

METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM BASE NUM CASO DE ESTUDO

Methodology for the Energy Optimization of Water Supply Systems Based on a Case Study

ANA SOUSA ⁽¹⁾, LUCIANA DAS NEVES ⁽²⁾ e JOSÉ TENTÚGAL-VALENTE ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec11153@fe.up.pt

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

⁽³⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, tvalente@fe.up.pt

Resumo

Este trabalho visou o desenvolvimento de uma metodologia de otimização energética da operação de sistemas de abastecimento de água. Inicialmente, identificaram-se as variáveis do sistema mais importantes para essa otimização e fez-se uma pesquisa bibliográfica sobre algoritmos de otimização adequados ao problema em questão. Numa segunda fase, o problema foi conceptualizado e a metodologia desenvolvida, tendo em conta a minimização do custo com a energia elétrica e a regularidade das operações de bombagem. Com base em dados reais executaram-se dois algoritmos de otimização, o algoritmo genético e a pesquisa harmónica, para determinar soluções ótimas de operação para diversos cenários de consumo.

De uma maneira geral, considera-se que a metodologia desenvolvida permite avaliar a influência económica de algumas tomadas de decisão durante a operação de estações elevatórias.

Palavras-Chave: Abastecimento, eficiência, otimização, algoritmo genético, pesquisa harmónica.

Abstract

This work aimed at the development of a methodology for the energy optimization of water supply systems. During the first phase of the work, the most important variables of the system for that optimization were identified and a research on the optimization algorithms was made. In the following phase, the problem was conceptualized and the optimization methodology developed, given the two main objectives, the minimization of the costs with energy consumption and the regularity of the pumping operations. Based on actual data and information two optimisation algorithms, genetic algorithm and harmonic search were used to analyse several scenarios.

Overall, it's possible to conclude that the developed methodology allows to study the influence in economics of decisions taken during the operation of pumping systems.

Keywords: Supply, efficiency, optimization, genetic algorithm, harmonic search.

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

Os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) assumem um papel crucial no fornecimento de água às populações. No setor, o consumo de energia elétrica representa a maior parcela de encargos financeiros mais correntes sendo que é nas estações elevatórias que a maior parte desse valor se verifica. Na generalidade das estações elevatórias, pequenas modificações nos equipamentos, investimentos e mudanças operacionais podem promover uma redução significativa dos gastos energéticos. Nesse sentido, vários investigadores têm-se ocupado com a formulação matemática do problema, procurando metodologias para definição de uma política operacional ótima de bombas, uma vez que esta permite, de uma forma prática e eficaz atingir a eficiência económica sem a necessidade de intervenção nas infraestruturas.

O presente estudo tem como objetivo a criação de ferramentas de otimização, com especial ênfase na eficiência económica e energética de estações elevatórias, pretendendo fornecer indicações adequadas, tanto a gestores como operadores, para uma boa utilização de sistemas de abastecimento de água, otimizando o funcionamento das suas estações elevatórias.

Com este trabalho pretende-se demonstrar a possibilidade de redução dos gastos energéticos através da implementação de medidas de fácil execução e pequeno investimento, assim como testar várias possibilidades de ação sobre o sistema, bem como avaliar os seus encargos.

De modo a cumprir os objetivos, recorreu-se ao programa computacional "Matlab", onde foram escritos os algoritmos otimizadores e se fez a modelação dos resultados obtidos. Para avaliar a metodologia proposta contou-se com a colaboração da empresa Águas do Norte, S.A.

Estudou-se uma parcela de um sistema multimunicipal, designadamente o percurso desde a estação de tratamento de água de Areias de Vilar até aos reservatórios de Adães (Barcelos), servindo de instrumento para a verificação da aplicabilidade da ferramenta desenvolvida.

2. Revisão da Literatura - Métodos de Otimização

A aplicação de métodos de otimização a sistemas de abastecimento de água pode tornar-se uma tarefa muito complexa devido à quantidade de variáveis envolvidas e à complexidade da interação entre elas.

Devido a essa complexidade, alguns investigadores optam por desenvolver os seus métodos de otimização integrando apenas parcialmente os parâmetros e as variáveis envolvidas no problema em estudo, ou considerando apenas parcialmente a sua extensão. Desta forma, a formulação do problema torna-se mais simples; porém, esta simplificação comporta, necessariamente, a inclusão de erros na solução encontrada. A importância quantitativa e qualitativa desses erros deve ser analisada e o seu impacto perfeitamente compreendido.

A incerteza na definição de algumas variáveis e parâmetros deve ser avaliada com recurso a uma análise de sensibilidade e, sempre que possível, deve ser feita a validação e a calibração dos métodos aplicados com recurso a dados reais de exploração.

No caso dos SAA a função objetivo consiste em minimizar o custo de implementação e o custo energético de utilização, considerando algumas restrições, como é o caso dos limites de pressões, velocidades regulamentares e a relação entre a oferta e a procura. Dessa forma, encontram-se algumas estratégias de redução dos custos com a energia elétrica.

Em alguns casos, essas estratégias resultam na diminuição efetiva do consumo de energia (satisfazendo simultaneamente critérios económicos e ambientais).

Entre as medidas de gestão de sistemas com impacto no consumo da energia está a diminuição das perdas de carga, a alteração de componentes do sistema, a diminuição de diâmetros e a limpeza de condutas.

Noutros casos, exigem-se modificações internas dos sistemas, com ou sem investimento, de que são exemplo as alterações administrativas, as alterações da potência contratada, a mudança de tarifário ou de fornecedor de energia, a alteração da tensão de alimentação da estação elevatória, a correção do fator de potência (relação entre a potência ativa e a potência aparente) e as melhorias no fator de carga (razão entre o consumo médio de energia durante um período de tempo e a utilização máxima registada no mesmo período), que levam à redução dos custos. Esta redução pode ainda ser conseguida através da otimização da política operacional das bombas, tirando partido dos períodos tarifários de energia elétrica.

Atualmente, existem diversas ferramentas matemáticas que funcionam eficazmente como auxiliaadoras no desenvolvimento de metodologias de otimização.

Estas ferramentas permitem, com suficiente rapidez e eficácia, embora com erros associados, prever o comportamento hidráulico, realizando análises de sensibilidade e simulação de vários cenários a partir de grandezas como o caudal, as pressões, as velocidades e as perdas de carga. Essas ferramentas permitem que, sem qualquer intervenção no sistema, se preveja a sua resposta e se antecipem os problemas que possam vir a ocorrer.

2.1. Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são métodos de otimização e investigação inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos. Estes algoritmos procuram a solução mais adequada para um problema, qualquer que seja a natureza das suas variáveis, e seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto.

De acordo com Darwin, 1998, "Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior probabilidade terá de sobreviver e de gerar descendentes". Neste caso particular, a otimização consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida nesse processo de forma a encontrar soluções cada vez melhores.

O primeiro passo de um algoritmo genético típico é a geração de uma população inicial de cromossomas (strings) que é formada por um conjunto aleatório de cromossomas que representam parâmetros da função objetivo a serem maximizados ou minimizados. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada e cada cromossoma recebe uma nota, refletindo a qualidade da solução que ele representa. Estes são assim copiados de acordo com o valor que lhes é atribuído. Em geral, os cromossomas mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados, processo ao qual se atribui o nome de Darwinismo. Através dos operadores de cruzamento e mutação, os membros selecionados podem sofrer modificações gerando descendentes. O cruzamento ocorre em duas etapas, sendo que na primeira se determina aleatoriamente quais os cromossomas que se irão relacionar e, na segunda, em que posição se realizará o cruzamento. A mutação é uma alteração aleatória e acidental do valor de uma qualquer posição do cromossoma. Todas as alterações surgem com base em probabilidades. Este processo repete-se até ser encontrada uma solução aceitável.

2.2. Pesquisa harmónica

Os algoritmos de pesquisa harmónica são algoritmos meta-heurísticos, originalmente propostos por Geem *et al.*, 2001, e a sua criação inspirou-se na pesquisa de uma harmonia musical. Considerou-se uma sucessão de improvisação onde os músicos alteram as notas dos seus instrumentos em busca de uma harmonia perfeita. Este algoritmo possui a característica de identificar regiões de elevado desempenho dentro da memória disponível num intervalo de tempo.

Os parâmetros do algoritmo harmónico são o tamanho da memória harmónica (*Harmony Memory Size - HMS*), a taxa de consideração da memória harmónica (*Harmony Memory Consideration Rate - HMCR*), a taxa de ajuste dos valores (*Pitch Adjustment Rate - PAR*), a largura de banda (*BandWidth - BW*) e o número máximo de improvisações ou iterações (*Number of Improvisations - NI*).

Embora na versão original tenha sido proposto um processo no qual estes parâmetros eram constantes, tem-se verificado que, para alguns problemas, resulta numa convergência mais tardia. Como tal, têm vindo a ser desenvolvidos vários trabalhos que sugerem um ajuste dinâmico dos parâmetros em função do avanço da pesquisa harmónica.

Recentemente, foi proposta uma versão de procura harmónica com ajuste adaptativo (*Parameter Adaptive Harmony Search*) que ajusta dinamicamente estes parâmetros, levando a que, numa fase inicial, se permita uma grande variedade de soluções que exploram todo o campo de possibilidades, e à medida que o processo avança, ir convergindo para a melhoria das soluções na memória.

Este processo, proposto por Kumar, *et al.*, 2014, utiliza uma variação exponencial do parâmetro BW, sugerida anteriormente por Mahdavi, *et al.*, 2007, equação [1], e uma variação linear do parâmetro HMCR, equação [2], e uma variação exponencial do parâmetro PAR, equação [3], proposta pelo autor.

$$BW(gn) = BW_{\max} * e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{BW_{\min}}{BW_{\max}}\right)}{NI} * gn\right)} \quad [1]$$

$$HMCR(gn) = HMCR_{\max} * \frac{(HMCR_{\max} - HMCR_{\min})}{NI} * gn \quad [2]$$

$$PAR(gn) = PAR_{\max} * e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{PAR_{\min}}{PAR_{\max}}\right)}{NI} * gn\right)} \quad [3]$$

As variáveis com índice “max” ou “min” referem-se aos intervalos de valores possíveis para as respetivas variáveis e “gn” representa a iteração atual.

O algoritmo inicia-se com a criação aleatória de harmonias e seu armazenamento na memória harmónica. Cada harmonia é avaliada individualmente de acordo com a função objetivo do problema.

No momento de improvisação de uma nova harmonia, é considerada uma probabilidade de HMCR para selecionar elementos da memória harmónica ou é gerado um valor através da distribuição uniforme para compor o vetor da nova harmonia.

Na segunda etapa do improviso, é considerada uma probabilidade de PAR gerar uma pequena alteração no valor atual, baseado no parâmetro BW.

Ao avaliar a nova improvisação, é verificado se ela é melhor que a pior harmonia contida na memória harmónica. Sendo assim, ocorre a atualização da memória, ou seja, os vetores são substituídos.

3. Metodologia para Otimização de Operações de Bombagem em Sistemas de Abastecimento de Água

3.1. