalos de tempo de duração igual a 451 segundos que compõem uma hora, qual aquele que deve ser o escolhido para lhe associar o funcionamento exclusivo de um grupo elevatório?

A forma mais simples de abordar a questão consiste em admitir apenas duas hipóteses para a operação de apenas uma bomba:

- durante os primeiros 451 segundos da hora em questão;
- durante os últimos 451 segundos da hora em questão.

Ora, considerando a primeira hipótese, o volume de água no reservatório ao fim de 451 segundos pode ser calculado por:

$$V_{RNV,451s} = V_{RNV,initial}^4 + (Q^{1B} - Cons^4) \cdot 451 \quad (4.31)$$

Optando pela segunda alternativa, na altura de desligar uma das bombas para que fique outra a assegurar a alimentação dos reservatórios, ou seja, passados 3149 segundos, o volume de água no reservatório é:

$$V_{RNV,3149\ s} = V_{RNV, inicial}^4 + (Q^{2B} - Cons^4) \cdot 3149 \quad (4.32)$$

Consultando os quadros 4.1 e 3.3 e calculando o caudal médio horário consumido na quarta hora de simulação (pelo produto do consumo médio diário do dia 8 de Julho de 2008 pelo factor horário de consumo de água correspondente) conseguem-se agrupar os seguintes dados:

$$V_{RNV, inicial}^4 = 3648,202\ m^3;$$

$$Q^{2B} = 2,0361\ m^3/s;$$

$$Q^{1B} = 1,0387\ m^3/s;$$

$$Cons^4 = 1,58\ m^3/s.$$

Aplicando estes valores à expressão (4.31), obtém-se:

$$V_{RNV,451\ s} = 3404,076\ m^3$$

A altura de água no reservatório correspondente a este volume é:

$$h_{RNV,451\ s} = \frac{V_{RNV,451\ s} \cdot 4}{\pi \cdot 35,92^2} \cong 3,36\ m$$

Seguindo o mesmo procedimento em relação à expressão (4.32):

$$V_{RNV,3149\ s} = 5084,461\ m^3$$

Cuja altura de água associada é:

$$h_{RNV,3149\ s} = \frac{V_{RNV,3149\ s} \cdot 4}{\pi \cdot 35,92^2} \cong 5,02\ m$$

Calculados os dois valores de altura de água, facilmente se chega à conclusão de que não poderá ser adoptada a segunda estratégia de operação das bombas durante esta hora, já que se estabeleceu que o nível máximo de água no reservatório é de 4,98 metros.

Desta feita, fica definido que durante a hora entre as 3:00 e as 4:00 funciona uma bomba das 3:00 às 3:08, momento a partir do qual se acciona uma outra.

5

RESULTADOS

5.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Neste capítulo expõem-se os resultados obtidos após utilização do programa desenvolvido em Matlab e da aplicação em Excel, que antecedem a apresentação dos resultados da simulação hidráulica da rede com o Epanet, para os dois dias estudados – 8 de Janeiro e 8 de Julho, ambos pertencentes ao ano de 2008. Pretende-se, desta forma, avaliar o modo como os períodos tarifários energéticos e os consumos de água representativos de cada dia influenciam a política operacional mais económica para a exploração da estação elevatória.

É oportuno, agora, alertar o leitor de que os resultados aqui apresentados não foram obtidos com apenas uma única aplicação do programa em Matlab e do Excel. Na realidade, foram necessárias duas execuções de cada uma das ferramentas.

A explicação para o relatado reside no facto de os ficheiros *inp* com a rede modelada não possuírem, à partida, os controlos com condições múltiplas que comandam o estado das bombas. Nessa condição, se se executar uma simulação hidráulica da rede com o Epanet ou com o Matlab «via» *toolbox*, ao longo das vinte e quatro horas (duração da simulação pretendida) as bombas não funcionam, o que significa que os dois reservatórios da rede não são abastecidos de água.

Ora, como esta última condição é fundamental para que possam, conforme foi atrás referido em 4.5.4., ser lidos os valores da concentração de cloro no nó a montante do «RNV 2», é preciso recorrer uma primeira vez ao programa em Matlab antes que os resultados finais possam ser obtidos.

Durante essa espécie de primeira iteração o programa «actua» de acordo com o exposto em 4.5.3., tendo unicamente em consideração os aspectos de regularização de caudal e minimização dos custos energéticos quando solicita à função optimizadora a determinação dos valores ideais da variável de controlo.

Com os resultados obtidos após este primeiro uso do programa, recorre-se à aplicação desenvolvida com o Excel para conhecer a informação necessária à escrita dos controlos com condições múltiplas (de acordo com o método descrito em 4.6.) no ficheiro *inp* com a rede modelada.

Note-se que apesar de estes controlos definidos não traduzirem, na sua génese, uma política operacional da estação elevatória que salvguarde o cumprimento de parâmetros de qualidade da água, nomeadamente um determinado valor de concentração de cloro à saída dos reservatórios, de facto, nos casos estudados, revelaram-se bastante próximos daquilo que as soluções finais evidenciaram.

Escritos, então, no ficheiro *inp* os controlos com condições múltiplas, executa-se pela segunda vez o programa em Matlab. Desta feita, graças aos controlos, as bombas fazem chegar água aos reservatórios com uma concentração de cloro que pode ser determinada. Concluída esta simulação, na

posse dos resultados finais, utiliza-se novamente o Excel, seguindo-se, por último, as correcções aos controlos da «primeira iteração».

Terminadas estas etapas, o ficheiro *inp* pode, enfim, ser simulado no Epanet para que se conheça o comportamento hidráulico da rede face à solução operacional óptima.

Os resultados aqui apresentados foram obtidos atribuindo o valor unitário a cada um dos «pesos» das três parcelas que compõem a função objectivo: $w_L = 1$; $w_E = 1$; $w_C = 1$.

Como se desconhecem dados da qualidade da água para o sistema adutor estudado, tomaram-se as seguintes suposições: a água sai da ETA com uma concentração de cloro igual 0,65 mg/l; o valor da constante de decaimento do cloro no seio do escoamento, k_b , é $-0,60 \text{ dia}^{-1}$; o valor da constante de decaimento do cloro nas paredes das tubagens, k_w , é igual a $-0,25 \text{ m/dia}$.

Nestas condições, procurou-se que o algoritmo optimizador determinasse, para cada um dos dias em estudo, a política operacional da estação elevatória que minimizasse, à saída dos RNV's, os desvios da concentração de cloro em relação ao valor de referência, C_{ref} , arbitrado: 0,60 mg/l.

Pelo quadro 3.4 sabe-se que o nível máximo de água no reservatório é de 4,98 metros. Para além deste limite, é preciso estabelecer um nível mínimo operacional, isto é, uma altura de água mínima que corresponda a um volume suficiente para abastecer a rede a jusante na eventualidade de ocorrer alguma falha no sistema. De facto, caso houvesse uma avaria geral dos grupos elevatórios durante os períodos de maior consumo, o RNV deveria possuir água em quantidade suficiente para satisfazer as necessidades da rede, não esquecendo ainda uma hipotética situação de incêndio simultânea.

Na ausência de dados de referência, achou-se adequado fixar o nível mínimo de água no reservatório em 2,0 metros.

5.2. OS RESULTADOS OBTIDOS

5.2.1. RESULTADOS PARA O DIA 8 DE JANEIRO DE 2008

5.2.1.1. Resultados obtidos com o programa em Matlab

Pela análise do quadro 5.1 constata-se que para o dia 8 de Janeiro de 2008 não será preciso accionar a «Bomba 3». Assim sendo, pode alternar o funcionamento com a «Bomba 1», de forma a não sobrecarregar este equipamento.

Quadro 5.1 - Factores de utilização das bombas, dados pelo programa em Matlab, para o dia 8 de Janeiro de 2008.

Período	Hora		Factor de utilização (%)		
	Inicial	Final	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
1	00:00	02:00	100	20,65	0
2	02:00	06:00	100	10,80	0
3	06:00	07:00	100	3,87	0
4	07:00	09:00	73,04	0	0
5	09:00	12:00	19,11	0	0
6	12:00	18:00	100	16,79	0
7	18:00	21:00	19,37	0	0
8	21:00	24:00	86,59	0	0

Verifica-se, inclusivamente, que nos períodos tarifários mais caros – períodos 5 e 7 – deve ligar-se somente uma bomba e que o tempo de operação é sensivelmente o mesmo para os dois casos, já que as durações desses períodos são de três horas. Para estes dois intervalos de tempo, conforme evidencia o quadro 5.2, tanto as alturas de água iniciais como finais se assemelham: este facto, se o leitor se recordar, resulta do que se referiu anteriormente quando se discutiram as restrições a que está sujeita a variável de controlo, isto é, os volumes elevados acumulados. Uma das imposições ao algoritmo optimizador é que no início dos períodos tarifários de ponta o volume de água no reservatório seja igual ao máximo e, no final desse período, seja o mínimo. Desta forma, está atestado o respeito da solução por essas condições.

Quadro 5.2 - Alturas de água iniciais e finais, por período, para o dia 8 de Janeiro de 2008, dadas pelo programa em Matlab.

Período	Hora		Altura de água (m)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
1	00:00	02:00	2,00	2,00
2	02:00	06:00	2,00	4,98
3	06:00	07:00	4,98	4,98
4	07:00	09:00	4,98	4,98
5	09:00	12:00	4,98	2,00
6	12:00	18:00	2,00	4,98
7	18:00	21:00	4,98	2,00
8	21:00	24:00	2,00	2,00

Analisando, agora, o quadro 5.3 que sintetiza a informação condizente com o quadro 5.1 e que acrescenta os custos inerentes ao funcionamento de cada uma das bombas, deduz-se que a fraca utilização da «Bomba 2» se deve ao seu accionamento estar dependente, por um lado, dos períodos horários em que o consumo de água por parte da rede de distribuição é mais elevado, não estando assegurado o cumprimento do nível mínimo de água no reservatório com a operação exclusiva de uma bomba e, por outro, graças à imposição de que seja atingido o nível máximo de água no início dos períodos tarifários de ponta. Por esta última razão se explica a necessidade em ligar uma segunda bomba durante o sexto período, pois é exigido que o nível de água atinja 4,98 m às dezoito horas.

Quadro 5.3 - Factores de utilização global de cada uma das bombas e respectivos custos, para o dia 8 de Janeiro de 2008, segundo o programa em Matlab.

Equipamento	Factor de utilização global (%)	Custo (€/dia)
Bomba 1	75,89	1676,95
Bomba 2	7,88	165,51
Bomba 3	0	0
Custo total		1842,46

Recuperando a analogia com o método do fio tenso anteriormente desenvolvida, representaram-se na figura 5.1 os volumes consumidos acumulados aos quais se adicionaram, num caso, a capacidade mínima do reservatório e, no outro, a capacidade máxima, cerca de 2027 m³ e 5047 m³

respectivamente. Foi também representada, no mesmo sistema de eixos, a curva dos volumes elevados acumulados pela estação elevatória.

Repare-se que, tal como seria de esperar, a curva a verde não ultrapassa, superiormente, a curva dos consumos acumulados adicionados da capacidade máxima do reservatório – o que seria indicador de não cumprimento do nível máximo de água nos RNV's – nem, inferiormente, a curva dos consumos acumulados adicionados da capacidade mínima do reservatório – situação para a qual o nível de água desceria além do mínimo pré-determinado.

Nota-se que em certos instantes a curva dos consumos elevados acumulados coincide com alguma das outras duas: às 09:00 e 18:00, que marcam o início dos dois períodos tarifários de ponta, esta curva iguala o limite superior. No final desses períodos, às 12:00 e 21:00, respectivamente, a mesma situação volta a verificar-se, desta feita para o limite inferior.

No fundo, o que acaba de se descrever é a representação gráfica das restrições de igualdade.

