

# MINIMIZAÇÃO DO CUSTO DA ENERGIA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Manuel M. Pacheco Figueiredo<sup>1</sup>, Joaquim M. V. Poças Martins<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Professor Auxiliar, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, [mpfiguei@fe.up.pt](mailto:mpfiguei@fe.up.pt), <sup>2</sup>Professor Associado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, [pmartins@fe.up.pt](mailto:pmartins@fe.up.pt)*

Palavras-Chave: estações elevatórias; minimização do custo da energia; modelos de controlo; optimização.

## Resumo

A minimização do custo da energia consumida em estações elevatórias, explorando a variação da tarifa eléctrica e do consumo de água ao longo do dia e a capacidade de regularização dos reservatórios, implica a utilização de um modelo de controlo que, incorporando um algoritmo de optimização, defina a melhor política operacional para a estação elevatória. Compete também ao modelo de controlo pesquisar uma solução que compatibilize a minimização do custo da energia com a regularidade da operação (minimização do número de arranques e paragens dos grupos elevatórios). No presente trabalho apresenta-se uma formulação para o modelo de controlo e a aplicação deste a uma instalação elevatória. A política operacional “óptima” dá lugar aos correspondentes critérios operacionais – arranques e paragens dos grupos elevatórios em função do nível de água no reservatório abastecido e do período do dia em causa. Estes critérios são testados por simulação do comportamento da instalação elevatória com o programa EPANET; em particular, é comparado o custo (mínimo) previsto pelo modelo de controlo com o apurado na simulação.

## 1. Introdução

Em praticamente todos os sistemas de abastecimento de água existem equipamentos de elevação. A grande variação da tarifa da energia eléctrica ao longo do dia convida à pesquisa de uma política operacional que, jogando com a variação temporal dos consumos e com a capacidade de regularização dos reservatórios, permita minimizar o valor da factura energética.

O modelo hidráulico da instalação elevatória (conduta, grupos elevatórios, reservatórios) e os padrões horários do consumo esperado e da variação da tarifa eléctrica ao longo de um dia dão suporte ao **modelo de controlo** que, incorporando um algoritmo de optimização, procura formular uma política operacional eficiente no que respeita ao custo da energia consumida.

Definida a função objectivo e estabelecidas as restrições da operação, compete ao algoritmo de optimização pesquisar o melhor comportamento da variável de controlo do problema, o volume a elevar em cada incremento temporal (a hora). O modelo de controlo e o respectivo algoritmo de optimização são desenvolvidos de um modo relativamente simples numa folha de cálculo Excel, recorrendo-se a uma funcionalidade desta aplicação para a minimização da função objectivo.

Um modelo de controlo assim concebido não determina directamente a operação dos grupos elevatórios – apenas estabelece, para cada hora, o volume de água a elevar. Um modo relativamente simples de colocar em prática a **política operacional “óptima”** consiste na definição adequada dos critérios operacionais, isto é, na programação dos arranques e paragens dos grupos em função do nível de água no reservatório abastecido e do período do dia em causa. Esta programação deverá ser tal que aproxime os volumes efectivamente elevados aos preconizados pelo modelo de controlo e, simultaneamente, minimize o número de arranques e paragens.

O programa EPANET é utilizado para simular o funcionamento da instalação elevatória, para testar e/ou ajustar os critérios operacionais e, tirando partido do módulo de cálculo da energia e do respectivo custo, comparar a factura energética com a estimada pelo modelo de controlo.

## 2. O modelo de controlo

### 2.1 A instalação elevatória

#### 2.1.1 O modelo hidráulico

No exercício de aplicação aqui proposto, a instalação elevatória é constituída por uma conduta em ferro fundido dúctil, com 1200 mm de diâmetro e uma extensão de 10 km. O desnível geométrico a vencer entre o reservatório que alimenta a estação elevatória e o reservatório abastecido é de 204.8 m. A estação elevatória está equipada com dois grupos elevatórios associados em paralelo. Em conjunto elevam um caudal de 1576 l/s, para uma altura manométrica de 217.1 m e um rendimento de 80%. Isoladamente, cada grupo eleva 844 l/s, para uma altura manométrica de 208.5 m e um rendimento de 74%. Estes dados, idênticos aos obtidos com o simulador EPANET, foram os introduzidos no modelo de controlo.

