

EFICIÊNCIA ECONÓMICA NA OPERAÇÃO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Economic Efficiency in the Operation of Pumping Stations of Water Supply

ANA COSTA ⁽¹⁾ e MANUEL PACHECO FIGUEIREDO ⁽²⁾

⁽¹⁾ *Aluna do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ega04042@fe.up.pt*

⁽²⁾ *Professor Auxiliar, FEUP
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, mpfiguei@fe.up.pt*

Resumo

Nos sistemas de abastecimento de água, a elevação desta representa uma grande fatia do custo total de energia eléctrica. A optimização da política operacional das estações elevatórias tem vindo a tornar-se uma via prática e eficaz para atingir a eficiência económica dos sistemas, sem a necessidade de alterar as infra-estruturas dos mesmos. A variação ao longo do dia do tarifário de energia eléctrica torna este problema mais complexo, pois é necessário reduzir o tempo de funcionamento das bombas durante os períodos correspondentes aos escalões de energia mais caros.

No âmbito deste trabalho procurou-se desenvolver um algoritmo para o cálculo da melhor combinação de bombas em cada período tarifário utilizando um modelo de controlo cuja função objectivo engloba o custo da energia mas também uma segunda parcela que busca a regularidade da operação (minimização dos arranques e paragens dos grupos elevatórios). Esse algoritmo é desenvolvido em ambiente Matlab, com recurso a uma *toolbox* de comunicação com o EPANET 2.0 e cuja finalidade é a leitura das características dos componentes físicos e não físicos da instalação elevatória. O programa foi aplicado a parte do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água ao Baixo Cávado e Ave para dois dias do ano distintos, correspondentes ao período de hora legal de Verão e Inverno.

Os critérios operacionais optimizados pelo programa desenvolvido foram transpostos para o simulador EPANET, obtendo-se pequenas diferenças entre o custo calculado pelo último e pelo programa: para o dia de hora legal de Verão obteve-se um custo inferior em 2% no simulador, e para o de Inverno o custo é praticamente igual nos dois casos. O programa desenvolvido tem também a capacidade de avaliar economicamente a tomada de algumas decisões relativas ao sistema (como, por exemplo, a alteração da capacidade de armazenamento dos reservatórios).

Palavras-chave: Abastecimento de água; eficiência económica, estações elevatórias; política operacional; optimização.

Abstract

In water supply systems, water pumping represents a large fraction in the total cost of electricity. The optimization of the operation policy for pump stations has become a practical and effective way of achieving economic efficiency in the systems, without the need to change the infrastructure. The variation throughout the day of the electricity price makes this problem more complex because it is necessary to reduce pump operation during the periods of higher prices.

This paper aims to present an algorithm that calculates the best combination of pumps in each period of energy price using a control model whose objective function includes the cost of energy but also has a second parcel that seeks operation regularity (i.e., minimize the number of starts and stops of the pumping groups). This algorithm is written in a Matlab environment and uses a communication toolbox to the simulator EPANET 2.0 whose purpose is reading the characteristics of physical and nonphysical components of the pumping system. The program was applied to a part of the Multimunicipal Water Supply System of Baixo Cávado and Ave for two different days of the year, corresponding to summer and winter periods.

The optimized operational criteria reached by the program were transferred to the EPANET simulator, resulting in small differences between the estimated cost by the latest and by the program: for the summer day a smaller cost of 2% was obtained in the simulator, and for the winter day the cost is almost equal in both cases. The program also has the ability to economically evaluate some decisions concerning the system (e.g., changes in reservoir storage capacity).

Keywords: Water supply; economic efficiency; pumping stations; operational policy; optimization.

1. Introdução

Nos sistemas de abastecimento de água, é nos equipamentos elevatórios que se verifica o maior consumo energético, representando este a maior fatia da factura eléctrica. Na maioria das estações elevatórias, investimentos em pequenas modificações das bombas ou mudanças operacionais podem resultar numa redução significativa do custo com a energia eléctrica.

Devido a isso, a definição de uma política operacional óptima das bombas tem vindo a tornar-se uma metodologia prática e eficaz para atingir a eficiência económica nesses sistemas, sem a necessidade de alterar as infra-estruturas dos mesmos.

O objectivo geral deste estudo foi o desenvolvimento de um programa que auxilie os gestores/operadores das empresas de abastecimento de água a otimizar o funcionamento das estações elevatórias, tendo em vista a minimização do custo da energia e considerando a variação do consumo de água solicitado ao sistema em causa, a variação temporal da tarifa eléctrica e a capacidade de regularização dos reservatórios.

Pretende-se demonstrar a possibilidade de redução do custo de energia pela implantação de medidas de fácil execução, sem a necessidade de investimentos para alcançar essa racionalização, bem como a possibilidade de avaliar a poupança ou encargo de diferentes acções que possam ser tomadas sobre o sistema (por exemplo, alterar a capacidade de um reservatório). A interface computacional proposta foi escrita na linguagem de programação MATLAB com a finalidade de promover a integração de um módulo optimizador com um módulo de simulação hidráulica, o programa EPANET 2.0 (Rossman, 2002).

Para avaliar a metodologia proposta, e verificar a aplicabilidade da ferramenta informática desenvolvida a um sistema real, modelou-se o trecho inicial do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água ao Baixo Cávado e Ave constituído pela estação elevatória situada nas instalações de captação e tratamento de água de Areias de Vilar, pela conduta elevatória e pelo reservatório por está abastecido (primeiro reservatório do sistema adutor).

2. Desenvolvimento do Programa de Optimização

O programa desenvolvido neste trabalho utiliza um módulo de optimização, auxiliado por um modelo de simulação hidráulica, que minimiza uma função objectivo não linear com restrições para procurar a melhor política operacional a ser aplicada a um sistema adutor concreto, conhecido o consumo de água e o tarifário de energia.

No modelo do sistema elevatório estudado, o consumo, variável com o tempo, é atribuído a um nó imediatamente a jusante do reservatório acima referido.

Como se trata de um estudo sobre um sistema físico a funcionar regularmente, os consumos desse nó correspondem aos valores observados pelos equipamentos de medição instalados.

A solução óptima deve ser a que minimiza os custos de operação mais importantes, ou seja, os relativos ao consumo de energia eléctrica e os de manutenção das bombas, respeitando as restrições hidráulicas, físicas e operacionais do sistema.

Neste estudo, considerou-se um horizonte de planeamento de 24 horas. O modelo matemático está preparado para tratar qualquer sistema adutor composto por um reservatório de alimentação (a montante) e respectiva estação elevatória (EE) composta por um ou mais grupos elevatórios (GE), uma conduta elevatória e um reservatório abastecido por esta (constituído por uma ou mais células).

2.1. Modelo de controlo

O modelo de controlo utilizado é baseado no proposto por Figueiredo e Martins (2007), em que o problema de optimização tem como função objectivo a minimização do custo da energia eléctrica consumida pelos GE mantendo o volume de água elevado em cada hora, o mais regular possível.

As restrições a ser respeitadas neste problema são, para além das características da instalação elevatória, das leis físicas que regem o seu funcionamento, do consumo de água esperado e do custo unitário de energia eléctrica, os limites superior e inferior do volume de água armazenado no reservatório abastecido pela estação elevatória, as condições iniciais e finais do problema e o volume de água armazenado no reservatório no início e no final do período em que o custo de energia é mais elevado.

Tal como é habitual na operação de estações elevatórias, optou-se por dividir o dia em períodos correspondentes aos da tarifa eléctrica (super-vazio, vazio, cheio e ponta) para a definição da política operacional dos grupos elevatórios.

2.1.1. Variável de controlo

A formulação utilizada é a indirecta, onde o volume a elevar em cada hora constitui a variável de controlo. É uma formulação mais simples de implementar do que a directa, sendo que nesta a variável de controlo (ou variáveis, dependendo do número de GE da EE) quantifica a fracção do incremento temporal durante a qual um GE está a funcionar.

A equação de balanço aplicada ao reservatório de jusante estabelece que, para um determinado intervalo de tempo, o volume final de água no reservatório é igual ao inicial adicionado da diferença entre o volume de água elevado pela conduta e o volume entregue pelo reservatório ao consumo:

$$V_{R,\text{final}} = V_{R,\text{inicial}} + V_{\text{elevado}} - V_{\text{consumido}} \quad [1]$$

Considerando um período de análise de 24 horas e sendo $V_{R,0}$, o volume de água no reservatório no instante inicial, o volume de água existente no reservatório no final do incremento temporal de ordem i , $V_{R,i}$, vem definido pela seguinte expressão:

$$V_{R,i} = V_{R,0} + V_{\text{elev},i} - V_{\text{cons},i} \quad [2]$$

O volume acumulado elevado, entre o instante inicial e o instante final do incremento temporal de ordem i , corresponde à integração em ordem ao tempo do caudal elevado entre esses instantes,

$$V_{elev,i} = \int_0^{t_i} Q_{elev}(t) dt = \int_0^{t_1} Q_{elev}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} Q_{elev}(t) dt + \dots + \int_{t_{i-1}}^{t_i} Q_{elev}(t) dt \quad [3]$$

ou ainda ao somatório dos volumes $\Delta V_{elev,j}$ elevados durante os incrementos temporais compreendidos entre o instante inicial e o instante final do incremento temporal de ordem i ,

$$V_{elev,i} = \Delta V_{elev,1} + \Delta V_{elev,2} + \dots + \Delta V_{elev,i} = \sum_{j=1}^i \Delta V_{elev,j} \quad [4]$$

A expressão [4] define a ordenada, relativa ao instante i , de uma função representativa do volume total elevado desde o instante inicial do período de análise.

Atendendo ao modo como é definida, esta função (por vezes designada de "caudais integrais" ou "volumes acumulados"), sendo contínua, é constituída por sucessivos segmentos de recta cujos declives correspondem aos caudais médios em cada incremento temporal.

Retomando a expressão [4] respeitante à água entregue pela conduta elevatória ao reservatório de jusante, o volume de água elevado em cada incremento temporal (a hora), $\Delta V_{elev,j}$, constitui a variável de controlo do problema em análise. Contudo, em benefício do desempenho do algoritmo de optimização, optou-se por tomar como variável do problema de optimização o volume acumulado no final de cada incremento temporal, $V_{elev,i}$, definido pela expressão [4].

Todavia, esta diferença em relação à formulação inicialmente apresentada para a variável de controlo é mais aparente que real; de facto, para cada incremento temporal (a hora), a diferença entre os volumes acumulados, final e inicial, corresponde ao volume elevado durante esse incremento:

$$V_{elev,i} - V_{elev,i-1} = \Delta V_{elev,i} \quad [5]$$

A partir do resultado optimizado da variável de controlo, é calculado o volume de água que é necessário elevar para cada período de tarifário de energia:

$$V_{elev,p} = \sum_{i=1}^{n^\circ \text{ horas período}} \Delta V_{elev,i} \quad , \quad p = 1, \dots, n^\circ \text{ períodos} \quad [6]$$

2.1.2. A função objectivo

A função objectivo utilizada é definida pela soma de duas parcelas: uma que visa ter uma operação da estação elevatória tão regular quanto possível (para as 24 horas do dia), e outra respeitante ao custo da energia eléctrica (calculada para os N períodos correspondentes ao tarifário escolhido - hora legal de Verão ou Inverno). A equação [7] representa a função a otimizar.

$$F_{obj} = w_L \sum_{i=1}^{24} L_i + w_E \sum_{j=1}^N E_j p_{E,j} \quad [7]$$

Na expressão acima exposta, L_i representa o comprimento do segmento de recta do traçado da função de controlo no incremento temporal de ordem i ; E_j a energia consumida no incremento temporal j correspondente ao preço unitário da energia $p_{E,j}$ nesse incremento.

Os valores de w_L e w_E são os factores de peso atribuídos a cada parcela da função objectivo. Manter constante w_L e reduzir o valor de w_E significa diminuir a importância do custo da energia na obtenção do valor da função objectivo. No limite, anular w_E significa ignorar o custo, procurando apenas a regularização da operação dos GE. Pelo contrário, anular w_L significa considerar exclusivamente o custo da energia. A introdução da parcela que representa a regularidade operacional tem duas vantagens:

- Assegurar alguma regularidade na operação dos grupos elevatórios (compete ao gestor/operador da instalação elevatória o exercício de ajustar os factores w_L e w_E);
- Auxiliar na pesquisa do mínimo global da função objectivo, evitando que o algoritmo convirja para mínimos locais.

2.1.3. Restrições do problema de optimização

O volume de água no reservatório no final de cada incremento temporal de ordem i , $V_{R,i}$, não pode ultrapassar a capacidade máxima do reservatório nem deve ser inferior a uma capacidade mínima fixada por considerações de outra ordem (p.e., reserva de avarias).

Devido a isso, a equação [2] fica sujeita às seguintes restrições de desigualdade:

$$V_{R,j} = V_{R,0} + V_{elev,j} - V_{cons,j} \leq Cap_{máxima} \quad , \quad \forall i = 1, \dots, 24 \quad [8]$$

$$V_{R,j} = V_{R,0} + V_{elev,j} - V_{cons,j} \geq Cap_{mínima} \quad , \quad \forall i = 1, \dots, 24 \quad [9]$$

que, por sua vez, dão lugar às inequações:

$$V_{R,0} + V_{elev,i} \leq Cap_{máxima} + V_{cons,i} \quad , \quad \forall i = 1, \dots, 24 \quad [10]$$

$$V_{R,0} + V_{elev,i} \geq Cap_{mínima} + V_{cons,i} \quad , \quad \forall i = 1, \dots, 24 \quad [11]$$

Estas expressões significam que a função de controlo (isto é, a função representativa do volume acumulado de água elevada, adicionada ao volume inicial de água existente no reservatório) tem que estar compreendida numa faixa limitada inferiormente pelo volume acumulado de água consumida, adicionado da capacidade mínima fixada para o reservatório, e superiormente pelo volume acumulado de água consumida, adicionado da capacidade máxima de armazenamento do reservatório.