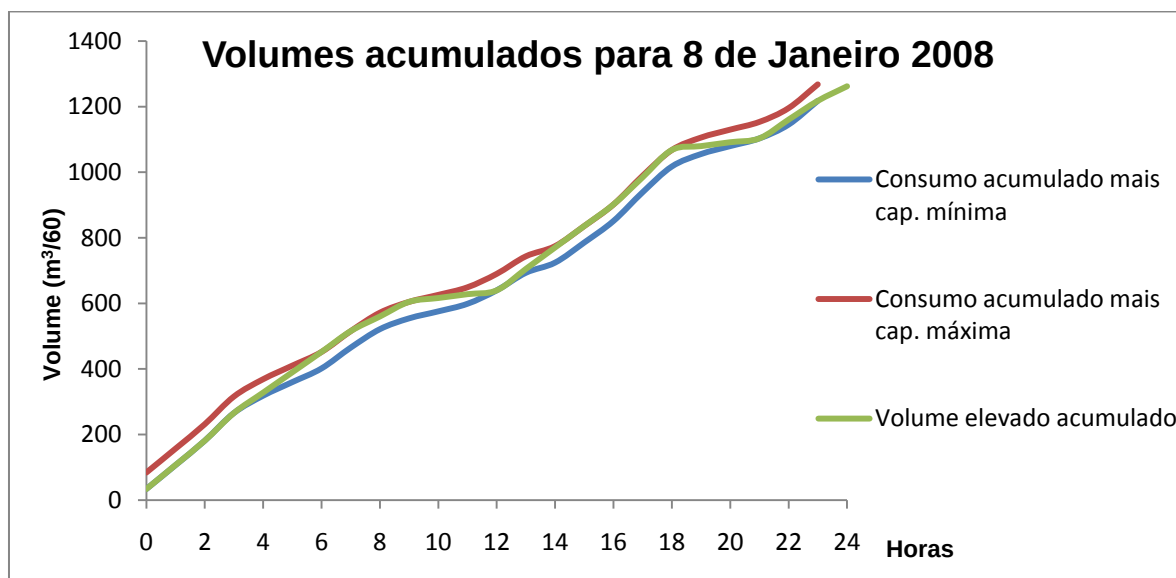


Figura 5.1 - Volumes consumidos e elevados acumulados, para o dia 8 de Janeiro de 2008, de acordo com o programa em Matlab.

5.2.1.2. Resultados obtidos após transposição para o Excel

No quadro 5.4, em comparação com o quadro 5.1, verifica-se que o método usado no Excel para determinar as alturas de água e os instantes que comandam o estado das bombas produziu resultados semelhantes. De resto, é natural que assim aconteça já que os caudais bombados por cada associação de grupos elevatórios considerados são os mesmos nos dois métodos.

Quadro 5.4 - Factores de utilização de cada bomba, por período, para o dia 8 de Janeiro de 2008, obtidos com o Excel.

Período	Hora		Factor de utilização (%)		
	Inicial	Final	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
1	00:00	02:00	100	20,65	0
2	02:00	06:00	100	10,80	0
3	06:00	07:00	100	3,87	0
4	07:00	09:00	73,04	0	0
5	09:00	12:00	19,11	0	0
6	12:00	18:00	100	16,79	0
7	18:00	21:00	19,37	0	0
8	21:00	24:00	86,59	0	0

No quadro 5.5 apresentam-se os valores dos níveis de água, calculados com o Excel, para os instantes iniciais e finais dos diversos períodos. É possível verificar que os resultados obtidos concordam, na totalidade, com os do quadro 5.2.

Quadro 5.5 - Alturas de água iniciais e finais para cada período, para o dia 8 de Janeiro de 2008, dadas pelo Excel.

Período	Hora		Altura de água (m)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
1	00:00	02:00	2,00	2,00
2	02:00	06:00	2,00	4,98
3	06:00	07:00	4,98	4,98
4	07:00	09:00	4,98	4,98
5	09:00	12:00	4,98	2,00
6	12:00	18:00	2,00	4,98
7	18:00	21:00	4,98	2,00
8	21:00	24:00	2,00	2,00

Ao comparar os quadros 5.6 e 5.3 verifica-se que há uma grande aproximação de resultados. De facto, tal é de esperar, já que na folha de cálculo do Excel foram usados os caudais e potências determinados pelo programa em Matlab através da *toolbox* relativamente a cada combinação de funcionamento das bombas. Desta forma, tanto os factores de utilização como os custos decorrentes do accionamento dos grupos elevatórios obtidos com o Excel se aproximam com grande rigor dos determinados pelo programa em Matlab.

Quadro 5.6 - Factores de utilização global de cada bomba, para o dia 8 de Janeiro de 2008, segundo os cálculos em Excel.

Equipamento	Factor de utilização global (%)	Custo (€/dia)
Bomba 1	75,89	1676,94
Bomba 2	7,88	165,48
Bomba 3	0	0
Custo total		1842,42

No anexo A3 podem ser consultados os valores horários obtidos para os tempos de utilização de cada uma das bombas, tanto para o dia 8 de Janeiro como para o dia 8 de Julho, depois de aplicada a metodologia desenvolvida com o Excel.

5.2.1.3. Resultados obtidos após simulação no Epanet

Com os resultados obtidos com o Excel escreveram-se, como desejado, os controlos com condições múltiplas (que se transcrevem no anexo A4) para permitir simular os resultados dados pelo programa em Matlab com o Epanet. Nesse contexto, nesta subsecção apresentam-se os resultados fornecidos pelo simulador hidráulico.

Analisando o quadro 5.7 verifica-se que o Epanet reproduziu com bastante aproximação os resultados calculados pelo Excel, pelo que a programação das bombas em função dos instantes da simulação se revelou adequada.

Quadro 5.7 - Alturas de água, nos instantes iniciais e finais de cada período, obtidas após simulação da rede com o Epanet, para o dia 8 de Janeiro de 2008.

Período	Hora		Altura de água (m)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
1	00:00	02:00	2,00	2,09
2	02:00	06:00	2,09	4,73
3	06:00	07:00	4,73	4,81
4	07:00	09:00	4,81	4,87
5	09:00	12:00	4,87	1,99
6	12:00	18:00	1,99	4,98
7	18:00	21:00	4,98	2,05
8	21:00	24:00	2,05	2,24

Por uma questão de facilidade de interpretação dos resultados representaram-se, na figura 5.2, as variações horárias das alturas de água no reservatório, calculadas através do Excel e do Epanet. Aquilo que a análise dos dados dos quadros 5.5 e 5.7 leva a concluir fica desta forma mais fácil de perceber. No geral, o Excel previu com bastante aproximação as alturas de água nos RNV's, para o instante inicial de cada hora, que o Epanet determinou durante a simulação hidráulica. Contudo, é natural que se verifiquem sempre algumas diferenças nos valores das alturas de água, pois os tempos de operação obtidos com o Excel têm a precisão do segundo, enquanto os controlos com condições múltiplas do Epanet permitem, no máximo, alterar o estado das bombas a cada minuto. Assim sendo,

para valores de operação dados pelo Excel que não sejam múltiplos de sessenta segundos, quando os resultados forem transpostos para esses controlos há que definir um intervalo de tempo de operação das bombas que, evidentemente, será superior ou inferior ao obtido no Excel.

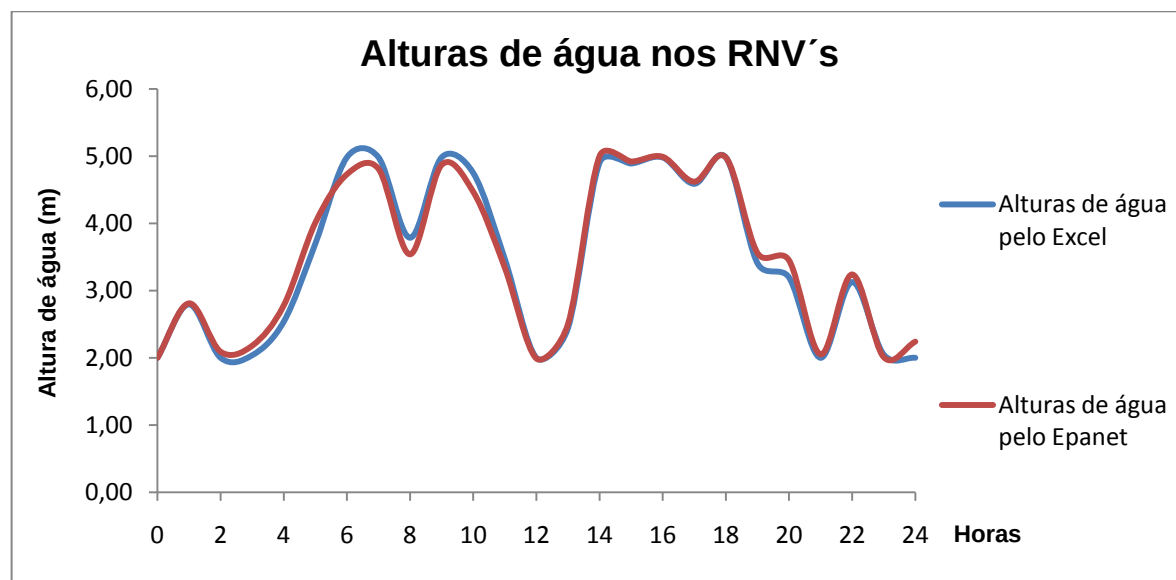


Figura 5.2 - Variação horária das alturas de água nos reservatórios, para o dia 8 de Janeiro de 2008, calculadas por dois processos diferentes.

O Epanet tem a possibilidade de disponibilizar, assim que terminada a simulação hidráulica, um relatório de energia. No quadro 5.8 reproduzem-se esses dados.

O custo total, em comparação com o determinado pelo programa, é um pouco superior devido, sobretudo, à «contribuição» da «Bomba 1», já que a potência máxima atingida por este equipamento provocou um considerável aumento do custo com a energia eléctrica consumida.

Quadro 5.8 - Relatório de energia dado pelo Epanet para a simulação do dia 8 de Janeiro de 2008.

Bomba	Factor de utilização (%)	Rendimento médio (%)	Energia/volume (kW.h/m ³)	Potência média (kW)	Potência máxima (kW)	Custo (€/dia)
1	74,20	81,46	3,83	1643,85	726801,60	1702,03
2	7,93	79,70	0,46	1492,04	1599,83	157,52
3	0	0	0	0	0	0
Custo total						1859,55

Quando se aborda a temática da optimização operacional de estações elevatórias, um dos aspectos a considerar é o número de accionamentos a que um grupo electrobomba está sujeito. Esta questão relaciona-se com o desgaste destes equipamentos, que se acentua com o número de arranques/paragens a que são submetidos. Desta forma, numa estação elevatória, para além de se procurar reduzir ao necessário os tempos de funcionamento das bombas, deve haver também o cuidado em distribuí-los equitativamente pelas várias unidades existentes na instalação.

A figura 5.3 traduz uma funcionalidade do Epanet onde é representado num sistema de eixos a variação temporal dos caudais consumidos pela rede de distribuição – a cor verde – e a variação temporal dos caudais elevados pela estação elevatória – a cor vermelha.

