

Operação eficiente de bombagem

Abstract

Os sistemas de distribuição de água são infraestruturas essenciais para a sociedade moderna, tendo como objetivo principal o fornecimento de água às diversas entidades com o menor custo possível. Na prática, garantir uma operação ótima destes sistemas requer lidar com inúmeros desafios, destacando-se a incerteza associada às previsões de consumo de água. O objetivo deste trabalho é a operação eficiente de uma rede de abastecimento de água, tendo em conta um cenário com previsões incertas. Os resultados finais serão apresentados sob a forma de um poster, ilustrando visualmente a metodologia utilizada e os principais resultados obtidos.

1 Introdução

Todos os sistemas de engenharia devem apresentar elevada eficiência, tanto energética como económica. No caso dos sistemas de abastecimento de água, as estações elevatórias (sistemas de bombagem) devem ser geridas cuidadosamente, com vista à redução dos custos energéticos. Tipicamente, esse objetivo é alcançado por meio do uso de reservatórios de armazenamento (ou seja, tanques de água), permitindo que as bombas operem durante períodos com tarifas mais económicas (i.e., quando os custos energéticos são mais baixos). Contudo, devido ao limite da capacidade de retenção de água nos depósitos e capacidade de bombagem não é possível bombear água exclusivamente nos períodos mais vantajosos economicamente. Deste modo, é essencial implementar um planeamento otimizado das operações de bombagem, considerando-se (i) a capacidade dos depósitos, (ii) as necessidades reais de água dos consumidores e (iii) as restrições operacionais das bombas. Este planeamento tem como objetivo final garantir a satisfação da procura de água ao menor custo energético possível.

2 Caso de estudo: subsistema F

Pretende-se minimizar o custo de bombagem de um subsistema de abastecimento que é composto por um depósito **F**, uma bomba **P** e os pontos de consumo **VC** e **R**, como mostra a figura 1.

O depósito **F** é um reservatório situado a uma cota de **150 m** com um área **A** de **185 m²**. O reservatório possui uma altura de **9 m**, mas, por razões de segurança, este só pode operar entre os níveis **2** e **7 m**. No início do dia, o nível de água neste reservatório é de **4 m**. Este reservatório abastece os consumidores da região **VC** e,

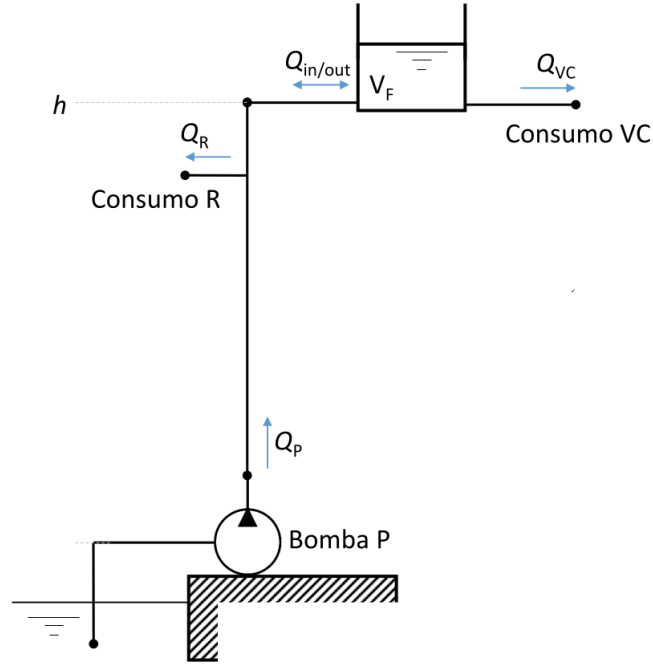


Fig. 1 Subsistema de abastecimento de água

adicionalmente, fornece água à região **R** quando a bomba não está em funcionamento, utilizando o ramal **RF** como retorno. A bomba, localizada à cota **0 m**, possui uma eficiência de **65%** e uma curva hidráulica definida por:

$$h_p[m] = 260 - 0.002 \cdot Q^2, \quad (1)$$

onde o caudal, **Q**, está expresso em m^3/h .