Quando a função de controlo se aproxima do limite superior, o reservatório está totalmente cheio; quando acontece o oposto, o reservatório contém somente o volume mínimo de água estabelecido.

Além das restrições acima mencionadas, considerou-se ainda que:

- No instante imediatamente anterior ao início do período de energia mais cara (hora de ponta) o volume de água no reservatório deve ser o correspondente à capacidade máxima do mesmo;
- No instante final do período de energia mais cara, o volume de água no reservatório deve ser o correspondente à capacidade mínima. Esta restrição só deverá ser activada se o consumo de água neste período for superior ao volume de armazenamento útil do reservatório (a diferença entre as capacidades máxima e mínima).

Estas duas restrições tentam evitar o accionamento das bombas no período em que a electricidade é mais cara, e que podem ser traduzidas por:

$$V_{R,0} + V_{\text{elev},i} = \text{Cap}_{\text{máxima}} + V_{\text{cons},i} \quad [12]$$

$$V_{R,0} + V_{\text{elev},i} = \text{Cap}_{\text{mínima}} + V_{\text{cons},i} \quad [13]$$

sendo que i , na equação [12], corresponde à hora de início do período de energia mais cara e, na equação [13], corresponde à hora final do período de energia mais cara.

Supondo que o modelo de controlo tem como finalidade a pesquisa da melhor política operacional para um dia esperado (médio), faz sentido admitir que este dia seja sucedido por outro de características idênticas. Em termos práticos, esta hipótese obriga a que o volume de água existente no reservatório nos instantes inicial e final do período de 24 horas em estudo seja o mesmo.

3. Funcionamento do Programa de Optimização

O programa desenvolvido neste trabalho calcula a energia consumida por uma EE e o respectivo custo no período de análise de 24 horas. A EE poderá estar equipada com vários GE, eventualmente com distintas curvas características (CCB) e curvas de rendimentos (CRB). São quantificados, para cada um dos GE, o consumo de energia, o respectivo custo, a percentagem de tempo de operação, a potência média, o rendimento médio, etc.

O programa de optimização foi desenvolvido em ambiente MATLAB com recurso a uma *toolbox* de comunicação com o EPANET 2.0 desenvolvida por André Vieira (Engenheiro Civil e Mestre em Hidráulica pela FEUP) que é uma adaptação da estrutura do EPANET *Programmer's Toolkit* desenvolvido pela EPA, primeiro para a versão 2.00.07 de Janeiro de 2001 e posteriormente adaptada para a mais recente versão 2.00.12 de Fevereiro de 2008.

3.1. Etapas da construção da rede hidráulica

No início da execução do programa de optimização é feita a leitura da rede hidráulica construída no EPANET. Para o correcto funcionamento do programa é necessária a definição de alguns parâmetros durante a construção da rede a simular:

- Dados gerais das tubagens: nó inicial e final, diâmetros, comprimentos e rugosidade;
- Padrão de consumo (em que o ID deve ser "P_C") e respectivo consumo médio diário;
- Padrão de tarifa eléctrica (em que o ID deve ser "P_E"): este padrão tem de existir embora os valores horários (do padrão) sejam posteriormente actualizados;
- Curvas características das bombas;
- Curvas de rendimento das bombas;
- Dados gerais das bombas: cada bomba deverá ter uma CCB e uma CRB associada bem como um padrão de tarifa eléctrica e o preço da energia (este parâmetro deverá ser igual a 1);
- Dados gerais dos reservatórios: diâmetro, altura de água máxima e mínima, altura de água inicial, cota de soleira;
- Dados gerais das válvulas: nó inicial e final, tipo, diâmetro e parâmetro de regulação (*setting*);
- Introdução de Controlos Simples da forma:


```
LINK ID_B1 OPEN IF NODE ID_RNV BELOW 0.0
LINK ID_B1 CLOSED IF NODE ID_RNV ABOVE 10.0
LINK ID_B2 OPEN IF NODE ID_RNV BELOW 0.0
LINK ID_B2 CLOSED IF NODE ID_RNV ABOVE 10.0
```

em que ID_B1 representa o identificador da bomba 1 e ID_RNV o identificador do reservatório de nível variável. Estes controlos devem ser introduzidos para as N bombas existentes no sistema.

3.2. Etapas da construção do programa de optimização

Previamente à execução do programa de optimização é necessário realizar dois procedimentos:

- a) Preparação do ficheiro de entrada:
Exportação da rede previamente construída no EPANET, dando origem a um ficheiro do tipo "nome_problema.inp"; este passo é externo ao programa de optimização.
- b) Criação dos ficheiros de texto com os tarifários de energia:
Criação de dois ficheiros de texto com as características dos tarifários de electricidade para o período de hora legal de verão e de inverno.

O algoritmo desenvolvido pode ser descrito pelos seguintes passos:

1. Declaração de variáveis:
Carregamento das variáveis globais da biblioteca de funções da *toolbox* do EPANET (por *script*) e declaração de outras variáveis globais adicionais.
2. Entrada de dados e definições de ficheiros:
Introdução por parte do utilizador do ficheiro (nome_problema) a carregar.
Concatenação do nome do problema com as extensões "inp", "rep", "out" e "hyd".
3. Abertura da rede hidráulica:
Importação do ficheiro "nome_problema.inp".

4. Verificação das unidades a utilizar na simulação:
Se o caudal não estiver em l/s termina a execução do programa.
5. Abertura dos ficheiros 'nome_problema_inicial.inp' e 'nome_problema_final.inp':
Ficheiros com as configurações inicial e final da instalação a simular (geometria, consumos, padrões, etc.).
6. Contagem de componentes da rede a simular:
Número de nós, tubos, reservatórios, válvulas, bombas, etc.
7. Determinação dos *index* dos GE, RNV e nó associado ao padrão de consumo:
Os *index* são armazenados numa matriz coluna de dimensões número_componentes.
8. Contagem de padrões temporais, de curvas e de controlos simples.
9. Determinação e armazenagem dos *index* dos padrões de consumo e de tarifa de energia.
10. Leitura de outras informações para controlo:
Leitura do tempo de simulação, passo de tempo da simulação hidráulica, número de passos de tempo do padrão de consumo e passo de tempo do padrão de consumo.
11. Cálculo dos volumes máximos e mínimos de água admissíveis nos RNV:
São calculados a partir da introdução por parte do utilizador das alturas máximas e mínimas de água admissíveis e do diâmetro dos RNV.
12. Introdução de regras simples de operação:
Introdução das regras que regulam o estado das bombas. É definido que quando os RNV atingem a altura máxima de água as bombas desligam, e quando atingem a altura mínima, ligam.
13. Carregamento do tarifário de energia:
Após introdução por parte do utilizador do tarifário que quer utilizar (hora legal de inverno ou verão) são lidos os seguintes parâmetros: número de períodos, hora inicial e final de cada período e custo unitário de energia em cada período. Esses valores são registados em matrizes independentes.
14. Realização de uma simulação hidráulica:
É realizada uma chamada do EPANET para a realização de uma simulação hidráulica que permite obter o consumo horário, o caudal e a potência das várias combinações possíveis de bombas. Esses valores são armazenados em matrizes de dimensões apropriadas.
15. Cálculo dos limites da variável de controlo (restrições de desigualdade) e da estimativa inicial da variável de controlo:
O cálculo dos limites é feito com base no consumo horário e na capacidade máxima e mínima de água no reservatório. A solução inicial é calculada fazendo a média entre os dois limites da variável de controlo.

16. Definição das restrições de igualdade:
Relativas às restrições expostas anteriormente em que o volume de água no reservatório no instante inicial e final seja o mesmo, e que na hora anterior ao início do período de custo de energia mais elevado, o reservatório esteja cheio e, se for o caso, no final desse mesmo período esteja com a sua capacidade mínima.
17. Optimização da função objectivo através da função *fincon*:
O cálculo da função objectivo baseia-se no modelo de controlo exposto em 4.1, calculando para cada período: o volume de água que é necessário elevar, o número de GE que é necessário ligar e o tempo que têm de permanecer ligados, a energia consumida por cada bomba e o seu custo.
Neste passo pede-se ao utilizador que defina os coeficientes K_1 e K_2 correspondentes aos factores de peso da função objectivo w_L e w_E .
18. Envio dos resultados finais para o monitor:
Os resultados finais enviados para o monitor são o custo final da energia eléctrica consumida, o factor de utilização de cada GE, o número de bombas a utilizar em cada período tarifário bem como o tempo em que devem permanecer ligados e os níveis de água (no reservatório) iniciais e finais para cada período.

4. Aplicação do Programa de Optimização a um Caso Real

Para testar o desempenho do programa de optimização, estudou-se o trecho inicial do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Baixo Cávado e Ave, que engloba a estação elevatória que comporta maiores encargos em termos de factura energética.

4.1. Modelo hidráulico

A instalação elevatória modelada é composta pelo reservatório de água tratada da estação de tratamento de água (ETA), com uma capacidade de 20.000 m³, pela estação elevatória 1 (EE 1), pela conduta elevatória, pelo reservatório abastecido (em Adães) e por tubagens e válvulas que a complementam (ver representação esquemática na Figura 1). A estação elevatória está equipada com 3 GE iguais (marca Worthington, modelo 350-LNN-725) associados em paralelo e que em conjunto elevam um caudal de 2966 l/s, para uma altura manométrica de 133 m.

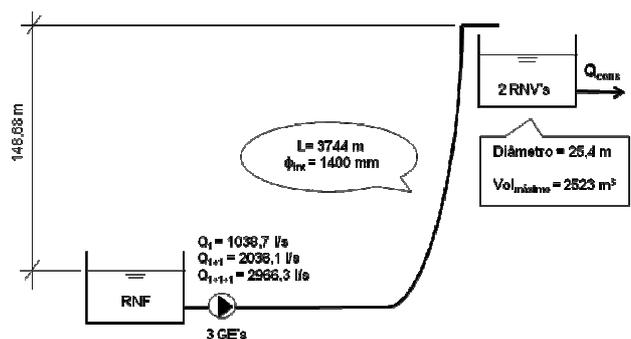


Figura 1. Esquema do modelo hidráulico utilizado.

4.2. Padrão horário de consumo esperado

Para a geração do modelo de simulação a empresa Águas do Cávado, SA (actualmente integrada na Águas do Noroeste, SA) disponibilizou registos dos consumos à saída do reservatório de Adães relativos ao ano de 2008. Utilizaram-se dados de consumo de dois dias úteis, para duas épocas do ano distintas - o dia 8 de Julho de 2008 e o dia 8 de Janeiro do mesmo ano. Assim, para o consumo diário do dia 8 de Julho obteve-se o valor de 92192 m³, a que corresponde um caudal médio diário de 1067 l/s. O caudal consumido varia ao longo do dia entre 41 l/s e 1555 l/s. A variação horária do consumo é obtida multiplicando o caudal médio diário pelos factores horários representados na Figura 2.

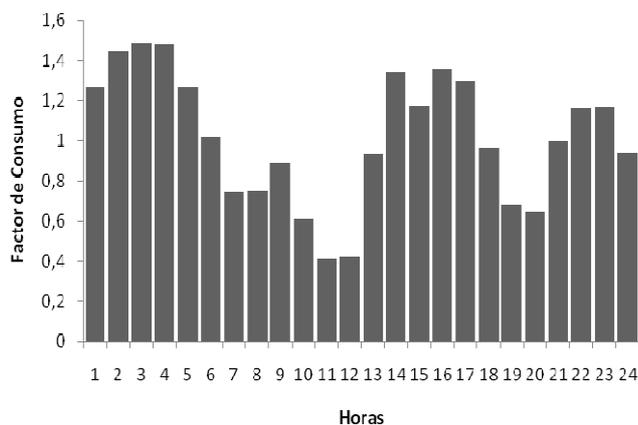


Figura 2. Factores horários de consumo de água para o dia 8 de Julho de 2008.

Para o dia 8 de Janeiro de 2008 obteve-se o consumo diário de 73733 m³, a que corresponde um caudal médio diário de 853 l/s. O caudal consumido varia ao longo do dia entre 356 l/s e 1463 l/s. A variação horária do consumo é obtida multiplicando o caudal médio diário pelos factores horários representados na Figura 3.

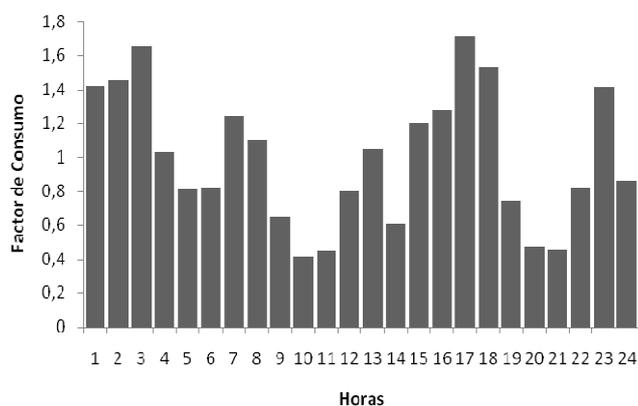


Figura 3. Factores horários de consumo de água para o dia 8 de Janeiro de 2008.