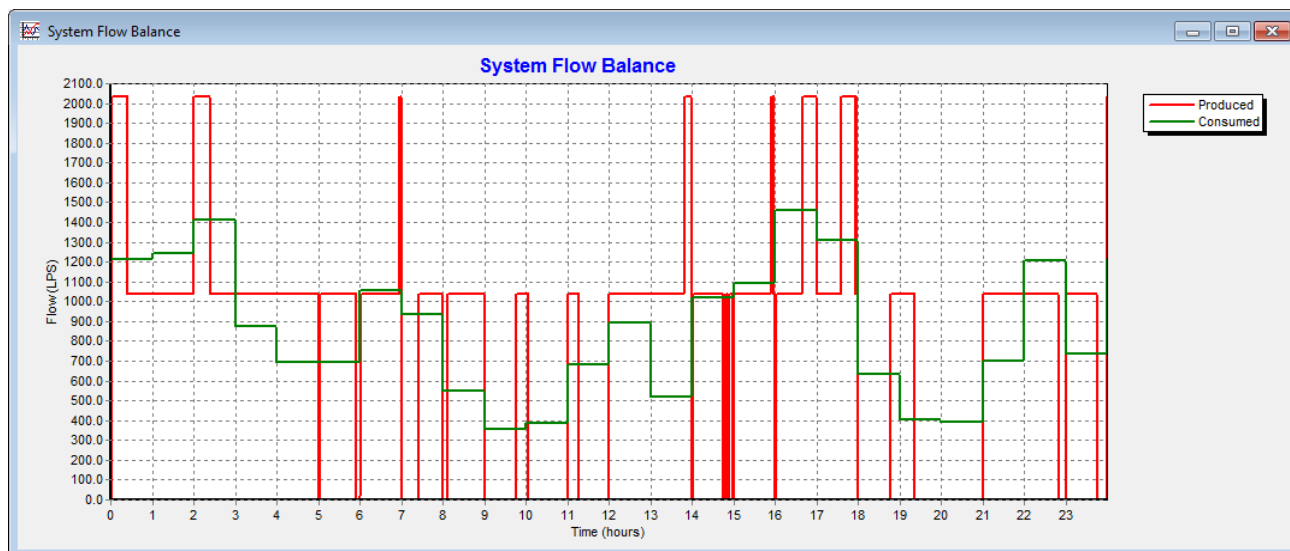


Figura 5.3 - Representação gráfica de caudais produzidos e caudais consumidos pelo sistema para o dia 8 de Janeiro de 2008.

O interesse da representação desta figura reside na facilidade com que permite que sejam avaliados os números de arranques e paragens dos grupos numa qualquer estação elevatória modelada.

A contagem é feita analisando a configuração da curva de caudais elevados, portanto, a curva vermelha. Desta forma, para este caso particular, nos intervalos de tempo em que as ordenadas são de valor superior a 2000 l/s significa que operam dois grupos elevatórios; quando o mesmo sucede, mas desta feita para valores da ordem dos 1000 l/s, está-se perante o funcionamento exclusivo de uma bomba. Naturalmente, quando a ordenada da curva vermelha desce até zero não há bombagem de qualquer caudal, pelo que todas as bombas estão inativas.

Seguindo este princípio, e designando por «Bomba 1» aquela que funciona durante a maior parte do tempo e por «Bomba 2» a que lhe é associada em paralelo para que se atinja o valor de maior caudal, quantificam-se dezoito arranques da «Bomba 1» e oito arranques da «Bomba 2». Apesar de a figura 5.3 não permitir contabilizar o número de arranques entre, sensivelmente, as 14:30 e as 15:00, analisou-se o gráfico com maior detalhe no Epanet e verificou-se que nesse período a «Bomba 1» é accionada cinco vezes. Este número de arranques e paragens concentrado num espaço de tempo relativamente curto é um exemplo dos problemas que podem ocorrer quando se pretende transpor a política operacional determinada pelo programa em Matlab para controlos com condições múltiplas do Epanet: para o sexto período, compreendido entre as 12:00 e as 18:00, o programa determinou que a «Bomba 1» deveria permanecer ligada durante a totalidade desse intervalo de tempo; no entanto, o nível de água no RNV não pode exceder o máximo definido, neste caso 4,98 metros. Ora, são justamente estas duas condições que entram em conflito durante aquele intervalo de tempo, pois durante a simulação hidráulica com o Epanet o nível de água nos RNV's atinge em vários momentos o nível 4,98 metros, obrigando à paragem da «Bomba 1». Contudo, como os controlos escritos obrigam a que essa bomba permaneça sempre ligada nesse período, basta que o nível de água desça abaixo do valor máximo para que o seu estado seja alterado automaticamente, repetindo-se este ciclo quatro

vezes. A partir das 15:00 este fenómeno deixa de acontecer em virtude de o consumo de água por parte da rede de distribuição ser significativamente superior ao da hora precedente, o que impossibilita que o funcionamento exclusivo de uma só bomba faça elevar o nível de água no RNV até ao seu máximo.

Recuperando o trabalho de Ana Costa (2009), para este mesmo dia – mesmos consumos de água e iguais características dos grupos electrobomba – obtiveram-se sete arranques para um dos grupos e quatro arranques para outro. Este facto está em concordância com o observado por alguns investigadores que apontam a introdução do parâmetro de qualidade da água na função objectivo como despoletador de políticas operacionais com numerosos arranques e paragens dos grupos elevatórios.

Neste caso particular, como a estação elevatória possui ainda uma bomba que não se revelou necessária para satisfazer os volumes de água consumidos pela rede, é possível «redistribuir» os tempos de funcionamento pelas três bombas instaladas.

5.2.1.4. A qualidade da água avaliada pela concentração de cloro

Para facilitar a observação dos resultados referentes ao valor da concentração de cloro no nó à saída do reservatório, optou-se por representar graficamente os seus valores – figura 5.4. Os valores poderão ser consultados, sob a forma de quadro, no anexo A2.

A curva a azul representa os valores horários de concentração de cloro à saída do reservatório, previstos pelo programa em Matlab, correspondentes à solução optimizada.

Para a execução da simulação hidráulica no Epanet adoptou-se como passo de cálculo da qualidade da água (*quality time step*) o valor de um minuto. Desta forma, a cada intervalo de tempo com esta grandeza o Epanet calcula o valor da concentração de cloro na água em todos os nós da rede. Os resultados que a figura 5.4 apresenta correspondem à média horária dos valores observados durante o intervalo de tempo de uma hora terminado no instante ao qual é associada essa concentração. A curva em questão é identificada, na figura 5.4, com a cor vermelha.

Como atrás foi clarificado quando se expôs a forma como o programa calcula o valor da concentração de cloro à saída do reservatório, faz-se nessa etapa uso de uma função da *toolbox* que permite executar, por comando através do Matlab, uma simulação hidráulica com o Epanet com a qual se determinam os valores de concentração de cloro à entrada do reservatório. Ora, sucede que essa função executou, para um período de simulação de 24 horas, 40 075 cálculos de qualidade da água, o que, em média, significa um novo cálculo a cada 0,090 segundos.

Achou-se então interessante comparar os resultados obtidos com o Epanet (propriamente dito) com os estimados pelo Epanet «via» Matlab. Também neste caso os resultados apresentados a cada hora correspondem à média horária do valor de concentração de cloro à saída dos reservatórios.

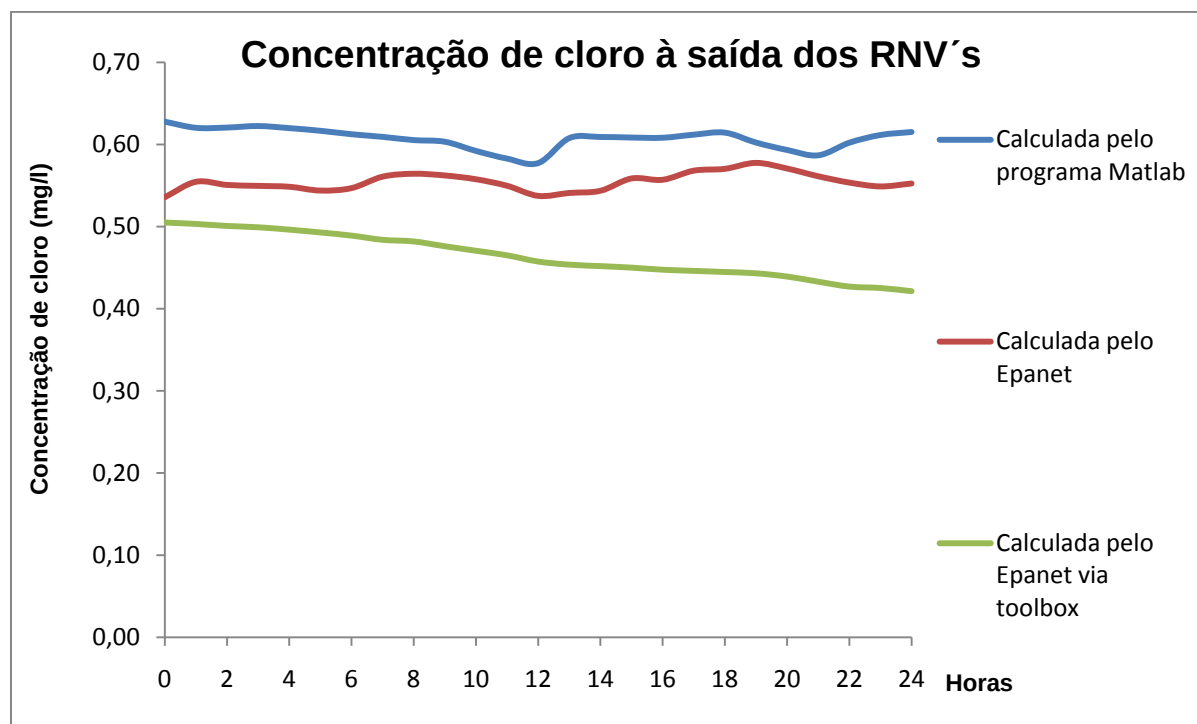


Figura 5.4 - Variação da concentração de cloro à saída dos reservatórios, para o dia 8 de Janeiro de 2008, avaliada por três processos distintos.

Após análise da figura 5.4 percebe-se que os resultados obtidos com o programa apresentam um ligeiro desfasamento em relação aos do Epanet. Para esta realidade em muito contribui o facto de o Epanet efectuar cálculos com intervalos de um minuto e o modelo programado tratar os dados de hora a hora. Apesar disso, o modelo adoptado mostra-se revelador da «verdadeira» evolução do valor daquele parâmetro ao longo do tempo, já que a semelhança da configuração das duas curvas é evidente.

Em relação aos resultados obtidos a partir da *toolbox* é curioso verificar a discrepância face aos calculados pelo Epanet, sendo que a curva a verde denota, sobretudo, uma diminuição contínua do valor da concentração de cloro; ao passo que o programa propriamente dito pressupõe, em vários momentos, o crescimento da concentração daquela substância.

Uma outra funcionalidade do Epanet relacionada com a simulação de qualidade da água é visualização, em forma de gráfico, da quantidade média de cloro (ou outra substância não conservativa) perdida nas reacções no seio do fluido, nas interfaces do escoamento (tubagens e paredes de reservatórios) e, finalmente, nos reservatórios.

Esta função designa-se por relatório de reacção – *reaction report* - e a sua aplicação aos dados do dia 8 de Janeiro de 2008 encontra-se na figura 5.5.

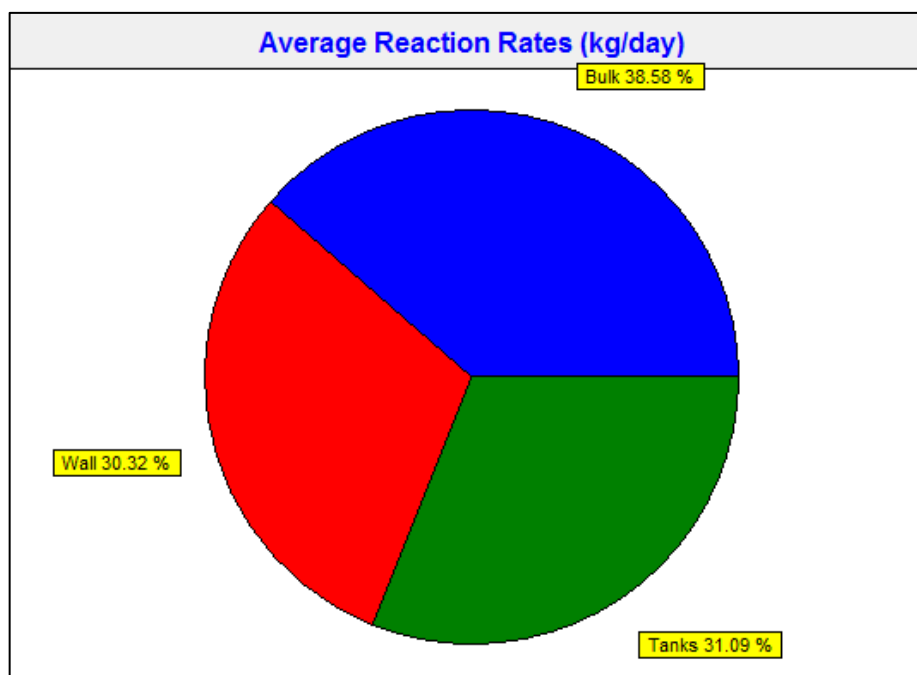


Figura 5.5 - Relatório de reacção do Epanet para o dia 8 de Janeiro de 2008.