A capacidade máxima de armazenamento do reservatório de jusante foi fixada em 18000 m<sup>3</sup> e o volume mínimo de água a assegurar no reservatório em 10% deste valor, isto é, 1800 m<sup>3</sup>. A capacidade do reservatório de montante, que alimenta a estação elevatória, não foi considerada no problema, admitindo-se que contém sempre água para satisfazer os caudais elevados.

#### 2.1.2 O padrão horário do consumo esperado

Para consumo diário tomou-se o valor de 70000 m<sup>3</sup>, a que corresponde um caudal médio diário de 810 l/s. A variação horária do consumo é obtida por multiplicação deste valor pelos factores horários representados na Figura 1. Estes factores pretendem representar a variação horária do consumo de água num dia útil.

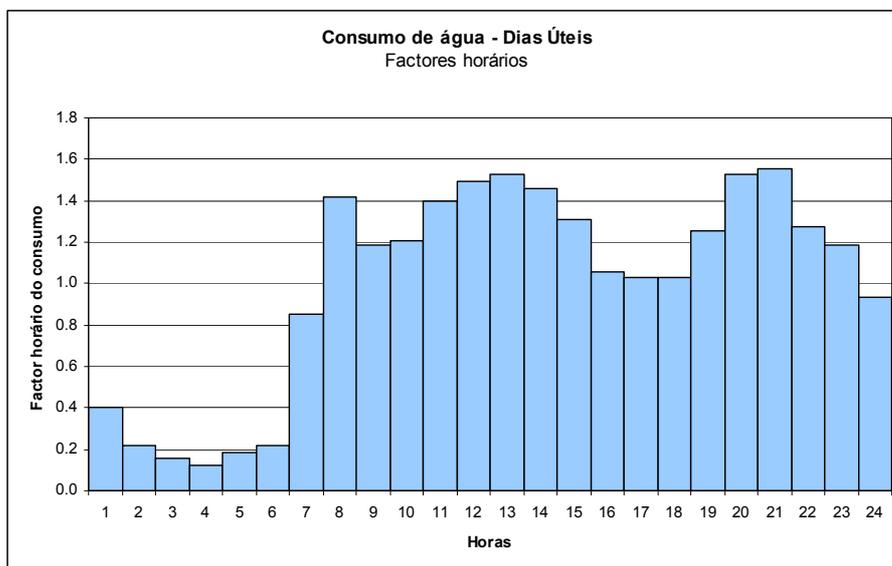


Figura 1. Dia útil. Factores horários do consumo de água.

#### 2.1.3 O padrão horário da tarifa eléctrica

A variação horária da tarifa eléctrica considerada neste problema está representada na Figura 2. Os valores apresentados, variando entre 0.043 €/kWh à noite e 0.110 €/kWh nas horas de ponta, corresponderão aos praticados para a energia eléctrica fornecida em média tensão.

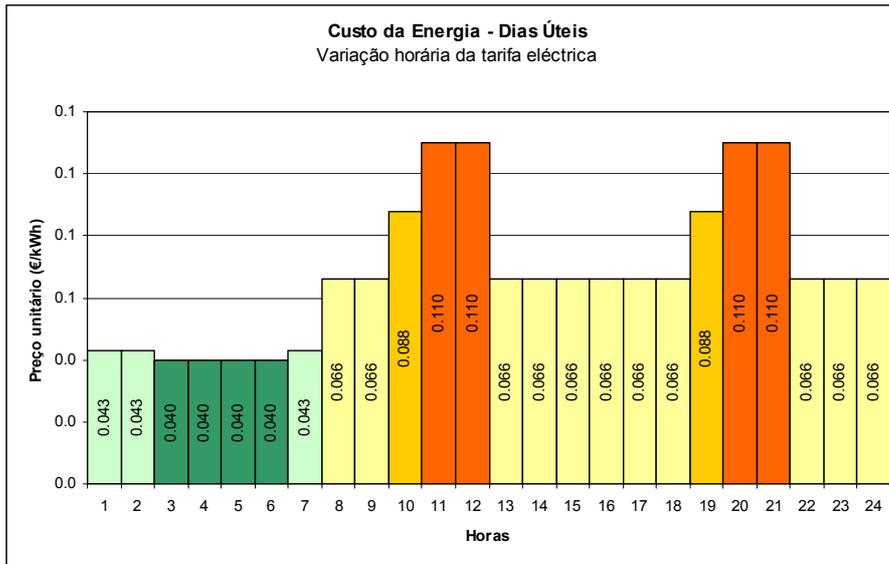


Figura 2. Dia útil. Variação horária da tarifa eléctrica.

## 2.2 O algoritmo de optimização

### 2.2.1 O problema de optimização

A motivação deste trabalho está na busca da eficiência económica na exploração de uma instalação elevatória. Como consequência, e numa primeira análise, o problema de optimização a equacionar terá como função objectivo (a minimizar) o custo da energia eléctrica consumida pelos grupos elevatórios. Este problema está sujeito a diversas restrições a respeitar. Para além das características da instalação elevatória, das leis físicas que regem o seu funcionamento, do consumo de água esperado, do custo unitário da energia eléctrica, etc., que já se encontram incorporados no modelo hidráulico e nos padrões horários do consumo esperado e da tarifa eléctrica, é necessário ter em conta os limites superior e inferior do volume de água armazenado no reservatório abastecido pela conduta elevatória, os caudais máximos e mínimos passíveis de elevação e, também, as condições iniciais e finais do problema (ao estudar um dia médio faz sentido impor que os volumes inicial e final de água armazenada sejam iguais).

### 2.2.2 Formulação indirecta. Variável de controlo

Uma vez definida a função objectivo e estabelecidas as restrições da operação, compete ao algoritmo de optimização pesquisar o melhor comportamento da variável de controlo do problema. Aqui optou-se pela formulação indirecta, onde o volume a elevar em cada incremento temporal (a hora) constitui a variável de controlo. Trata-se de uma formulação mais simples de implementar do que a directa, sendo que nesta a variável de controlo (ou variáveis, no caso de mais do que um grupo elevatório) quantifica a fracção do incremento temporal durante a qual um grupo elevatório 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:

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

Tendo em mente um período de análise de 24 horas e considerando  $V_{R,0}$  o volume de água contido no reservatório no instante inicial (0:00 horas), 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

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

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

$$V_{\text{elev},i} = \Delta V_{\text{elev},1} + \Delta V_{\text{elev},2} + \dots + \Delta V_{\text{elev},i} = \sum_{j=1}^i \Delta V_{\text{elev},j} \quad (4)$$

Esta expressão (4) define a ordenada, relativa ao instante  $i$  (instante final do incremento de ordem  $i$ ), 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. Por simples substituição da simbologia, expressão análoga pode ser escrita relativamente ao consumo de água com origem no reservatório de jusante, caso em que o volume consumido em cada incremento temporal,  $\Delta V_{\text{cons},j}$ , é conhecido (o padrão de consumo esperado é um dado).

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),  $\Delta V_{\text{elev},j}$ , constitui a variável de controlo do problema em apreço. 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,  $V_{\text{elev},i}$ , 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:

$$V_{\text{elev},i} - V_{\text{elev},i-1} = \Delta V_{\text{elev},i} \quad (5)$$

### 2.2.3 Restrições do problema de optimização

O volume de água existente 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 um volume mínimo fixado por considerações de outra ordem (p.e., reserva de avarias). Como consequência, a expressão (2) fica sujeita às correspondentes restrições desigualdade

$$V_{R,i} = V_{R,0} + V_{\text{elev},i} - V_{\text{cons},i} \leq Cap_{\text{máxima}} \quad , \quad \forall i = 1, \dots, 24 \quad (6)$$

$$V_{R,i} = V_{R,0} + V_{\text{elev},i} - V_{\text{cons},i} \geq Cap_{\text{mínima}} \quad , \quad \forall i = 1, \dots, 24 \quad (7)$$

que dão lugar às inequações

$$V_{R,0} + V_{\text{elev},i} \leq Cap_{\text{máxima}} + V_{\text{cons},i} \quad , \quad \forall i = 1, \dots, 24 \quad (8)$$

$$V_{R,0} + V_{elev,i} \geq Cap_{mínima} + V_{cons,i} \quad , \quad \forall i = 1, \dots, 24 \quad (9)$$

cujos significado é o seguinte: a **função de controlo**, isto é, a função representativa do volume acumulado de água elevada, adicionado do volume inicial de água existente no reservatório, tem que estar confinada a uma 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 (Figura 3).

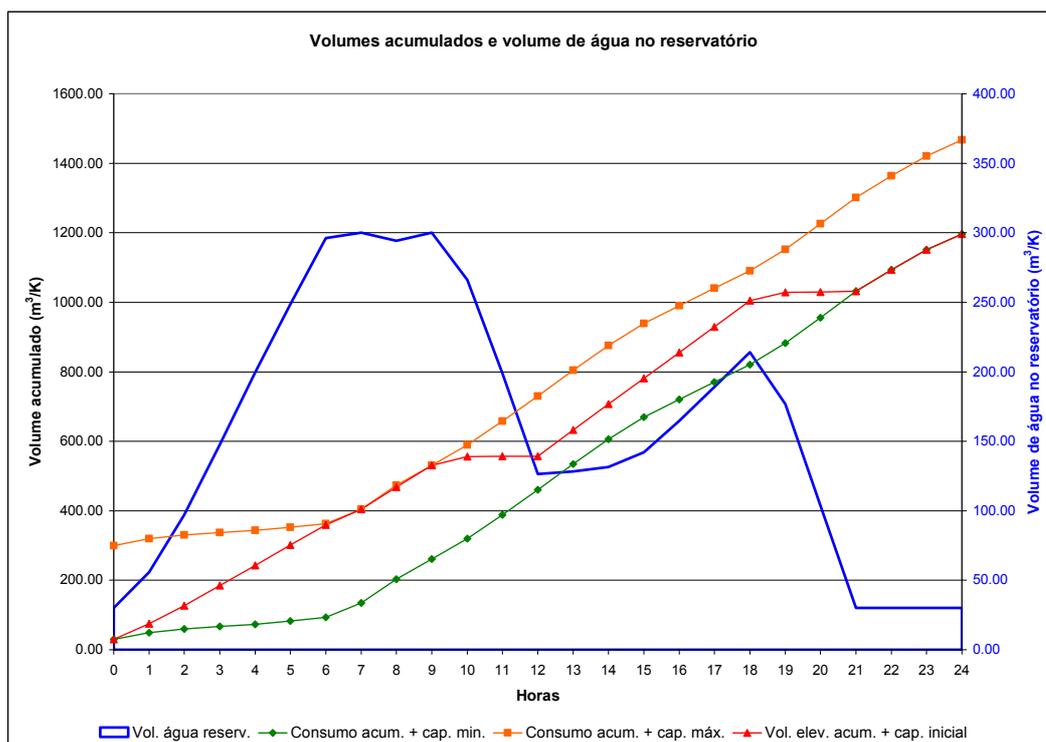


Figura 3. Volumes acumulados elevados e consumidos. Volume de água no reservatório.

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

Estas não são as únicas restrições a ter em conta relativamente ao comportamento da função de controlo. De facto, o caudal bombeado não pode ser negativo ou superior ao máximo que os grupos elevatórios são capazes de elevar quando em funcionamento simultâneo. Por consequência, o declive da função de controlo não pode ser negativo nem ultrapassar o valor correspondente ao máximo caudal que a instalação pode elevar. No algoritmo de optimização optou-se, por simplicidade de programação, pela formulação destas restrições como se de igualdade se tratassem, através da utilização de duas funções de penalidade obrigatoriamente nulas; não o sendo, significa que um destes limites foi violado, isto é, que o declive ou é negativo ou é superior ao máximo autorizado.

Resta, finalmente, uma última condição a observar. 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. Esta restrição igualdade, mais adequada ao estudo de dias úteis, deverá ser abandonada, e substituída por outra mais apropriada, no caso de dias na transição dia útil – fim de semana.

#### 2.2.4 Função objectivo

Numa primeira análise, a função objectivo do problema de optimização quantificará o custo da energia consumida pelos grupos elevatórios; para um período de 24 horas, será definida como a soma do custo da energia em cada incremento temporal (a hora), o qual, por sua vez, corresponderá ao produto da energia consumida,  $E_i$ , pelo preço unitário da energia,  $p_{E,i}$ , nesse incremento (10):

$$F_{\text{obj}} = \sum_{i=1}^{24} E_i p_{E,i} \quad (10)$$

No exercício proposto, a instalação elevatória é provida de dois grupos elevatórios associados em paralelo. Para acomodar a conveniência de uma operação da estação elevatória tão regular quanto possível – minimização do número de arranques e paragens – introduziu-se uma parcela adicional na função objectivo, de peso a afinar pelo gestor/operador, que procura ter em conta este aspecto:

$$F_{\text{obj}} = w_L \sum_{i=1}^{24} L_i + w_E \sum_{i=1}^{24} E_i p_{E,i} \quad (11)$$

Na expressão (11),  $L_i$  é o comprimento do segmento de recta que representa o traçado da função de controlo no incremento temporal de ordem  $i$ . Os valores de  $w_L$  e  $w_E$  são os factores de peso atribuídos a cada uma das parcelas desta nova função objectivo. Manter constante  $w_L$  e reduzir o valor de  $w_E$  implica diminuir a importância do custo da energia na formação do valor da função objectivo; no limite, anular  $w_E$  significa ignorar o custo e procurar apenas a regularização da operação dos grupos elevatórios (há aqui uma inspiração no método do fio tenso de Conti). Pelo contrário, anular  $w_L$  significa ter exclusivamente em conta o custo da energia na formulação da política operacional “ótima”.