4.3. Padrão horário da tarifa eléctrica

Segundo o Tarifário de Venda de Energia Eléctrica a Clientes Finais (2009) do Grupo Energias de Portugal, publicado no Despacho n.º 22/2008 da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos e, de acordo com o art.º 26 do mesmo regulamento, os períodos tarifários existentes são:

- Período I – de 1 de Janeiro a 31 de Março;
- Período II – de 1 de Abril a 30 de Junho;
- Período III – de 1 de Julho a 30 de Setembro;
- Período IV – de 1 de Outubro a 31 de Dezembro.

Estes 4 períodos são reduzidos a dois conforme o período de hora legal em que se enquadram. Sendo assim os períodos II e III formam o período de hora legal de Verão e os períodos I e IV o período de hora legal de Inverno. Neste estudo considerou-se que os preços praticados correspondem aos valores de energia eléctrica fornecida em alta tensão para tarifas de longas utilizações, como é o caso do sistema simulado.

Neste estudo, dividiu-se o dia em períodos de tarifa eléctrica conforme o exposto na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1. Períodos de tarifa de electricidade considerados para o período de hora legal de Verão (ERSE, 2008).

Período	Hora inicial	Hora final	Preço (€/kWh)
1	00:00	02:00	0,0449
2	02:00	06:00	0,0419
3	06:00	07:00	0,0449
4	07:00	09:00	0,0660
5	09:00	12:00	0,0821
6	12:00	24:00	0,0660

Tabela 2. Períodos de tarifa de electricidade considerados para o período de hora legal de Inverno (ERSE, 2008).

Período	Hora inicial	Hora final	Preço (€/kWh)
1	00:00	02:00	0,0424
2	02:00	06:00	0,0396
3	06:00	07:00	0,0424
4	07:00	09:00	0,0636
5	09:00	12:00	0,0820
6	12:00	18:00	0,0636
7	18:00	21:00	0,0820
8	21:00	24:00	0,0636

4.4. Dados de entrada no programa

Tal como descrito no capítulo anterior, é preciso especificar alguns parâmetros no início do programa. Para a análise dos resultados deste caso de estudo fixaram-se os seguintes valores:

- Altura máxima de água admissível nos reservatórios: 4,98 m;
- Altura mínima de água admissível nos reservatórios: 2,0 m;
- Diâmetro dos reservatórios: 25,4 m;
- Período de hora legal a utilizar para o tarifário de energia – utilizaram-se os dois;
- K₁: 1;
- K₂: 1.

5. Resultados Obtidos

Após o conhecimento do número de bombas necessárias, do tempo de funcionamento das mesmas e dos níveis de água iniciais e finais no reservatório para cada período, é possível simular com o EPANET a solução obtida de uma forma relativamente simples. Para o efeito, basta introduzir controlos com condições múltiplas em que são definidos, para cada período, os níveis de água (num dos reservatórios) que alteram o estado das bombas.

Os níveis de água que controlam o estado das bombas foram definidos tendo em conta os seguintes critérios:

- Se a bomba funcionar o tempo total do período, os níveis foram definidos para que a bomba ligue no nível inicial do período e desligue quando é atingida a altura máxima de água definida;
- No período de ponta, a bomba só liga quando o nível de água atinge o mínimo definido;
- Se a bomba não funcionar durante todo o tempo do período, tenta-se procurar o melhor instante para a ligar tendo em conta o nível de água que deve ser atingido no final desse período.

5.1. Dia 08 de Julho de 2008 (tarifário de hora legal de Verão)

O número de bombas necessárias para elevar o volume necessário em cada período tarifário, bem como o factor de utilização das mesmas em cada período, obtido com o programa de optimização e após simulação com o EPANET está presente na Tabela 3.

Tabela 3. Número de bombas necessárias e factor de utilização obtidos para o dia 8 de Julho de 2008.

Período	Nº de bombas necessárias	Factor de Utilização (%)			
		Programa de Optimização		Simulação com EPANET	
		B 1	B 2	B 1	B 2
1	2	100,0	18,8	100,0	18,0
2	2	100,0	26,6	100,0	26,0
3	1	100,0	0,0	100,0	0,0
4	1	71,1	0,0	69,0	0,0
5	1	14,9	0,0	16,0	0,0
6	1	91,8	0,0	89,0	0,0

Analisando a tabela anterior verifica-se que, embora haja a preocupação de ter o reservatório no seu nível máximo de água no final da hora anterior ao período de ponta, nem sempre é possível evitar o funcionamento dos GE no período do dia com tarifa de energia mais elevada. A percentagem de utilização das bombas nesse período é a necessária para que no final do mesmo, a altura da água seja igual à mínima admissível.

Na Figura 4 apresenta-se o gráfico do EPANET com a variação ao longo do dia dos caudais “produzidos” e “consumidos”. Tal como esperado, o volume elevado no período de custo mais elevado (entre as 9 e as 12 h) é simplesmente o necessário para que o nível de água no reservatório não seja inferior ao nível mínimo admissível.