As condutas, em ferro fundido, apresentam um factor de atrito de Fanning de **0.02**. O comprimento das tubagens é de **2.5 km** entre a bomba e o ponto de consumo **R** e **5 km** entre o ponto de consumo **R** e o reservatório **F**.

Este sistema de abastecimento possui consumos diários das regiões **V** e **R**, ilustrado na figura 2. Foi previsto para a região **R** o seguinte consumo diário:

$$Q_R = -0.004t^3 + 0.09t^2 + 0.1335t + 20, \quad (2)$$

onde a variável t é o tempo em horas. No caso da região **V**, existe incerteza associada à previsão dos consumos diários, sendo gerada então 2 cenários de previsão $Q_{VC_{MAX}}$ e $Q_{VC_{MIN}}$, que correspondem respetivamente aos cenários extremos de excesso e défice de consumo de água:

$$\begin{aligned} Q_{VC_{MAX}} = & -1.19333 \times 10^{-7}t^7 - 4.90754 \times 10^{-5}t^6 + 3.733 \times 10^{-3}t^5 \\ & - 0.09621t^4 + 1.03965t^3 - 3.8645t^2 - 1.0124t + 75.393 \end{aligned} \quad (3)$$

$$Q_{VC_{MIN}} = 1.19333 \times 10^{-7}t^7 - 6.54846 \times 10^{-5}t^6 + 4.1432 \times 10^{-3}t^5 - 0.100585t^4 + 1.05575t^3 - 3.85966t^2 - 1.32657t + 75.393 \quad (4)$$

ATENÇÃO: Este polinómio é muito sensível à precisão, portanto é recomendado usar exatamente os valores apresentados sem arredondar.

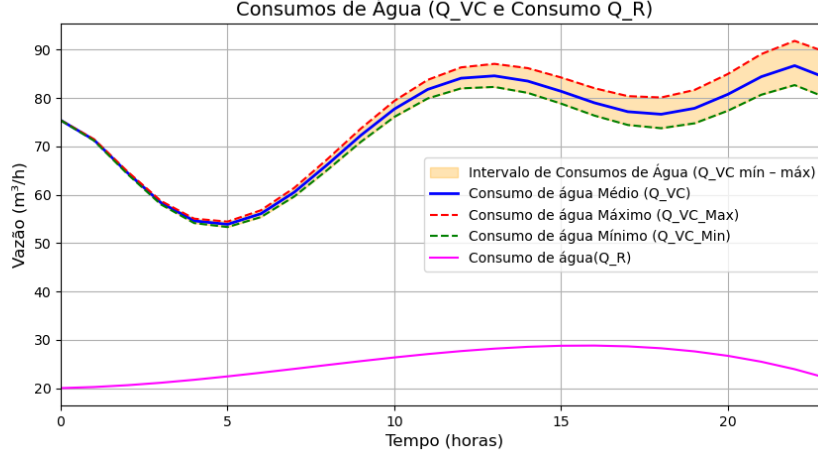


Fig. 2 Consumos de água das regiões VC e R.

O tarifário ao longo deste dia de operação está representado na tabela 1. Considere que as perdas de cargas ao longo da conduta podem ser representadas da seguinte forma:

$$h_{\text{perdas}} = \frac{32fL}{d^5 g \pi^2} Q^2, \quad (5)$$

onde Q é o caudal da respetiva conduta, L é o comprimento da conduta, d é o diâmetro da conduta. Considere que as condutas possuem todas **0.3** m de diâmetro.

Ao desenvolver equações de balanço de massa e energia deste sistema, considere que as respetivas equações são válidas para qualquer instante t . Para cálculos médios num período de tempo Δt , podem ser utilizados valores médios de caudais e cargas hidráulicas desse período.

3 Formulação do problema de otimização

Em sistemas de abastecimento de água, quando a bomba hidráulica só pode assumir estados binários (ligada ou desligada), o problema de minimização de custos consiste

Table 1 Tarifário energético ao longo do dia.

Intervalo [h]	Custo [€/kWh]
[0, 2[	0.0713
[2, 4[	0.0651
[4, 6[	0.0593
[6, 8[	0.0778
[8, 10[	0.0851
[10, 12[	0.0923
[12, 14[	0.0968
[14, 16[	0.10094
[16, 18[	0.10132
[18, 20[	0.10230
[20, 22[	0.10189
[22, 24[	0.10132

em definir os períodos de tempo em que a bomba deve permanecer ligada. Neste trabalho, portanto, a variável de decisão \hat{x} representa justamente a indicação desses períodos de ativação. Uma forma hipotética de modelar isso é por meio de um vetor em que:

- A primeira metade x contém os instantes de início de cada ativação da bomba;
- A segunda metade de x contém as durações correspondentes a cada ativação.

Por exemplo, consider $x = [1, 16] + [5, 5]$. Nest caso, podemos interpretar que a bomba é ligada no instante $t=1$, permanecendo ligado por 5 unidades de tempo, e posteriormente a bomba é ativada novamente no instante $t=16$, permanecendo ligada por mais 5 unidades de tempo.

Dessa forma, o vetor x capta tanto o momento em que a bomba começa a operar quanto por quanto tempo ela permanece em funcionamento em cada ciclo de ativação.

O custo de operação da bomba é função do tarifário energético, da potência total \dot{W}_P e da eficiência η da bomba, e do estado ou tempo de operação da bomba. Este custo pode ser formulado para um dia de operação como

$$C(\mathbf{x}) = \int_0^{24h} \frac{\dot{W}_P(Q, h)}{\eta} x(t) \text{ Tarif}(t) dt. \quad (6)$$

Sabendo que $\dot{W}_P = \rho g Q_P h_P$ (onde ρ e g são respetivamente a densidade da água aceleração gravitacional) e que a bomba obdece à equação hidráulica $h_P = a_1 + a_2 Q_P^2$, o custo de operação pode ser escrito para uma soma discreta de $\mathbf{n}_{\text{inc.t}}$ periodos de tempo que perfazem as 24 h da seguinte forma:

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n_{\text{inc.t}}} \frac{\rho g}{\eta} (a_1 \bar{Q}_{P,i} + a_2 \bar{Q}_{P,i}^3) x_i \text{ Tarif}_i, \quad (7)$$

onde $\bar{Q}_{P,i}$, Tarif_i e \mathbf{x}_i são o caudal médio da bomba P, o custo da energia e o estado/tempo da bomba no período de tempo i , respetivamente. Note-se que a dependência do caudal \bar{Q}_P pela variável de decisão \mathbf{x} pode ser desprezada.

4 Tarefas

O output das seguintes tarefas deve ser apresentado em formato de Poster (detalhes na seguinte secção).

4.1 Operação ótima de sistema hidráulico

Pretende-se nesta tarefa o desenvolvimento das equações de massa e energia deste sistema hidráulico, a aplicação de uma operação ótima (num horizonte de tempo de 24 horas) para cada cenário de consumo de água de **VC** (i.e., para os cenários $Q_{VC_{MAX}}$ e $Q_{VC_{MIN}}$). O **Poster** deverá conter explicitamente as seguintes informações:

- O desenvolvimento de equações de conservação de massa e energia neste sistema;
- Para cada um dos cenários extremos de consumo de água, deve ser ilustrado um gráfico (de um horizonte de tempo de 24 horas) que inclui o estado da bomba, nível de água do depósito, custos ao longo do tempo, e energia utilizada ao longo do tempo. É reiterado que para cada cenário de consumo as informações fornecidas referidas devem ser apresentadas no mesmo gráfico.
- O custo total e operação das bombas (i.e., x) obtidos do processo de otimização, para cada cenário de consumo.