A introdução da parcela representativa da regularidade operacional tem duas vantagens: (i) assegurar alguma regularidade na operação dos grupos elevatórios (competirá ao gestor/operador da instalação elevatória o exercício de ajustamento dos factores  $w_L$  e  $w_E$ ); (ii) auxiliar a pesquisa do mínimo global da função objectivo, evitando que o algoritmo numérico convirja para mínimos locais.

#### 2.2.5 Implementação do algoritmo em folha de cálculo

O modelo de controlo é implementado numa folha de cálculo Excel. Para o instante inicial do período em análise e para os instantes finais de cada um dos incrementos temporais são calculadas as diversas variáveis em jogo (volume de água no reservatório, volumes consumidos e elevados, volumes acumulados de água consumida e elevada, energia consumida por cada uma das bombas, custo da energia, etc.). As células com os valores da função de controlo em cada um dos 1+24 instantes de cálculo constituem o vector das variáveis de controlo a ajustar pelo algoritmo de optimização da folha de cálculo (Solver) de modo a minimizar o valor da “célula de destino” onde é calculado o valor da função objectivo.

A folha de cálculo, além volume de água armazenada (Figura 3), quantifica o tempo de funcionamento de cada grupo elevatório, em percentagem da duração de cada incremento temporal. O gráfico produzido dá uma ideia da maior ou menor regularidade da operação das bombas (Figura 4). Esta informação visual ajuda o operador/gestor do sistema no ajuste dos pesos das componentes da função objectivo.

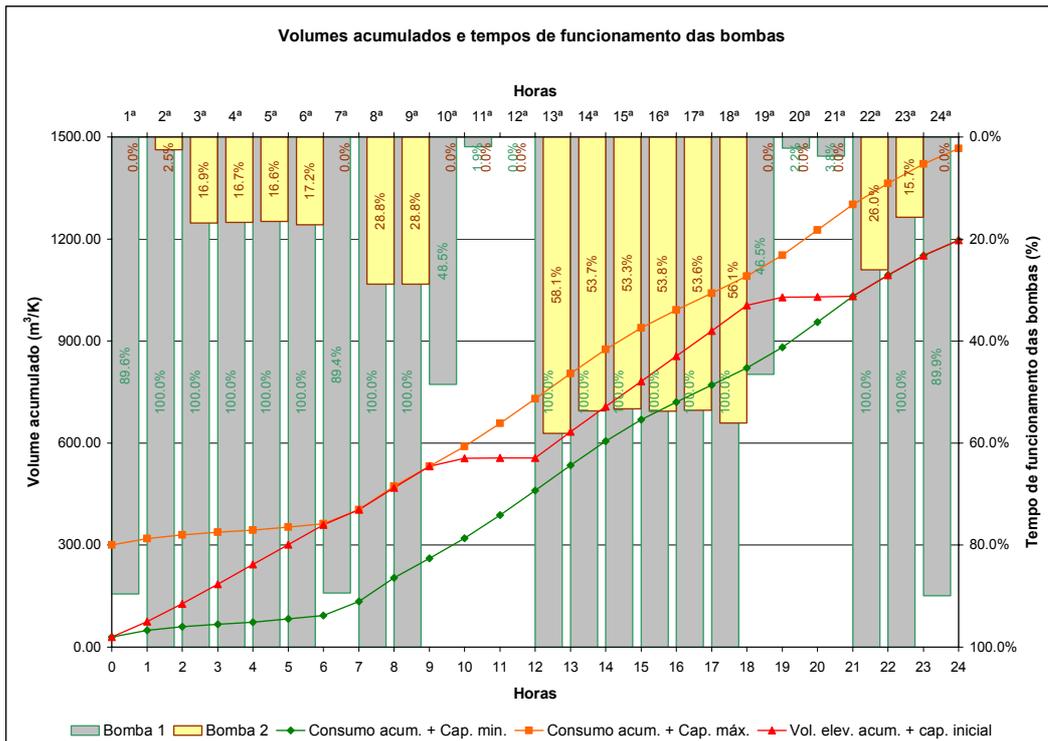


Figura 4. Volumes acumulados elevados e consumidos. Tempos de funcionamento das bombas.