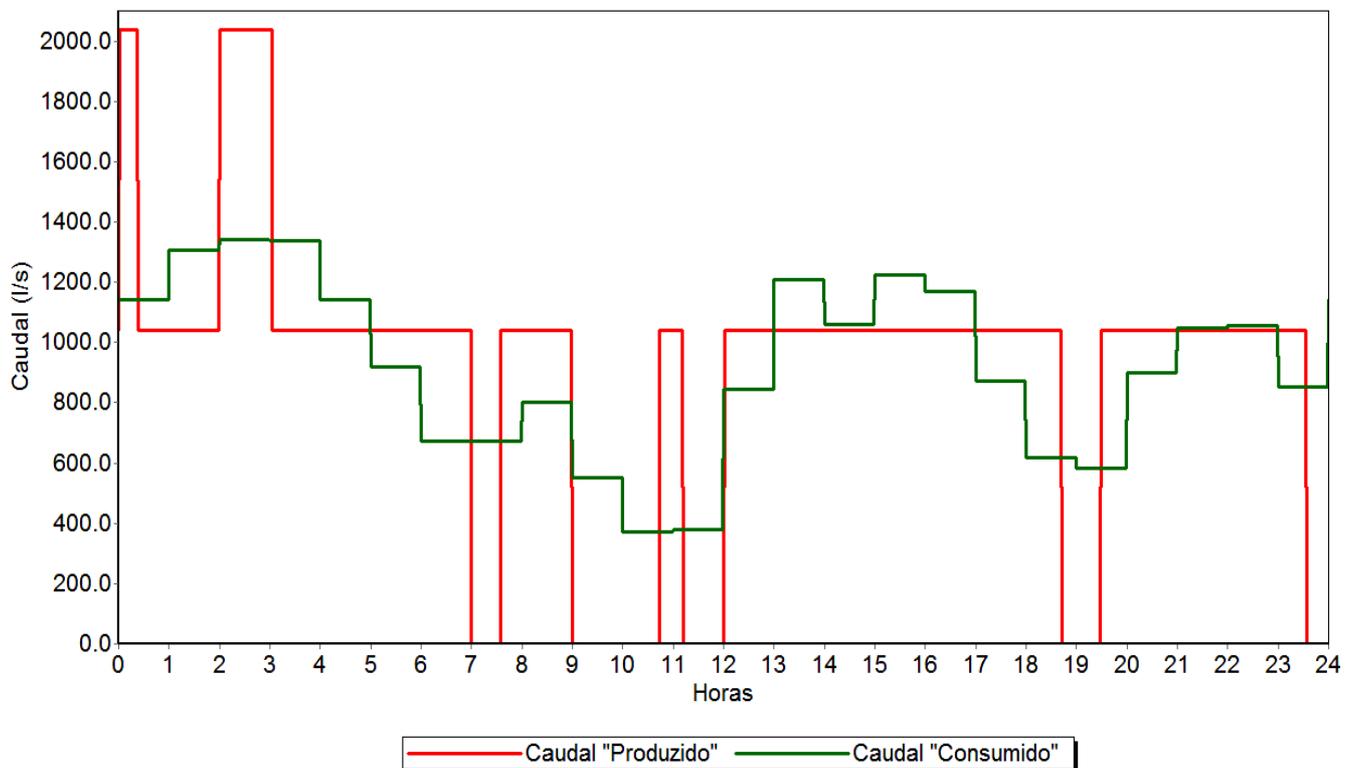


Figura 4. Resultados da simulação para o caudal “produzido” e “consumido” pelo sistema para o dia 08 de Julho de 2008.

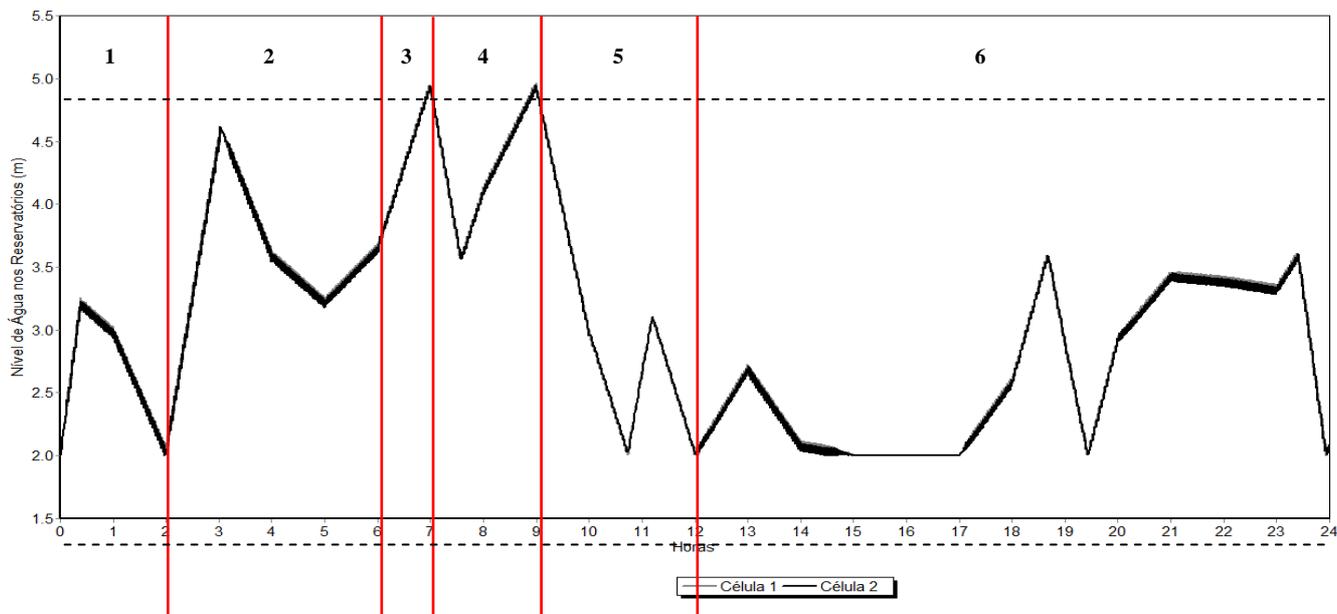


Figura 5. Resultados da simulação para a variação horária do nível de água no reservatório para o dia 08 de Julho de 2008.

É também possível observar que o número de arranques de uma das bombas é 2 e da outra é igual a 5 (não se considera o arranque às 24 h pois já pertence ao dia seguinte).

Para o nível de água nos reservatórios, obteve-se o comportamento apresentado na Figura 5.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos pelo programa de optimização para o nível de água inicial e final nos reservatórios, para cada período.

Pode-se verificar através da análise da figura anterior que o nível da água no reservatório se comporta tal como esperado - encontra-se no nível máximo no início da hora de ponta e no nível mínimo no final da mesma, e os níveis inicial e final são aproximadamente os mesmos. Na Tabela 5 encontram-se os valores diários obtidos através do programa de optimização e do simulador EPANET para o factor de utilização das bombas e o custo associado. Para o dia estudado, o custo total estimado após optimização da política operacional da EE é de 1953,23 € e 1911,80 €, respectivamente.

Tabela 4. Nível de água inicial e final no reservatório para o dia 8 de Julho de 2008.

Período	Programa de Optimização	
	Nível de Água Inicial (m)	Nível de Água Final (m)
1	2,00	2,00
2	2,00	3,68
3	3,68	4,98
4	4,98	4,98
5	4,98	2,00
6	2,00	2,00

Tabela 5. Resultados obtidos para o custo diário de energia eléctrica para o dia 8 de Julho de 2008.

Bomba	Factor de Utilização (%)		Custo (€/dia)	
	Programa de Optimização	Simulação com EPANET	Programa de Optimização	Simulação com EPANET
1	82,85	81,36	1855,61	1816,74
2	5,99	5,92	97,62	95,06
3	0,00	0,00	0	0,00
Custo Total			1953,23	1911,80

**5.2. Dia 08 de Janeiro de 2008
(tarifário de hora legal de Inverno)**

O número de bombas necessárias para elevar o volume necessário, em cada período tarifário, bem como o factor de utilização das mesmas em cada período, está presente na Tabela 6.

Também neste caso, é necessário ligar as bombas nos períodos de energia mais cara (períodos 5 e 7) embora durante um intervalo reduzido de tempo.

Na Figura 6 apresenta-se o gráfico do EPANET com a variação ao longo do dia dos caudais “produzidos” e “consumidos”.

Tal como esperado, o volume elevado no período de custo mais elevado (entre as 9 e as 12 h e as 18 e as 21 h) é simplesmente o necessário para que o nível de água no reservatório não seja inferior ao nível mínimo admissível.