Pela figura 5.5 pode concluir-se que a perda de cloro se distribui de forma bastante repartida pelas três componentes consideradas, sendo, contudo, as reacções estabelecidas entre o cloro e outras espécies químicas no seio do escoamento as maiores responsáveis pelo decaimento daquela substância, com um valor de 38,58 %. Logo de seguida, os dois reservatórios da rede contribuem com 31,09 % da perda de cloro, cujo valor não difere muito do atribuído às reacções entre o fluido e as «paredes» do sistema: 30,32 %.

5.2.2. RESULTADOS PARA O DIA 8 DE JULHO DE 2008

5.2.2.1. Resultados obtidos com o programa em Matlab

Tal como para o dia 8 de Janeiro, também neste caso não se mostrou necessário accionar uma terceira bomba – quadro 5.9.

Quadro 5.9 - Factores de utilização das bombas, dados pelo programa em Matlab, para o dia 8 de Julho de 2008.

Período	Hora		Factor de utilização (%)		
	Inicial	Final	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
1	00:00	02:00	100	42,24	0
2	02:00	06:00	100	50,38	0
3	06:00	07:00	100	8,82	0
4	07:00	09:00	85,66	0	0
5	09:00	12:00	22,90	0	0
6	12:00	24:00	100	10,62	0

Pelo quadro 5.10 novamente se conclui que a solução respeita a restrição de igualdade imposta pelo programa ao definir que no instante inicial do período de ponta – quinto período - a altura de água seja igual ao nível máximo pretendido – 4,98 metros – e que durante esse período os grupos elevatórios operem durante o menor intervalo de tempo possível, fazendo coincidir o nível final de água no reservatório com o nível mínimo – 2 metros.

Constata-se igualmente que, sendo o quarto período um período tarifário «cheio» – aquele, a seguir ao período de ponta, em que a tarifa energética é mais elevada – o tempo de funcionamento da «Bomba 1» só não foi inferior porque havia a necessidade de, pelo exposto no parágrafo anterior, se atingir o nível pleno de água no final desse período.

Quadro 5.10 - Alturas de água iniciais e finais, por período, para o dia 8 de Julho de 2008, dadas pelo programa em Matlab.

Período	Hora		Altura de água (m)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
1	00:00	02:00	2,00	2,00
2	02:00	06:00	2,00	3,86
3	06:00	07:00	3,86	4,98
4	07:00	09:00	4,98	4,98
5	09:00	12:00	4,98	2,00
6	12:00	24:00	2,00	2,00

Como é típico, nos meses de Verão o consumo de água por parte das populações é superior, daí verificar-se no quadro 5.11, naturalmente, um acréscimo de ambos os factores de utilização global das bombas quando comparados com os resultados obtidos para o dia 8 de Janeiro.

Quadro 5.11 - Factores de utilização global para cada uma das bombas e respectivos custos, para o dia 8 de Julho de 2008, segundo o programa em Matlab.

Equipamento	Factor de utilização global (%)	Custo (€/dia)
Bomba 1	89,17	2061,70
Bomba 2	17,59	344,00
Bomba 3	0	0
Custo total		2405,70

A figura 5.6 ilustra a solução de volumes elevados acumulados optimizada pelo programa e, o facto de a curva que representa esse parâmetro, identificada a verde, ser em largos períodos de tempo coincidente com a curva dos consumos acumulados adicionados da capacidade mínima do reservatório comprova a busca, por parte do programa, de uma política que minimize os custos energéticos: significa que durante a maior parte do tempo os volumes elevados foram os estritamente necessários para assegurar o nível mínimo de água no reservatório.

Tal como seria de esperar, às 9:00 os volumes elevados acumulados igualam o limite superior (curva vermelha) e às 12:00 o limite inferior (curva azul).

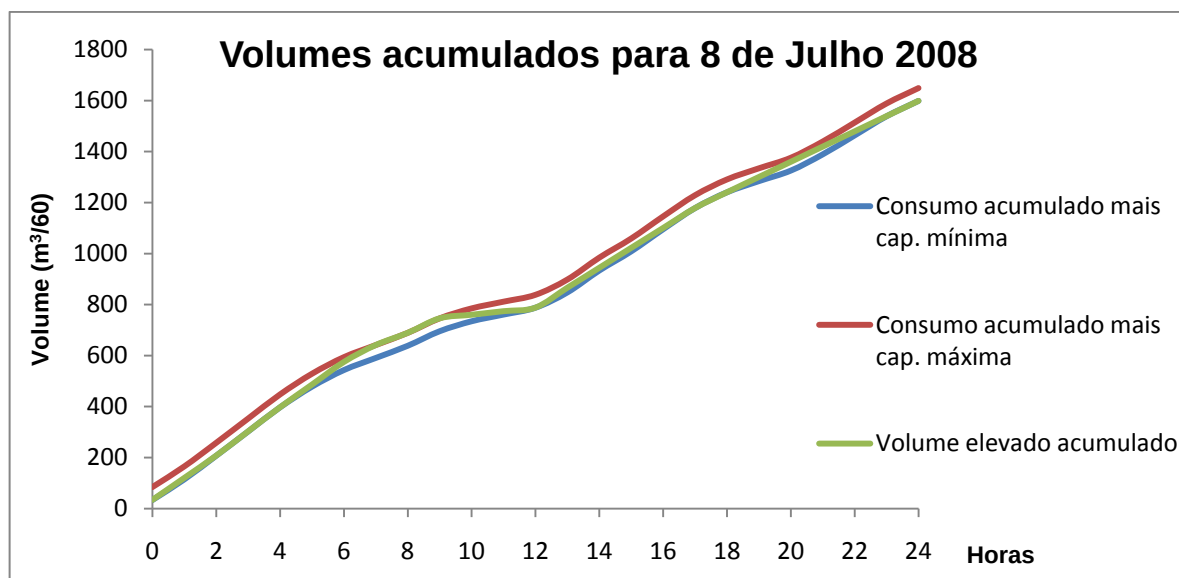


Figura 5.6 - Volumes consumidos e elevados acumulados, para o dia 8 de Julho de 2008, de acordo com o programa em Matlab.

5.2.2.2. Resultados obtidos após transposição para o Excel

O quadro 5.12, em comparação com o quadro 5.9, mostra ligeiras diferenças em alguns dos factores de utilização das bombas. Para este dia 8 de Julho, o método em Excel não foi capaz de produzir resultados tão aproximados dos do programa em Matlab como aconteceu para o dia 8 de Janeiro.

Quadro 5.12 - Factores de utilização de cada bomba, por período, para o dia 8 de Julho de 2008, obtidos com o Excel.

Período	Hora		Factor de utilização (%)		
	Inicial	Final	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
1	00:00	02:00	100	42,24	0
2	02:00	06:00	100	50,38	0
3	06:00	07:00	100	8,82	0
4	07:00	09:00	85,66	0	0
5	09:00	12:00	22,95	0	0
6	12:00	24:00	98,01	12,70	0

Mesmo assim, as diferenças não são suficientes para alterar as alturas de água iniciais e finais para cada período tarifário, com excepção da altura de água para o fim da vigésima quarta hora – veja-se o quadro 5.13.

Quadro 5.13 - Alturas de água iniciais e finais para cada período, para o dia 8 de Julho de 2008, dadas pelo Excel.

Período	Hora		Altura de água (m)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
1	00:00	02:00	2,00	2,00
2	02:00	06:00	2,00	3,86
3	06:00	07:00	3,86	4,98
4	07:00	09:00	4,98	4,98
5	09:00	12:00	4,98	2,00
6	12:00	24:00	2,00	2,04

De uma maneira geral, os factores de utilização global das bombas são próximos aos dados pelo programa em Matlab, observando-se neste caso uma diminuição do valor referente à «Bomba 1» e um aumento do respeitante à «Bomba 2» – quadro 5.14. Resultado desta ligeira diferença, o custo total diário calculado com o Excel é superior em 1,33 € ao estimado pelo programa escrito em Matlab.

Quadro 5.14 - Factores de utilização global de cada bomba, para o dia 8 de Julho de 2008, segundo o método desenvolvido em Excel.

Equipamento	Factor de utilização global (%)	Custo (€/dia)
Bomba 1	88,18	2036,15
Bomba 2	18,63	370,88
Bomba 3	0	0
Custo total		2407,03

5.2.2.3. Resultados obtidos após simulação no Epanet

Ao comparar as alturas de água calculadas com o Excel (ver quadro 5.13) com as obtidas após a simulação da rede com o Epanet, que se apresentam em baixo no quadro 5.15, percebe-se que para este dia os resultados não coincidem totalmente. A razão que explica o sucedido foi já mencionada quando se apresentaram os mesmos resultados respeitantes ao dia 8 de Janeiro de 2008.

Quadro 5.15 - Alturas de água, nos instantes iniciais e finais de cada período, obtidas após simulação da rede com o Epanet, para o dia 8 de Julho de 2008.

Período	Hora		Altura de água (m)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
1	00:00	02:00	2,00	2,05
2	02:00	06:00	2,05	4,02
3	06:00	07:00	4,02	4,98
4	07:00	09:00	4,98	4,98
5	09:00	12:00	4,98	2,07
6	12:00	24:00	2,07	2,65

No entanto, a quase coincidência, durante a maior parte do tempo, das curvas que ilustram as variações horárias das alturas de água nos reservatórios, presentes na figura 5.7, permitem, por si só, chegar à conclusão de que existe uma elevada compatibilidade dos resultados calculados por estes dois métodos distintos. Os controlos com condições múltiplas estabelecidos para este dia encontram-se transcritos no anexo A5.

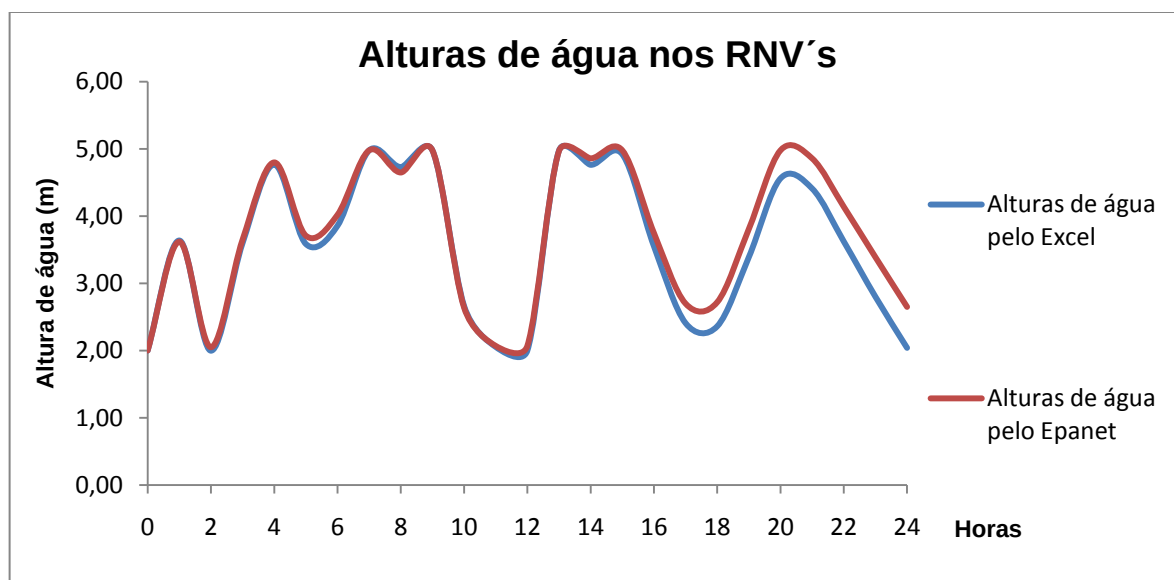


Figura 5.7 - Variação horária das alturas de água nos reservatórios, para o dia 8 de Julho de 2008, calculadas por dois processos diferentes.