### 2.3 A política operacional “óptima”

Para o exercício proposto, a política operacional “óptima” está retratada nas figuras utilizadas para auxiliar a exposição do modelo de controlo e do respectivo algoritmo de optimização (Figura 3 e Figura 4). A solução encontrada corresponde a uma função objectivo com a parcela respeitante à regularização do regime de elevação com factor de peso duplo do fixado para a parcela que quantifica o custo da energia ( $w_L = 2$  e  $w_E = 1$ ). O custo previsto para a energia consumida é de 3116 €.

Cruzando a variação horária da tarifa eléctrica (Figura 2) com os gráficos contendo a variação do volume de água no reservatório (Figura 3) e os tempos de operação dos grupos elevatórios (Figura 4) observa-se que o modelo de controlo preconiza a elevação máxima durante a noite (a que é permitida pela capacidade de armazenamento do reservatório) e somente a indispensável durante o dia (quase evitando a utilização das bombas nos dois períodos de tarifa mais elevada).

## 3. A simulação hidráulica

### 3.1 Critérios operacionais

O modelo de controlo aqui apresentado não determina directamente a operação dos grupos elevatórios – apenas estabelece, para cada hora, o volume de água a elevar. Para colocar em prática a **política operacional “óptima”** é necessário definir critérios operacionais adequados, isto é, programar os arranques e paragens das bombas em função do nível de água no reservatório abastecido e do período do dia em causa.

A programação dos grupos elevatórios deverá, em primeiro lugar, aproximar os volumes efectivamente elevados aos preconizados pelo modelo de controlo e, simultaneamente, minimizar o número de arranques e paragens; em segundo lugar, tendo sido estabelecida para o dia de consumo

esperado, deverá ser capaz de reagir adequadamente a consumos horários e/ou diários distintos dos considerados pelo modelo de controlo.

A Figura 5 ilustra os critérios operacionais definidos para as bombas no exercício exemplificativo desta metodologia. Sobrepostos ao gráfico com a variação “óptima” do nível de água no reservatório, e com os tempos de operação das bombas em cada hora, estão representados rectângulos referentes a cada uma das bombas. Os lados superior e inferior de cada rectângulo representam limites do nível de água fora dos quais o estado da bomba é imposto: acima do patamar superior, a bomba é desligada; abaixo do patamar inferior, a bomba é ligada. Quando o nível de água está compreendido entre estes dois patamares mantém-se o estado da bomba (ligado ou desligado), dependendo da história operacional imediatamente anterior. Por outras palavras, o estado da bomba é alterado quando o nível de água atravessa no sentido ascendente o patamar superior (desligar, se estiver ligada), ou quando cruza no sentido descendente o patamar inferior (ligar, se estiver desligada).