Neste caso o número de arranques de uma das bombas é 4 e da outra é igual a 7 (não se considera o arranque às 24 h pois já pertence ao dia seguinte).

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos para o nível de água inicial e final nos reservatórios, para cada período. Para o nível de água nos reservatórios, obteve-se a variação apresentada na Figura 7.

Tabela 6. Número de bombas necessárias e factor de utilização obtidos para o dia 8 de Janeiro de 2008.

Período	Nº de bombas necessárias	Factor de Utilização (%)			
		Programa de Optimização		Simulação com EPANET	
		B1	B 2	B 1	B 2
1	2	100,0	19,0	100,0	20,0
2	2	100,0	9,0	97,0	10,0
3	2	100,0	1,9	100,0	3,0
4	1	71,6	0,0	74,0	0,0
5	1	18,7	0,0	19,0	0,0
6	2	100	15,1	100,0	15,0
7	1	19,0	0	21,0	0,0
8	1	84,9	0	86,0	0,0

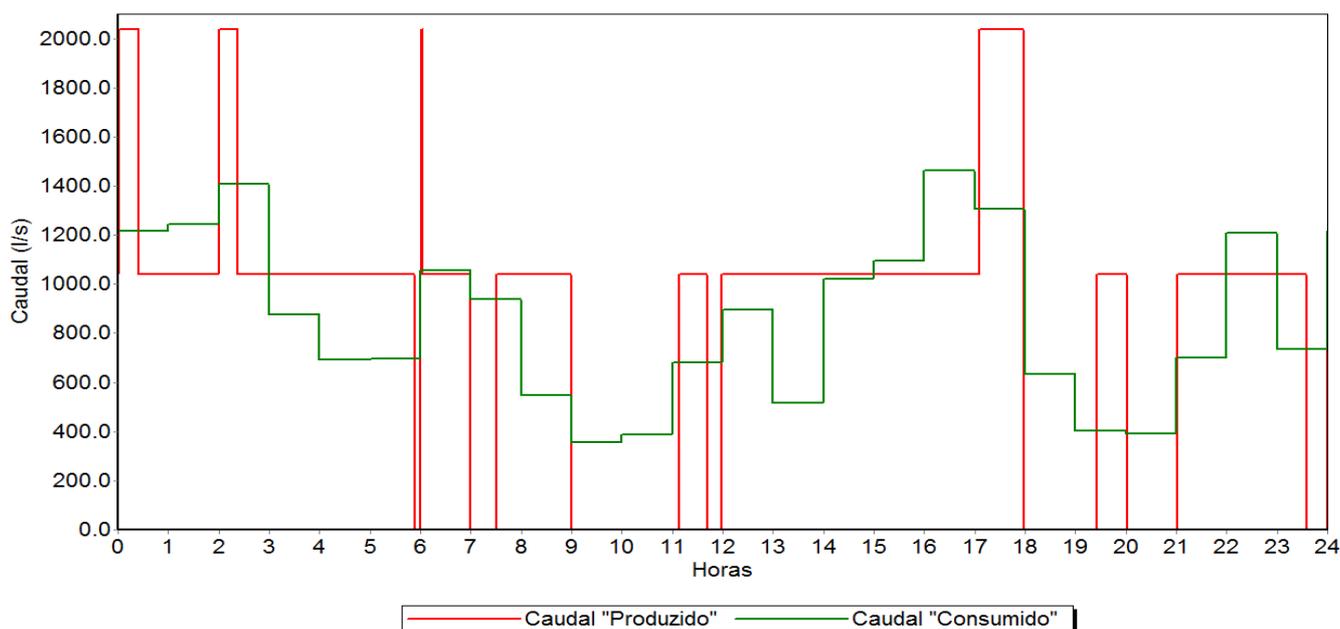


Figura 6. Resultados da simulação para o caudal “produzido” e “consumido” pelo sistema para o dia 08 de Janeiro de 2008.

Tabela 7. Nível de água inicial e final no reservatório para o dia 8 de Janeiro de 2008.

Período	Programa de Optimização	
	Nível de Água Inicial (m)	Nível de Água Final (m)
1	2,00	2,00
2	2,00	4,98
3	4,98	4,98
4	4,98	4,98
5	4,98	2,00
6	2,00	4,98
7	4,98	2,00
8	2,00	2,00

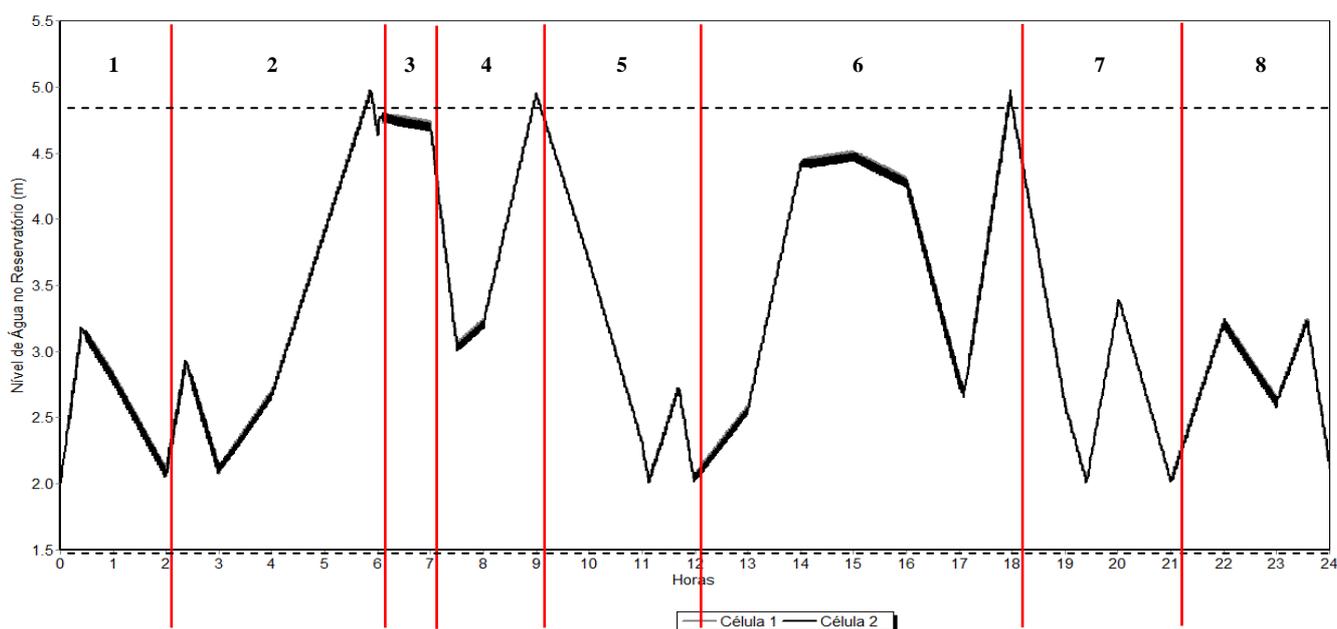


Figura 7. Resultados da simulação para a variação horária do nível de água no reservatório para o dia 08 de Janeiro de 2008.