Apesar da grande sobreposição das duas curvas, o relatório de energia do Epanet, reproduzido no quadro 5.16, mostra um valor de custo diário significativamente inferior (em cerca de 60 €) ao dado pelo Excel: 2347,40 € e 2407,03 €, respectivamente.

O que contribui para a situação observada é a menor utilização da «Bomba 1», pois os factores de utilização global da «Bomba 2», quer de um quer de outro método, são muito próximos.

Quadro 5.16 - Relatório de energia dado pelo Epanet para a simulação do dia 8 de Julho de 2008.

Bomba	Factor de utilização (%)	Rendimento médio (%)	Energia/volume (kW.h/m ³)	Potência média (kW)	Potência máxima (kW)	Custo (€/dia)
1	86,58	81,66	0,43	1583,50	1600,08	1992,01
2	18,64	80,47	0,45	1524,86	1599,83	355,39
3	0	0	0	0	0	0
Custo total						2347,40

A figura 5.8 contém o balanço de caudal da rede fornecido pelo Epanet. Seguindo o mesmo raciocínio aplicado para os mesmos dados relativos ao dia 8 de Janeiro, podem-se contar o número de arranques dos grupos elevatórios.

Assim, verifica-se que a «Bomba 1» possui treze arranques e a «Bomba 2» onze arranques. Em comparação com o dia de Janeiro, a «Bomba 1» vê reduzido em cinco o seu número de arranques, enquanto a «Bomba 2» deve ser ligada um número de vezes superior em três unidades.

Pela razão já explicitada quando se apresentou a figura 5.3, também neste dia se verificou um número de arranques/paragens elevado para um intervalo de tempo reduzido, nomeadamente entre as 6:00 e as 7:00. Mais uma vez, o tamanho da figura 5.8 não permite contabilizar o número de arranques da «Bomba 1» no período mencionado. Contudo, o Epanet permite pormenorizar a visualização do gráfico, pelo que através dessa funcionalidade se conseguiram contar quatro arranques da «Bomba 1» naquele período.

Para este dia, Ana Costa (2009) obteve cinco arranques para a «Bomba 1» e dois arranques para a «Bomba 2».

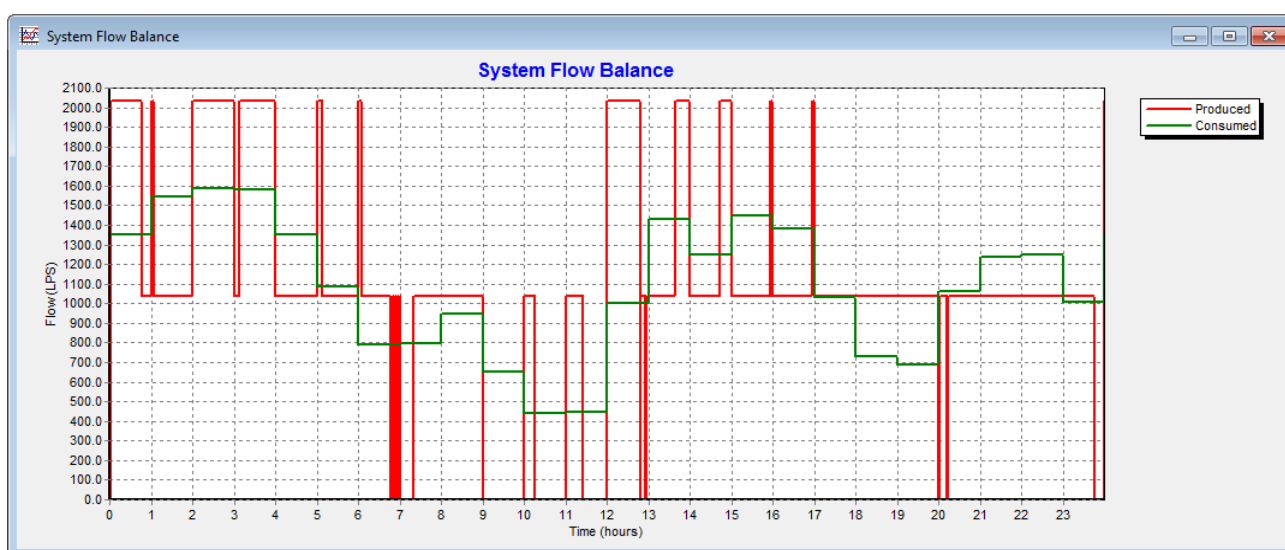


Figura 5.8 - Representação gráfica de caudais produzidos e caudais consumidos pelo sistema para o dia 8 de Julho de 2008.

5.2.2.4. A qualidade da água avaliada pela concentração de cloro

Finalmente, apresentam-se na figura 5.9 as três curvas representativas da evolução temporal da concentração de cloro, no nó à saída dos reservatórios de Adães, obtidas por cada um dos processos já referidos.

O discutido na secção 5.2.1.4, quando se expuseram os mesmos resultados para o dia 8 de Janeiro, continua a ter validade: os valores da concentração obtidos pelo programa em Matlab são estimados em excesso quando comparados com os calculados pelo Epanet. Apesar disso, mais uma vez fica demonstrado que a configuração das duas curvas é semelhante, pelo que este método pode ser utilizado, pelo menos, na aquisição de uma perspectiva da evolução dos valores daquele parâmetro para qualquer cenário de exploração ponderado.

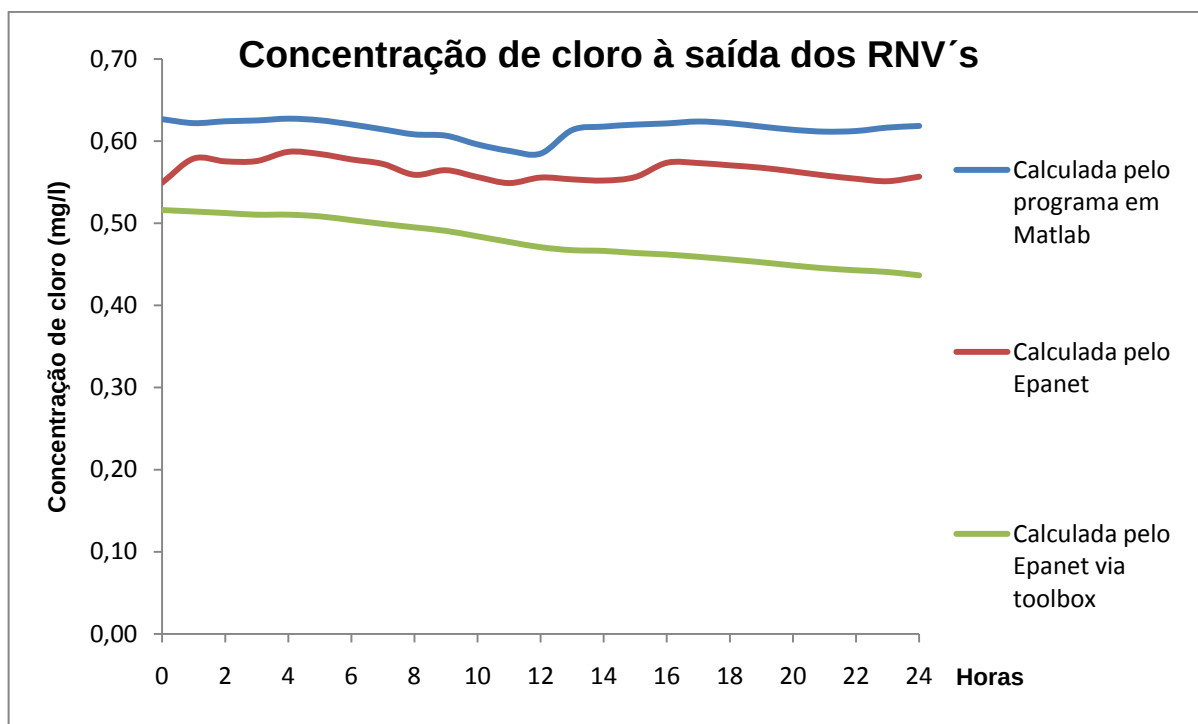


Figura 5.9 - Variação da concentração de cloro à saída dos reservatórios, para o dia 8 de Julho de 2008, avaliada por três processos distintos.

O relatório de reacção para este dia apresenta-se na figura 5.10.

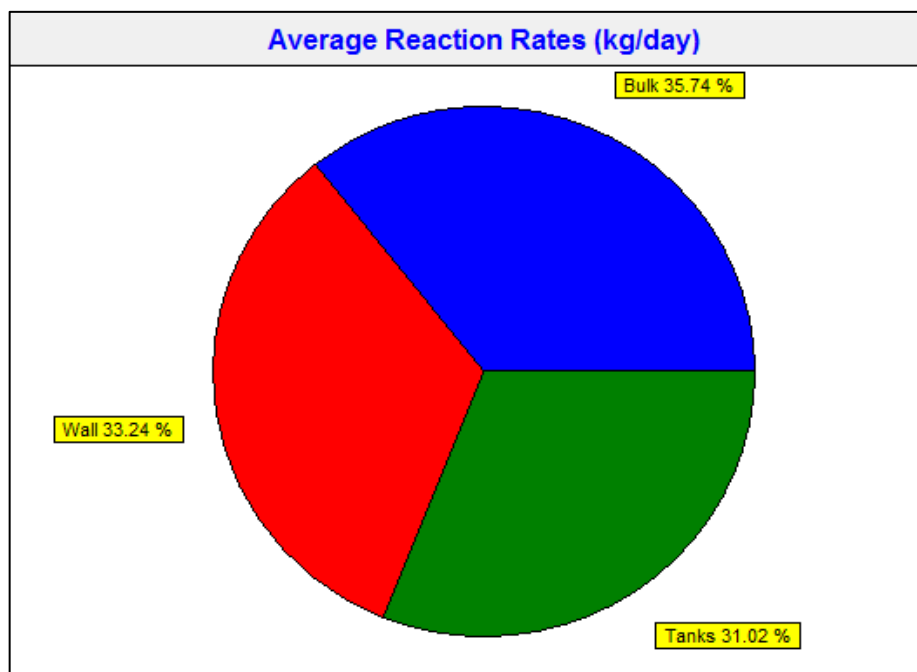


Figura 5.10 - Relatório de reacção do Epanet para o dia 8 de Julho de 2008.

Confrontando este relatório de reacção com o criado para o dia 8 de Janeiro, nota-se, sobretudo, um aumento das perdas nas «paredes» do sistema, passando este valor de 30,32% para 33,24%.

No seio do escoamento houve um decréscimo de perdas: para o dia de Janeiro o valor foi igual a 38,58%; para este dia de Julho é 35,74%.

Houve igualmente decréscimo, neste caso ínfimo, nas perdas de cloro nos RNV's, desta feita de 31,09% para 31,02%, sendo o menor valor referente a este dia de Julho.

5.3. COMENTÁRIO AOS RESULTADOS E DISCUSSÃO DE CENÁRIOS ALTERNATIVOS

Apesar de não se enquadrar no âmbito deste trabalho a consideração de um conjunto de cenários diferenciados entre si pelas várias combinações possíveis de «pesos» atribuídos a cada uma das parcelas intervenientes na função objectivo, ou da concentração de cloro de referência à saída dos RNV's, é oportuno discutir alguns aspectos relacionados com os resultados fornecidos pelo programa para alguns casos genéricos.

Neste estudo, tanto para o dia 8 de Janeiro de 2008 como para o dia 8 de Julho de 2008 foram procuradas as políticas operacionais óptimas para fazer face aos consumos médios diários verificados pela AdC nesses mesmos dias.

Definiu-se que as três parcelas que compõe a função objectivo assumiriam a mesma preponderância na procura, por parte do algoritmo optimizador, dos valores ideais para os volumes horários de água a bombear. Seguindo este raciocínio, atribuiu-se a cada «peso» da função objectivo a mesma grandeza, de valor unitário.