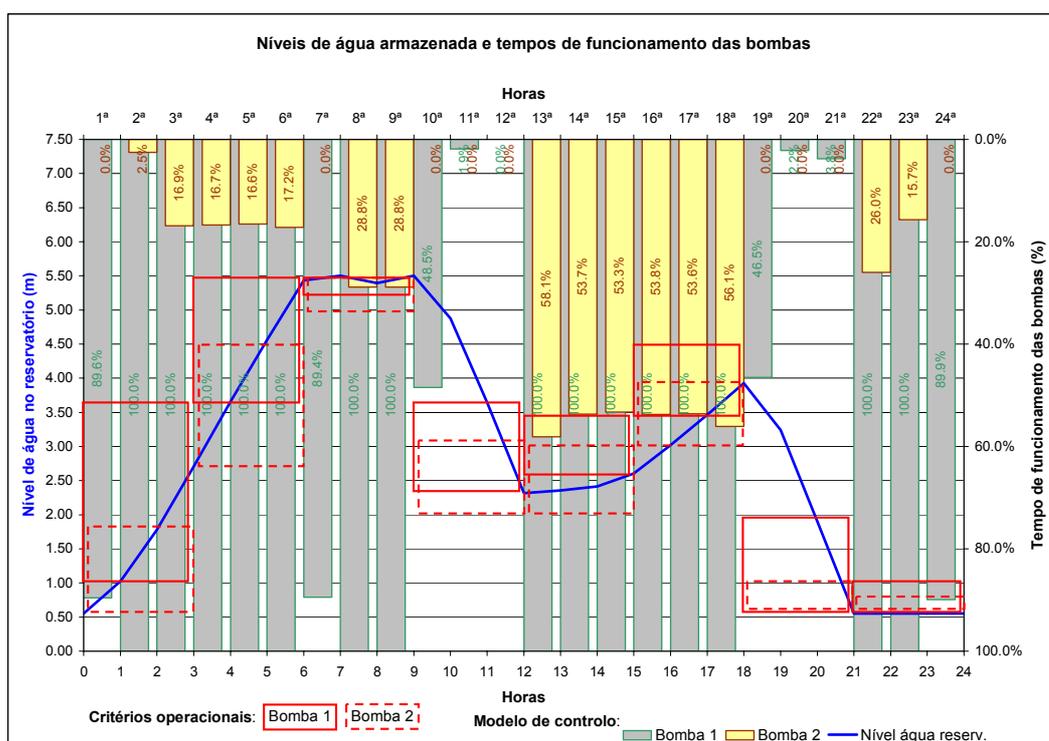


Figura 5. Variação do nível de água e tempos de funcionamento das bombas. Critérios operacionais.

No caso em apreço optou-se por estabelecer critérios de programação para períodos de 3 horas. Esta opção, quando comparada com períodos mais curtos (1 hora), revelou maior regularidade na operação das bombas, ou seja, menor número de arranques e paragens. Em contrapartida, apresenta uma reacção menos imediata a padrões de consumo mais diferenciados do estimado. A tarefa de afinação dos critérios operacionais, ponderando os diversos aspectos a considerar (economia vs. regularidade operacional; adaptabilidade a diversos padrões de consumo), competirá ao gestor/operador da estação elevatória.

### 3.2 Simulação

Simulando com o programa EPANET o comportamento da instalação elevatória para um período de 48 horas (correspondente a dois dias consecutivos de iguais características) para os dados tidos em conta no modelo de controlo (curvas características da instalação e dos grupos elevatórios, padrões de consumos e tarifários, etc.) e com os critérios operacionais acima esquematizados (Figura 5), obtiveram-se resultados próximos dos preconizados pelo modelo de controlo. Na Figura 6 observa-se a oscilação do nível de água armazenada no reservatório e na Figura 7 o caudal

elevado ao longo do período simulado. Mais do que o valor deste caudal, esta figura ilustra o comportamento dos grupos elevatórios, nomeadamente os respectivos períodos de funcionamento.

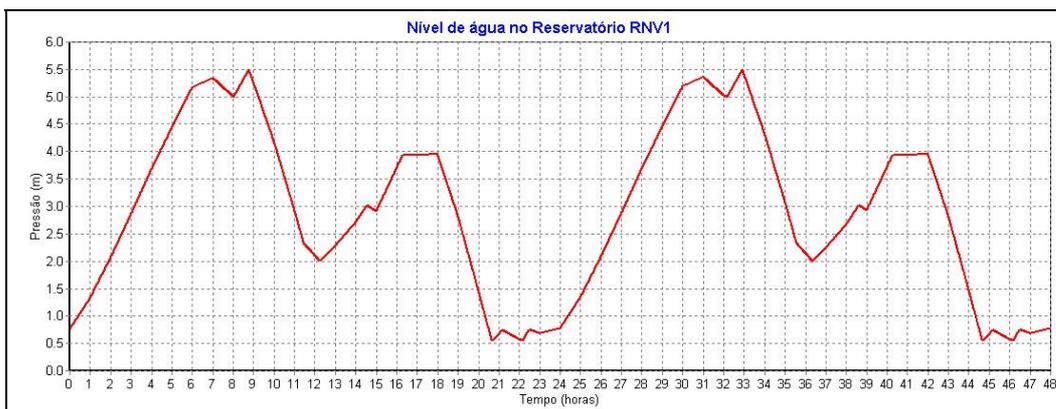


Figura 6. Simulação EPANET de 48 horas. Variação do nível de água do reservatório.