Tal como para o caso da hora legal de Verão, também aqui o resultado da simulação é o esperado: a água no reservatório encontra-se no nível máximo no início das horas de ponta e no nível mínimo no final das mesmas, e os níveis inicial e final são aproximadamente os mesmos.

Na Tabela 8 pode-se consultar os resultados diários gerados com o programa de optimização e o simulador EPANET, obtendo-se um custo diário de energia eléctrica de 1762,75 € e 1762,68 €, respectivamente.

5.3. Análise económica para alguns cenários

Para além da optimização da operação dos GE, o programa desenvolvido pode também ser utilizado para analisar economicamente a tomada de algumas decisões respeitantes às características da instalação e políticas operacionais como, por exemplo:

- A diminuição a altura mínima de água nos reservatórios;
- A colocação de uma das células do reservatório de Adães fora de serviço (para manutenção);

- A subida do rendimento das bombas ou o aumento da capacidade dos reservatórios com função de regularização.

Com base nos consumos registados ao dia 8 de Julho de 2008 foram estudados três cenários, cujos resultados (diários) respeitantes ao factor de utilização dos GE e ao custo da energia constam da Tabela 9:

- Cenário 1: diminuição da altura mínima admissível de água nos reservatórios (baixou-se a altura mínima de água no reservatório de 2,0 m para 1,5 m);
- Cenário 2: colocação de uma célula do reservatório de Adães fora de serviço para manutenção (a capacidade do reservatório passa para metade da inicial);
- Cenário 3: aumento do rendimento dos grupos elevatórios (aumentou-se o rendimento dos GE através da alteração da sua curva de rendimento no EPANET; no caso inicial as bombas apresentam um rendimento de cerca de 82 % e neste cenário esses valores foram alterados para 84 %).

Tabela 8. Resultados obtidos para o custo diário de energia eléctrica para o dia 8 de Julho de 2008.

Bomba	Factor de Utilização (%)		Custo (€/dia)	
	Programa de Optimização	Simulação com EPANET	Programa de Optimização	Simulação com EPANET
1	75,47	75,54	1621,00	1621,79
2	6,97	7,12	141,75	140,90
3	0	0,00	0	0,00
Custo Total			1762,75	1762,68

Tabela 9. Resultados obtidos para a análise económica de diferentes cenários.

Bomba	Caso inicial		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
	Factor de Utilização (%)	Custo (€)	Factor de Utilização (%)	Custo (€)	Factor de Utilização (%)	Custo (€)	Factor de Utilização (%)	Custo (€)
1	82,85	1855,61	82,28	1837,81	84,18	1902,69	82,85	1811,43
2	5,99	97,62	6,58	107,50	4,60	75,32	5,99	95,30
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo Total		1953,23		1944,86 (- 0,4%)		1978,01 (+ 1,3%)		1906,79 (- 2,4%)

6. Conclusões

Este trabalho sugere a viabilidade da aplicação do programa desenvolvido no sector de abastecimento de água, bastando para tal efectuar a modelação do sistema a estudar em ambiente EPANET. Os resultados obtidos são os esperados: elevação do maior volume de água possível durante a noite e utilização mínima - a indispensável - das bombas durante os escalões energéticos mais caros.

A ferramenta informática desenvolvida requer um baixo tempo computacional, sendo que o tempo total médio para realizar a optimização é de 1,14 minutos. Além de auxiliar na optimização da política operacional das estações elevatórias, o programa desenvolvido poderá também servir para avaliar economicamente eventuais modificações dos sistemas de abastecimento, como é o caso do aumento da capacidade dos reservatórios.

A simulação dos resultados obtidos foi a esperada, verificando-se que para o caso do dia 8 de Julho (tarifário da hora legal de Verão) o factor de utilização das bombas é menor na simulação do que o obtido na optimização, o que se reflecte num custo diário de energia 2% inferior ao esperado. Esta diferença está associada ao facto de em alguns períodos tarifários não terem sido atingidos os níveis de água finais no reservatório (embora sejam diferenças inferiores a 0,1 m, são o suficiente para justificar a diferença no custo final).

Uma das explicações estará na função objectivo utilizada (7) e na atribuição, neste estudo, de igual peso às parcelas relativas ao custo da energia e da regularização dos caudais elevados ($K_1=K_2=1$). Como consequência, a política operacional encontrada pelo programa poderá não ser a mais económica.

Acresce ainda que a programação dos comandos múltiplos do EPANET pode conduzir a um desempenho conjunto dos GE eventualmente mais eficiente (o caudal elevado por uma bomba e os correspondentes rendimento e potência eléctrica são modificados pela entrada em funcionamento de outra(s) bomba(s) instalada(s) em paralelo).

Para o caso do dia 8 de Janeiro de 2008 (tarifário da hora legal de Inverno) o custo total obtido e o factor de utilização das bombas após simulação são praticamente iguais (1962,75 € na optimização e 1962,68 € na simulação).

Ainda através da simulação pode concluir-se que, para o caso de Julho são efectuados 5 arranques de uma bomba (bomba 1) e 2 de outra (bomba 2) e, para o caso de Janeiro, esses valores aumentam em dois arranques por bomba passando a ter-se 7 arranques para o primeiro grupo elevatório e 4 para o segundo.

Em resumo, constata-se que com cálculos relativamente simples é possível melhorar a eficiência económica de uma estação elevatória.

Este estudo estimula o desenvolvimento de modelos de controlo para aplicação a sistemas mais complexos, com mais do que uma estação elevatória e vários reservatórios de distribuição.

Existindo uma monitorização permanente do consumo, é igualmente de considerar o desenvolvimento de um programa que, em tempo real, reformule a política óptima em função da variação do consumo relativamente ao esperado.

Bibliografia

- ERSE (2008) - "Tarifário de Venda de Energia Eléctrica a Clientes Finais", Despacho nº 22/2008.
- Figueiredo, M. M., & Martins, J. M. (2007). "Minimização do Custo da Energia em Estações Elevatórias de Abastecimento de Água", 1º INSSAA, Barcelos.
- Rossmann, L. (2002) - "EPANET 2.0 em Português - Manual do Utilizador". Tradução e adaptação de Loureiro, D., e Coelho, S. T., LNEC (www.dha.lnec.pt/nes/epanet), Lisboa. Edição impressa: "Manual do utilizador do EPANET 2.0 - Simulação hidráulica e de parâmetros de qualidade em sistemas de transporte e distribuição de água", IRAR/LNEC (2004), Lisboa.