Se, no entanto, fosse atribuído um maior «destaque» à parcela da qualidade da água, um «peso» igual a 1000, por exemplo, os resultados seriam semelhantes. Esta situação verifica-se porque os novos volumes horários elevados se aproximam com bastante exactidão dos determinados na situação inicial. Ora, isto acontece porque as restrições que impõem os níveis de água no RNV nos instantes iniciais e finais dos períodos tarifários de ponta, às quais se junta uma reduzida capacidade de regularização do reservatório - a altura útil de água é de 2,98 m – limitam bastante o espaço de soluções admissíveis para o problema.

Da mesma forma, mantendo o «peso» daquela parcela e baixando o valor da concentração de cloro de referência para 0,50 mg/l, depara-se com o mesmo custo diário de operação do sistema. Desta feita, os resultados obtidos implicam que para os dois casos, isto é, a solução original e esta alternativa, os valores da concentração de cloro à saída do RNV sejam iguais, evidenciando que a relação entre a capacidade útil de armazenagem do RNV e os consumos da rede de distribuição não permitem ao algoritmo encontrar uma política operacional que, ao reduzir o caudal de água entrado no reservatório, contribua para a aceleração do decréscimo da concentração da substância no interior do RNV.

O programa pode revelar-se igualmente interessante na eventualidade de se pretender determinar, por exemplo, os ganhos económicos caso se altere o nível mínimo de água no reservatório ou mesmo a sua dimensão. Tomando os consumos e o tarifário energético do dia 8 de Julho de 2008 como ponto de partida, imaginando que se quer conhecer a poupança com a energia eléctrica e as implicações a nível de concentração de cloro com a relaxação do limite mínimo de água no RNV em um metro, ou seja, estabelecendo uma altura útil de água de 3,98 metros, definiu-se como «peso» da parcela da qualidade o valor 1000, ao passo que aos outros foi atribuído o valor 1; a concentração de referência de cloro à saída do reservatório continua a inalterada, isto é, 0,60 mg/l. Os resultados do programa para este cenário «apontam» para um custo diário de 2392,17 €, o que materializa uma poupança de 13,53 € por

dia. Dado a diferença ser tão escassa, os valores de concentração de cloro praticamente não sofreram alterações.

6

CONCLUSÕES

O programa desenvolvido neste estudo, apesar de não dispor do modelo de qualidade da água ideal, tem a virtude de constituir uma abordagem simples, elaborada com ferramentas acessíveis a qualquer entidade gestora de um sistema de adução e/ou distribuição de água, munindo as suas equipas técnicas de uma aplicação interessante na estimativa das consequências, em termos da qualidade da água, de várias políticas operacionais.

Os fenómenos que regem a evolução da concentração do cloro dissolvido na água são complexos e não totalmente dominados pelo conhecimento científico, o que torna aconselhável a determinação, a mais rigorosa possível, das suas constantes de decaimento no seio do escoamento e nas interfaces do fluido com os componentes físicos do sistema.

Na verdade, um princípio fundamental para considerar válidos os resultados da simulação hidráulica de uma rede de transporte e distribuição de água é o conhecimento, à partida, se essa rede se encontra devidamente calibrada. De facto, desvios na atribuição das rugosidades das tubagens, erros entre diâmetros efectivos e diâmetros utilizados na simulação ou a consideração de cotas dos nós da rede não representativas das da rede verdadeira, conduzirão a resultados desfasados da realidade, quer do ponto de vista hidráulico, quer da própria qualidade da água.

Neste trabalho, a evolução da concentração de cloro ao longo das vinte e quatro horas da simulação foi apresentada através de três formas distintas. Pretendeu-se, assim, comparar os resultados estimados pelo modelo de qualidade da água escrito no programa em Matlab com os de um modelo de qualidade mais «exacto», isto é, o modelo de qualidade do próprio Epanet. Como foi oportunamente referido, partiu-se para a realização deste estudo com a ideia de incorporar, no programa que foi desenvolvido, o modelo de qualidade daquele simulador hidráulico. Contudo, tal não foi inteiramente possível, já que desde a ETA até à entrada dos reservatórios são utilizados dados provenientes do módulo de qualidade do Epanet, sendo o decaimento do cloro nos reservatórios, aí sim, calculado por um modelo de qualidade especialmente desenvolvido para este caso.

A curva representada a verde nas figuras 5.4 e 5.9, baseada nos valores de concentração de cloro à saída dos reservatórios obtidos pelo Epanet «via» *toolbox*, foi incluída a título de «curiosidade». Quis-se conhecer, dessa forma, a influência que o passo de cálculo, no mesmo modelo de qualidade (o do Epanet), tem nos resultados providenciados por um determinado modelo. É exactamente esse aspecto que distingue os resultados das curvas a vermelho dos resultados das curvas a verde.

À partida não se pode referir, de entre os vários métodos apresentados, que um é mais próximo da realidade do fenómeno de decaimento de cloro do que outro. Para se atingir esse grau de conhecimento seria necessário possuir um modelo hidráulico e de qualidade, do sistema adutor, devidamente calibrado. Nessa situação, confrontando os valores determinados por cada um dos métodos com análises feitas à água efluente dos reservatórios, estar-se-ia, por fim, em condições de ajuizar a bondade de cada um dos modelos utilizados.

Assim sendo, o autor sugere que futuros trabalhos desenvolvidos nesta área incidam sobre a avaliação do comportamento de um sistema adutor quando submetido a políticas operacionais estabelecidas por programas optimizadores semelhantes ao que foi desenvolvido no âmbito deste trabalho. O interesse de um estudo desse género, para além de permitir verificar a adequação do modelo de qualidade da água reside, ainda, em testar o modo como é afectada a política operacional da estação elevatória, ao longo do dia, face a consumos de água que se «desviem» dos valores horários médios considerados pelo programa para a determinação da solução proposta.

Nesse contexto, outro campo de investigação interessante é o de algoritmos optimizadores que monitorizem a rede em tempo real e que consoante os dados recolhidos ajustem, progressivamente, a política operacional mais económica.

Por tudo o que se referiu, conclui-se que cada sistema estudado deve ser tratado como um caso único, de preferência por equipas internas das entidades gestoras. Estas, por se encontrarem mais próximas do conhecimento das características e particularidades de cada rede, estão numa posição mais favorável para lidar com os problemas surgidos a cada etapa dos processos de planeamento, exploração ou remodelação das infra-estruturas, podendo valer-se do uso consciente de ferramentas como esta para facilitar os processos de tomada de decisão.

BIBLIOGRAFIA

Albuquerque, A. A. (2007). *Análises e métodos de otimização para eficiência energética de estações elevatórias em sistemas de abastecimento de água*. Dissertação de Doutoramento em Recursos Naturais, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

Almeida, R., Barbosa, P. *Comparação de políticas operativas para a redução de custos de bombeamento em redes de distribuição de água*. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Coelho, S., Loureiro, D., Alegre, H. (2006). *Modelação e análise de sistemas de distribuição de água*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Costa, A. (2009). *Eficiência económica na operação de estações elevatórias de abastecimento de água*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (2009a). *Despacho nº 21/2009*, Portugal.

Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, (2009b). *Regulamento Tarifário do Sector Eléctrico*, Portugal.

Filho, L. (2006). *Um modelo de operação de sistemas adutores de abastecimento de água com vistas a minimização dos custos energéticos*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

Goldman, F. E., Sakarya, A. B., Ormsbee, L. E., Uber, J. G., Mays, L. W. (2000). Optimization Models for Operations. In *Water Distribution Systems Handbook*, American Water Works Association, McGraw-Hill, Nova Iorque, pp. 16.1-16.47.

Júnior, A., Oliveira, M. (2006). *Otimização de bombeamento com algoritmos genéticos e previsor de nível nas próximas 24 horas*. Seminário Iberoamericano sobre sistemas de abastecimento urbano de água, 5-7 de Junho de 2006, João Pessoa, Brasil.

Lima, L. (2009). *Modelação da qualidade da água numa rede de distribuição – estudo do comportamento do cloro e da formação de trihalometanos*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Loureiro, D., Coelho, S. (2002). *Manual do utilizador do Epanet 2.0 – simulação hidráulica e de parâmetros de qualidade em sistemas de transporte e distribuição de água*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Meyer, S. (1994). *O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública*. Cadernos de Saúde Pública, Janeiro/Março de 1994, Rio de Janeiro, pp. 99-110, Rio de Janeiro.

Ministério do Ambiente (1998). *Decreto - Lei nº 236/98 de 1 de Agosto*. Diário da República, I Série – A – Nº 176 – 1 de Agosto de 1998, Lisboa.

Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional (2007). *Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto*. Diário da República, 1ª série – N.º 164 – 27 de Agosto de 2007, Lisboa.

Ministério da Economia e da Inovação (2008). *Decreto-Lei nº 71/2008 de 15 de Abril*. Diário da República, 1ª série – Nº 74 – 15 de Abril de 2008, Lisboa.

Ormsbee, L. E.; Lansey, K. E. (1994). *Optimal Control of Water Supply Pumping Systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 120, Nº 2, pp. 237-252.

Ozdemir, O., Ucak, A. (2002). *Simulation of chlorine decay in drinking-water distribution systems*. Journal of Environmental Engineering, Vol. 128, Nº 1, 1de Janeiro de 2002, American Society of Civil Engineers.

Quintela, A. C. (1981). *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Ribeiro, A. (1987). *Hidrologia – Águas superficiais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Robescu, D. Jivan, N., Robescu D. (2008). *Modelling chlorine decay in drinking water mains*. Environmental Engineering and Management Journal, Novembro/Dezembro de 2008, pp. 737-741, Bucureste.

Sá Marques, J. A. A., Oliveira Sousa, J. J. (2008). *Hidráulica Urbana – Sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Tenreiro Monteiro, P. *Aula teórica nº 2 de Sistemas de Drenagem Urbana*. Documento elaborado no âmbito da actividade docente na FEUP, Porto.

Valente Neves, M. *Tratamento de águas de abastecimento – apontamentos*. Texto de apoio no âmbito da actividade docente na FEUP, Porto.

<http://www.adp.pt>, Maio de 2010

<http://www.addp.pt>, Maio de 2010

<http://www.aguas-cavado.pt> , Maio e Junho de 2010

<http://www.epal.pt>, Maio de 2010

ANEXOS

- Anexo A1:** Concentrações de cloro à entrada dos RNV's
- Anexo A2:** Concentrações de cloro à saída dos RNV's
- Anexo A3:** Tempos de utilização das bombas
- Anexo A4:** Controlos com condições múltiplas para o dia 8 de Janeiro de 2008
- Anexo A5:** Controlos com condições múltiplas para o dia 8 de Julho de 2008
- Anexo A6:** Tarifários energéticos escritos em ficheiros *txt* (*bloco de notas*)
- Anexo A7:** Funções da *toolbox* usadas

Quadro A1.1 – Concentração média horária de cloro à entrada dos RNV's obtida por dois processos distintos.