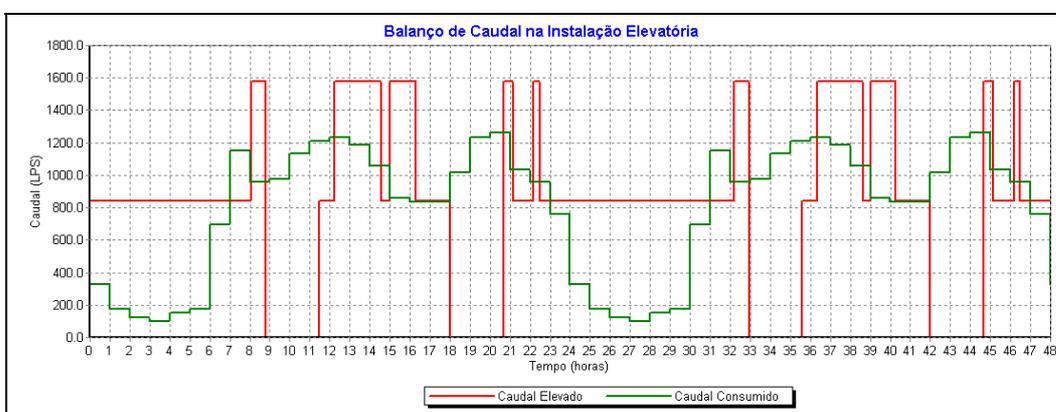


Figura 7. Simulação EPANET de 48 horas. Caudal elevado vs. caudal consumido.

O relatório de energia do EPANET (Quadro 1) permite comparar o custo da energia consumida pela instalação operada com os critérios operacionais acima referidos (3219 €) com o valor “óptimo” apurado pelo modelo de controlo (3116 €). O desvio, positivo, de 3.3% é um valor muito satisfatório, pelo que se pode admitir como adequados os critérios operacionais fixados para a estação elevatória.

Quadro 1. Relatório de energia da simulação. Custo da energia consumida num dia.

Relatório de Energia						
Bomba	Percentagem de Utilização (%)	Rendimento Médio (%)	kWh/m3	kW Médio	kW Máximo	Custo/dia
B1	77.78	75.32	0.76	2277.5	2385.6	2 484.16 €
B2	21.08	79.79	0.74	2102.42	2429.03	734.43 €
<b>Custo Total</b>						<b>3 218.59 €</b>

Estudaram-se também outros dois cenários: consumo diário 15% acima e abaixo do dia esperado, mantendo-se os factores horários. O modelo de controlo foi aplicado a cada um destes cenários e o custo de energia “óptimo” comparado com o obtido na simulação da instalação elevatória, sem modificar os critérios operacionais desta – de facto, como não é possível antecipar o consumo de um determinado dia, os critérios terão que ser os estabelecidos para o dia esperado (médio). Para o primeiro cenário o desvio foi de +6.6%, enquanto que para o segundo ficou abaixo de +0.1%. Não foram testados outros cenários, nomeadamente outras realizações dos factores horários do consumo de água num dia útil.

## 4. Conclusões

O exercício de eficiência económica (minimização do custo da energia) de uma instalação elevatória aqui apresentado não é particularmente complexo. A formulação do modelo de controlo e a afinação da política operacional recorrem a conceitos simples e a ferramentas de cálculo conhecidas e acessíveis: a folha de cálculo Excel e o simulador hidráulico EPANET. Os resultados obtidos para o problema apresentado são, de certo modo, os esperados – elevar o máximo durante a noite (o permitido pela capacidade de armazenamento do reservatório) e somente o indispensável durante o dia (quase evitando a utilização das bombas nos dois períodos de tarifa mais elevada). Contudo, o modelo de controlo desenvolvido permite estudar muitos outros cenários: diferentes padrões de consumo (dias úteis, fim de semana, distintas épocas do ano, etc.), diferentes capacidades de armazenamento (no contexto de uma análise económica), diferentes variações tarifárias, etc; também permite testar a segurança da política operacional programada em dias com consumos imprevistos.

Em suma, ao evidenciar que, mobilizando meios de cálculo relativamente simples, é possível melhorar a eficiência económica de uma instalação elevatória, este exercício estimula o estudo desta problemática e a concepção de modelos mais elaborados para a gestão de sistemas mais complexos, com múltiplas estações elevatórias, vários reservatórios, interligados ou não, etc. Mais, desafia à investigação e ao desenvolvimento de modelos de controlo mais evoluídos que, apoiados numa monitorização permanente do consumo, tenham capacidade para reformular e adaptar “na hora” a operação da instalação elevatória.

## 5. Referências bibliográficas

- Coelho, S. T., Loureiro, D., Alegre, H. (2005) - "Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água", IRAR, Lisboa.
- Goldman, F. E., Sakarya, A. B. A., Ormsbee, L. E., Uber, J. G., Mays, L.W. (2000) - "Optimization Models for Operations." in Mays, L., ed., *Water Distribution Systems Handbook*, American Water Works Association, McGraw-Hill, New York, pp. 16.1-16.47.
- 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](http://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.