Para auxiliar no desenvolvimento do código para a otimização da operação de bombas de água, é disponibilizado um exemplo de código em Python. Este script serve apenas como uma sugestão e não é obrigatório utilizá-lo, sendo possível recorrer a outras linguagens de programação conforme a preferência de cada um.

4.2 Lidar com incertezas

Como explicado anteriormente os consumos máximos e mínimos de **VC** ilustrados representam, respetivamente, cenários extremos de excesso e défice de consumos de água. Lidar com incertezas na operação de redes de abastecimento de água é uma questão aberta em engenharia.

Esta segunda tarefa envolve o desenvolvimento de uma metodologia que lide com estes cenários de modo a se obter uma operação robusta, mas cujo custo seja baixo. Tipicamente o não cumprimento de consumos de água (de segurança) exigidos traduz-se no não cumprimento dos níveis de água nos depósitos, que consequentemente poderá levar ao dano da infraestrutura. Este dano é normalmente extremamente elevado levando na prática a operações que se focam mais em robustez do que em minimização de custos. Para fins pedagógicos, considera-se aqui que o não o cumprimento dos limites de água dos depósitos em cada hora acrescenta 5 euros. Especificamente, sempre que o limite do tanque não for respeitado, será aplicada uma penalização de 5 euros para essa hora. Além disso, a cada hora subsequente em que a violação ocorre, um novo acréscimo de 5 euros será adicionado.

Esta tarefa em específico possui uma conotação subjetiva em termos de metodologia a utilizar. Portanto, a avaliação (para esta sub tarefa) irá ser feita de uma forma comparativa entre os vários grupos de trabalho considerando: criatividade e equilíbrio entre robustez e minimização de custo. O método desenvolvido deverá ser ilustrado o mais explicitamente possível no poster, ilustrando o resultado final por via de um gráfico e o custo final, e descrição da metodologia. O método desenvolvido deverá ser replicado, portanto é necessário também a submissão de um código (mais detalhes na seguinte secção).

5 Entrega do Trabalho

Este trabalho pode ser desenvolvido **individualmente** ou em **grupos de até 3 elementos**. O trabalho desenvolvido deverá ser apresentado em formato de **poster**, com dimensão **A0** (841mm x 1189mm). Deverá ser utilizado um tamanho de letra mínimo de 25 e máximo de 65. Recomenda-se a utilização de PowerPoint para criar o poster, mas o poster a ser entregue deverá ser feito em ficheiro **pdf**.

Cada poster deve incluir:

- Um título (poderá ser genérico ou relacionado com a metodologia desenvolvida na Tarefa 4.2;
- O nome e número mecanográfico de todos os participantes do grupo;
- O nome do curso e o nome da disciplina

Para além das informações mencionadas atrás, o design do poster é livre. No entanto, devem ser respeitadas algumas normas básicas de design, tais como:

- Garantir a legibilidade do texto (ter atenção ao contraste entre as cores de fundo e do texto);
- Assegurar um espaçamento adequado entre blocos de texto e outros elementos visuais.

O código desenvolvido especificamente para a Tarefa 4.2 (não é necessário código para a Tarefa 4.1), deve estar disponível num repositório github, cujo link deve constar no poster. Esse repositório deve incluir:

- O código;
- Um guia de instruções detalhado, indicando as versões de software utilizados especificamente para este trabalho e como executar o ficheiro.

A execução do código deve resultar em gráficos e/ou valores que estejam ilustrados no poster (referentes à Tarefa 4.2).

A submissão do poster deverá ser feita até às **23h59 do dia 4 de Abril** pela plataforma elearning. Por fim, no nome do ficheiro a ser entregue, deve ser indicado o nome de um dos elementos do grupo, seguido pelo seu número mecanográfico. Aceita-se apenas uma submissão por grupo.