Concentração de cloro para o dia 8 de Janeiro de 2008 (mg/l)		
Método		
Hora	Epanet	Epanet via <i>toolbox</i>
0	0,591	0,620
1	0,597	0,628
2	0,580	0,628
3	0,602	0,629
4	0,594	0,630
5	0,595	0,628
6	0,597	0,627
7	0,590	0,627
8	0,581	0,622
9	0,586	0,627
10	0,583	0,620
11	0,567	0,617
12	0,566	0,618
13	0,564	0,624
14	0,588	0,627
15	0,598	0,624
16	0,580	0,627
17	0,599	0,629
18	0,600	0,630
19	0,602	0,628
20	0,591	0,623
21	0,578	0,613
22	0,563	0,620
23	0,579	0,628
24	0,592	0,629

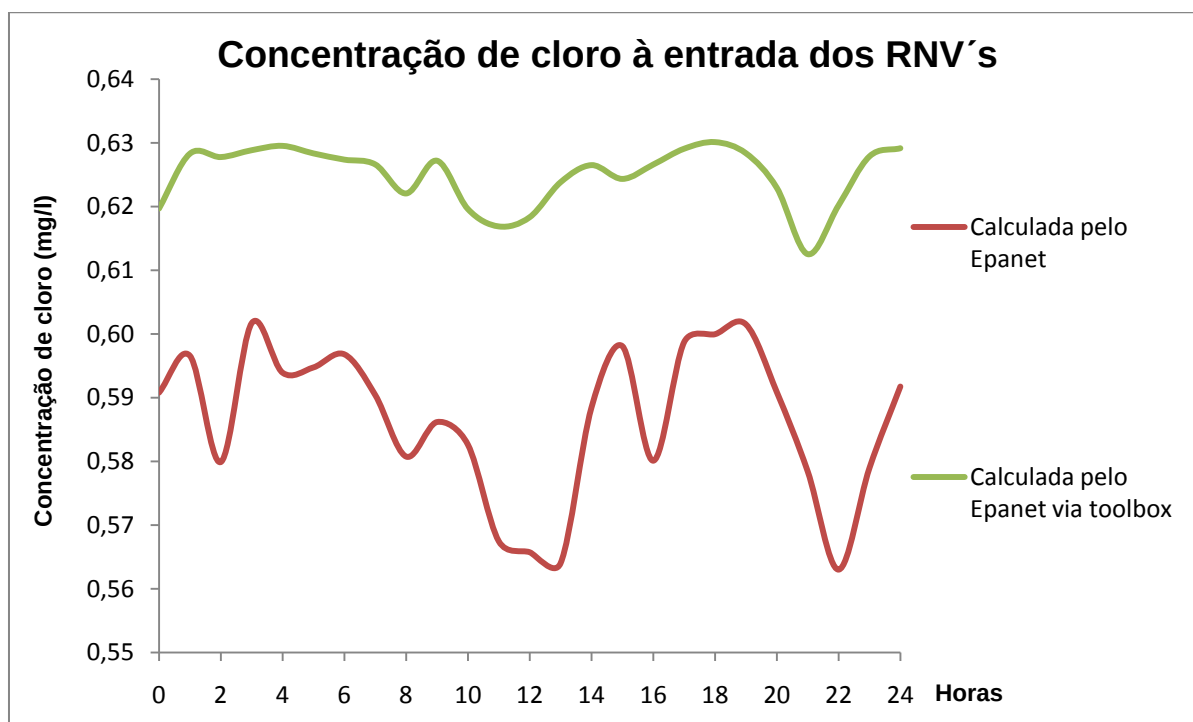


Figura A1.1 - Concentração média horária de cloro à entrada dos RNV's, para o dia 8 de Janeiro de 2008, obtida por dois processos diferentes.

Quadro A1.2 – Concentração média horária de cloro à entrada dos RNV's obtida por dois processos distintos.

Concentração de cloro para o dia 8 de Julho de 2008 (mg/l)		
Método		
Hora	Epanet	Epanet via <i>toolbox</i>
0	0,589	0,626
1	0,602	0,631
2	0,578	0,630
3	0,597	0,633
4	0,606	0,633
5	0,603	0,630
6	0,598	0,628
7	0,598	0,627
8	0,590	0,628
9	0,584	0,626
10	0,587	0,622
11	0,573	0,618
12	0,579	0,620
13	0,569	0,626
14	0,590	0,629
15	0,601	0,630
16	0,600	0,631
17	0,595	0,631
18	0,596	0,629
19	0,595	0,628
20	0,597	0,628
21	0,595	0,626
22	0,596	0,629
23	0,596	0,628
24	0,595	0,626

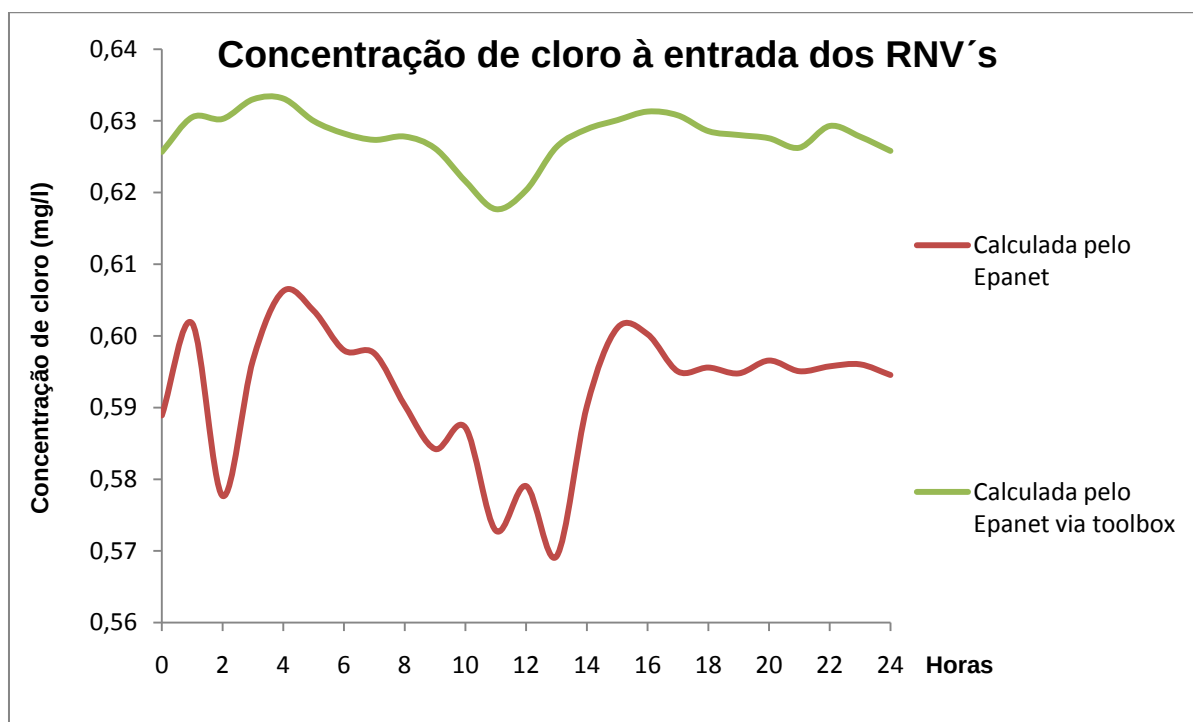


Figura A1.2 - Concentração média horária de cloro à entrada dos RNV's, para o dia 8 de Julho de 2008, obtida por dois processos diferentes.

Quadro A2.1 - Concentração de cloro à saída dos RNV's calculada por três processos distintos.

Concentração de cloro para o dia 8 de Janeiro de 2008 (mg/l)			
Método			
Hora	Matlab	Epanet	Epanet via <i>toolbox</i>
0	0,628	0,536	0,505
1	0,620	0,555	0,503
2	0,621	0,551	0,501
3	0,622	0,550	0,499
4	0,620	0,549	0,496
5	0,617	0,544	0,493
6	0,612	0,547	0,489
7	0,609	0,561	0,484
8	0,605	0,564	0,482
9	0,603	0,562	0,476
10	0,592	0,558	0,471
11	0,583	0,550	0,465
12	0,577	0,537	0,457
13	0,608	0,541	0,454
14	0,609	0,544	0,452
15	0,608	0,559	0,450
16	0,608	0,557	0,447
17	0,612	0,568	0,446
18	0,614	0,570	0,445
19	0,602	0,578	0,443
20	0,593	0,571	0,439
21	0,587	0,561	0,433
22	0,602	0,554	0,427
23	0,611	0,549	0,425
24	0,615	0,552	0,421

Quadro A2.2 - Concentração de cloro à saída dos RNV's calculada por três processos distintos.

Concentração de cloro para o dia 8 de Julho de 2008 (mg/l)			
Método			
Hora	Matlab	Epanet	Epanet via <i>toolbox</i>
0	0,627	0,549	0,516
1	0,622	0,579	0,514
2	0,624	0,575	0,512
3	0,625	0,576	0,510
4	0,627	0,587	0,510
5	0,625	0,584	0,508
6	0,620	0,578	0,504
7	0,614	0,572	0,499
8	0,608	0,559	0,495
9	0,607	0,565	0,491
10	0,596	0,556	0,484
11	0,588	0,549	0,477
12	0,585	0,556	0,471
13	0,614	0,553	0,467
14	0,618	0,552	0,466
15	0,620	0,556	0,464
16	0,622	0,574	0,462
17	0,624	0,573	0,459
18	0,622	0,571	0,456
19	0,618	0,568	0,453
20	0,614	0,563	0,449
21	0,612	0,558	0,445
22	0,612	0,554	0,443
23	0,617	0,551	0,441
24	0,619	0,557	0,437

Quadro A3.1 - Tempos de operação das combinações das bombas, para o dia 8 de Janeiro de 2008, obtidos com a metodologia em Excel.

Hora	Nível de água (m)		Volume (m ³)		Consumo (m ³)	Tempo de operação das associações de bombas (s)			
	Inicial	Final	Inicial	Final		3 Bombas	2 Bombas	1 Bomba	0 Bombas
1	2,00	2,80	2024,46	2829,88	1,215	0	1487	2113	0
2	2,80	2,00	2829,88	2024,78	1,242	0	0	3600	0
3	2,00	2,04	2024,78	2063,03	1,409	0	1421	2179	0
4	2,04	2,54	2063,03	2569,17	0,878	0	0	3600	0
5	2,54	3,70	2569,17	3744,74	0,692	0	0	3600	0
6	3,70	4,98	3744,74	5044,24	0,695	0	134	3466	0
7	4,98	4,98	5044,24	5044,14	1,058	0	139	3461	0
8	4,98	3,79	5044,14	3832,86	0,938	0	0	2128	1472
9	3,79	4,98	3832,86	5043,94	0,549	0	0	3131	469
10	4,98	4,75	5043,94	4809,57	0,356	0	0	1027	2573
11	4,75	3,47	4809,57	3512,57	0,386	0	0	89	3511
12	3,47	2,00	3512,57	2023,56	0,682	0	0	947	2653
13	2,00	2,44	2023,56	2471,35	0,894	0	0	3600	0
14	2,44	4,90	2471,35	4964,17	0,516	0	673	2927	0
15	4,90	4,89	4964,17	4951,34	1,022	0	0	3600	0
16	4,89	4,98	4951,34	5042,08	1,094	0	358	3242	0
17	4,98	4,59	5042,08	4645,89	1,462	0	1181	2419	0
18	4,59	4,98	4645,89	5042,29	1,308	0	1414	2186	0
19	4,98	3,41	5042,29	3451,06	0,635	0	0	680	2919
20	3,41	3,20	3451,06	3235,71	0,403	0	0	1214	2386
21	3,20	2,00	3235,71	2024,35	0,392	0	0	197	3402
22	2,00	3,13	2024,35	3166,14	0,701	0	0	3600	0
23	3,13	2,05	3166,14	2073,79	1,207	0	0	3194	406
24	2,05	2,00	2073,79	2024,93	0,737	0	0	2557	1043

Quadro A3.2 - Tempos de operação das combinações das bombas, para o dia 8 de Julho de 2008, obtidos com a metodologia em Excel.

Nível de água (m)		Volume (m ³)		Consumo (m ³)		Tempo de operação das associações de bombas (s)			
Hora	Inicial	Final	Inicial	Final		3 Bombas	2 Bombas	1 Bomba	0 Bombas
1	2,00	3,64	2024,46	3682,09	1,351	0	2807	793	0
2	3,64	2,00	3682,09	2024,76	1,545	0	235	3365	0
3	2,00	3,60	2024,76	3643,93	1,584	0	3600	0	0
4	3,60	4,77	3643,93	4826,05	1,579	0	3149	451	0
5	4,77	3,59	4826,05	3630,48	1,351	0	0	3600	0
6	3,59	3,86	3630,48	3904,44	1,085	0	506	3094	0
7	3,86	4,98	3904,44	5039,38	0,793	0	318	3282	0
8	4,98	4,73	5039,38	4788,43	0,796	0	0	2568	1032
9	4,73	4,98	4788,43	5039,59	0,949	0	0	3600	0
10	4,98	2,66	5039,59	2696,45	0,651	0	0	0	3600
11	2,66	2,05	2696,45	2079,68	0,439	0	0	945	2655
12	2,05	2,00	2079,68	2024,45	0,449	0	0	1534	2066
13	2,00	4,98	2024,45	5036,03	0,999	0	2891	709	0
14	4,98	4,76	5036,03	4822,01	1,430	0	1246	2354	0
15	4,76	4,92	4822,01	4981,64	1,251	0	979	2621	0
16	4,92	3,55	4981,64	3596,69	1,447	0	155	3445	0
17	3,55	2,41	3596,69	2438,37	1,384	0	155	3445	0
18	2,41	2,36	2438,37	2389,92	1,032	0	0	3600	0
19	2,36	3,39	2389,92	3432,36	0,729	0	0	3600	0
20	3,39	4,56	3432,36	4616,94	0,689	0	0	3600	0
21	4,56	4,41	4616,94	4464,77	1,061	0	0	3600	0
22	4,41	3,62	4464,77	3667,29	1,240	0	0	3600	0
23	3,62	2,80	3667,29	2835,23	1,249	0	0	3600	0
24	2,80	2,04	2835,23	2065,12	1,006	0	60	2681	859

A4 – Controlos com condições múltiplas para a simulação em Epanet do dia 8 de Janeiro de 2008

Rule 1

if system clocktime >= 0:00
and system clocktime <= 24:00
and tank ARADCE01 level <= 2.00
then pump ETAB120 status is open
priority 10

Rule 2

if system clocktime >= 0:00
and system clocktime <= 24:00
and tank ARADCE01 level >= 4.98
then pump ETAB120 status is closed
priority 10

Rule 3

if system clocktime >= 12:00
and system clocktime <= 18:00
then pump ETAB120 status is open
priority 5

Rule 4

if system clocktime >= 00:00
and system clocktime <= 05:00
and tank ARADCE01 level <= 2.00
then pump ETAB141 status is open
priority 10

Rule 5

if system clocktime >= 00:00
and system clocktime <= 05:00
and tank ARADCE01 level >= 4.98
then pump ETAB141 status is closed

Rule B1_1

if system clocktime >= 0:00
and system clocktime < 05:00
then pump ETAB120 status is open

Rule B1_2

if system clocktime = 05:00
then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_3

if system clocktime = 05:03
then pump ETAB120 status is open

Rule B1_4

if system clocktime = 05:57
then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_5

if system clocktime = 06:00
then pump ETAB120 status is open

Rule B1_6

if system clocktime = 07:00
then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_7

if system clocktime = 07:25

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_8

if system clocktime = 08:00

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_9

if system clocktime = 08:07

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_10

if system clocktime = 09:00

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_11

if system clocktime = 09:46

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_12

if system clocktime = 10:04

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_13

if system clocktime = 11:00

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_14

if system clocktime = 11:17

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_15

if system clocktime = 12:00

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_16

if system clocktime = 15:58

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_17

if system clocktime = 16:00

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_18

if system clocktime = 16:58

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_19

if system clocktime = 17:00

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_20

if system clocktime = 17:58

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_21

if system clocktime = 18:47

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_22

if system clocktime = 19:22

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_23

if system clocktime = 21:00

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_24

if system clocktime = 22:50

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_25

if system clocktime = 23:00

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_26

if system clocktime = 23:46

then pump ETAB120 status is closed

Rule B2_1

if system clocktime = 0:00

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_2

if system clocktime = 0:25

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_3

if system clocktime = 2:00

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_4

if system clocktime = 2:24

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_5

if system clocktime = 06:58

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_6

if system clocktime = 07:00

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_7

if system clocktime = 13:49

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_8

if system clocktime = 14:00

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_9

if system clocktime = 15:54

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_10

if system clocktime = 16:00

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_11

if system clocktime = 16:40

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_12

if system clocktime = 17:00

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_13

if system clocktime = 17:36

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_14

if system clocktime = 18:00

then pump ETAB141 status is closed

A5 – Controlos com condições múltiplas para a simulação em Epanet do dia 8 de Julho de 2008

Rule 1

if system clocktime >= 00:00
and system clocktime <= 07:00
then pump ETAB120 status is open

Rule 2

if system clocktime >= 00:00
and system clocktime <= 07:00
and tank ARADCE01 level >= 4.98
then pump ETAB120 status is closed
priority 10

Rule 3

if system clocktime >= 07:00
and system clocktime <= 24:00
and tank ARADCE01 level <= 2.00
then pump ETAB120 status is open

Rule 4

if system clocktime >= 07:00
and system clocktime <= 24:00
and tank ARADCE01 level >= 4.98
then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_1

if system clocktime >= 00:00
and system clocktime < 07:00
then pump ETAB120 status is open

Rule B1_2

if system clocktime = 07:00

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_3

if system clocktime = 07:20

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_4

if system clocktime = 09:00

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_5

if system clocktime = 10:00

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_6

if system clocktime = 10:16

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_7

if system clocktime = 11:00

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_8

if system clocktime = 11:26

then pump ETAB120 status is closed

Rule B1_9

if system clocktime $\geq$ 12:00

and system clocktime $<$ 23:46

then pump ETAB120 status is open

Rule B1_10

if system clocktime = 23:46
then pump ETAB120 status is closed

Rule B2_1

if system clocktime >= 00:00
and system clocktime < 00:47
then pump ETAB141 status is open

Rule B2_2

if system clocktime = 00:47
then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_3

if system clocktime = 01:00
then pump ETAB141 status is open

Rule B2_4

if system clocktime = 01:04
then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_5

if system clocktime = 02:00
then pump ETAB141 status is open

Rule B2_6

if system clocktime = 03:00
then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_7

if system clocktime = 03:08
then pump ETAB141 status is open

Rule B2_8

if system clocktime = 04:00

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_9

if system clocktime = 05:00

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_10

if system clocktime = 05:08

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_11

if system clocktime = 06:00

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_12

if system clocktime = 06:05

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_13

if system clocktime = 12:00

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_14

if system clocktime = 12:48

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_15

if system clocktime = 13:39

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_16

if system clocktime = 14:00

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_17

if system clocktime = 14:44

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_18

if system clocktime = 15:00

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_19

if system clocktime = 15:57

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_20

if system clocktime = 16:00

then pump ETAB141 status is closed

Rule B2_21

if system clocktime = 16:57

then pump ETAB141 status is open

Rule B2_22

if system clocktime = 17:00

then pump ETAB141 status is closed

A6.1 – Organização do ficheiro *bloco de notas* para definição do tarifário de energia para o dia 8 de Janeiro de 2008

Tarifário de Energia para o período de Inverno - DIA ÚTIL

Número de períodos tarifários

8

Hora Início	Hora Fim	Custo (€/kWh)
0	2	0.0449
2	6	0.0416
6	7	0.0449
7	9	0.0653
9	12	0.0833
12	18	0.0653
18	21	0.0833
21	24	0.0653

FIM

A6.2 – Organização do ficheiro *bloco de notas* para definição do tarifário de energia para o dia 8 de Julho de 2008

Tarifário de Energia para o período de Verão - DIA ÚTIL

Número de períodos tarifários

6

Hora Início	Hora Fim	Custo (€/kWh)
0	2	0.0464
2	6	0.0431
6	7	0.0464
7	9	0.0676
9	12	0.0834
12	24	0.0676

FIM

ENepanet – executa uma simulação completa do EPANET na biblioteca “epanet2”;

ENopen – abre o *toolkit* para analisar uma rede de distribuição particular;

ENgetnodeindex – devolve o *index* de um determinado nó da rede, isto é, a numeração atribuída automaticamente pelo EPANET aquando da construção da rede;

ENgetnodeid – devolve o rótulo (ID), atribuído pelo utilizador, de um determinado nó;

ENgetnodetype – comando que devolve, consoante o *index* solicitado para verificação, se esse nó é de junção (vulgarmente designado apenas por *nó*), um reservatório de nível fixo ou um reservatório de nível variável;

ENgetnodevalue – tem a possibilidade de devolver, para um certo nó, um dos seguintes parâmetros: cota; consumo base; rótulo do padrão de consumo que lhe está associado; coeficiente de vazão do dispositivo emissor; qualidade inicial; qualidade da origem de água; o rótulo do padrão de origem de água; tipo de origem de água; nível inicial de água nos reservatórios de nível variável; consumo instantâneo; carga hidráulica; pressão; qualidade instantânea da água; valor da razão massa por minuto de uma espécie química a partir da sua origem;

ENgetlinktype – consoante o *index* solicitado, este comando devolve um código identificativo do tipo de elemento em questão: tubagem com válvula de retenção; tubagem; bomba; válvula de controlo de pressão a jusante ou válvula redutora de pressão; válvula de controlo de pressão a montante ou válvula de alívio; válvula de perda de carga fixa; válvula reguladora de caudal; válvula de controlo de perda de carga ou válvula de borboleta; válvula genérica;

ENgetlinkvalue – função que pode dar as seguintes informações relacionadas com uma tubagem: diâmetro; comprimento; coeficiente de rugosidade; perda de carga singular; estado inicial ou actual do elemento (ligado ou desligado); rugosidade inicial ou actual da tubagem; velocidade de rotação inicial ou actual da bomba; estado inicial ou actual (ligado ou desligado) de uma válvula; coeficiente de decaimento de cloro no seio do escoamento; coeficiente de decaimento de cloro nas paredes das tubagens; caudal escoado através desse elemento; velocidade do escoamento ao atravessar esse elemento; perda de carga nesse elemento; a potência desenvolvida (para as bombas) em kW;

ENgetpatternid – devolve o rótulo atribuído pelo utilizador a um determinado padrão temporal como, por exemplo, o padrão horário de consumo de água;

ENgetpatternlen – permite conhecer o número de períodos temporais de um padrão temporal;

ENgetpatternvalue – devolve o factor horário, requisitado pelo utilizador, associado a um determinado padrão temporal;

ENgetcount – determina o número de componentes de um determinado tipo existentes na rede;

ENgetflowunits – comando que devolve o código representativo da unidade de caudal definida no ficheiro com a rede modelada;

ENgettimeparam – devolve o valor de um determinado parâmetro de análise temporal como, por exemplo, a duração da simulação hidráulica;

ENsetcontrol – permite a escrita de regras simples de operação;

Ensetnodevalue – comando que permite definir o valor de certos parâmetros associados aos nós como, por exemplo, a sua cota ou consumo base;

ENsetlinkvalue – é uma função que permite o mesmo que a anterior, mas desta feita aplica-se a tubagens, bombas e válvulas;

ENsetpatternvalue – comando que permite definir os factores dos padrões temporais;

ENsavehydfile – comando que permite gravar o conteúdo actual de um ficheiro binário com os resultados da simulação hidráulica da rede;

ENusehydfile – utiliza o conteúdo de um ficheiro binário com os dados da simulação hidráulica da rede;

ENsolveH – comando que executa uma simulação hidráulica completa e escreve os resultados num ficheiro binário;

ENopenH – comando que abre o módulo de simulação hidráulica da rede;

ENinitH – função que define o estado inicial dos componentes da rede antes de se iniciar a simulação hidráulica como, por exemplo, o nível de água nos reservatórios ou o estado das bombas;

ENrunH – executa uma simulação hidráulica para um determinado intervalo de tempo da duração total da simulação;

ENnextH – comando que determina a duração do intervalo de tempo até que um novo evento hidráulico ocorra;

ENcloseH – encerra a simulação hidráulica da rede;

ENopenQ – abre o módulo de simulação de qualidade da água;

ENinitQ – prepara a simulação de qualidade da água;

ENrunQ – torna disponíveis os resultados da simulação hidráulica e de qualidade da água que ocorrem no início do intervalo de tempo da simulação de qualidade da água;

ENnextQ – conduz a análise de qualidade da água até ao começo do período de simulação seguinte;

ENcloseQ – encerra o módulo de simulação de qualidade da água;

ENsaveH – transfere os resultados do ficheiro binário para o ficheiro binário *output*, onde os resultados gravados estão desfasados de intervalos de tempo uniformes;

ENsaveinpfile – guarda todos os dados relativos à rede modelada, introduzidos durante a execução do programa, num ficheiro *inp*.

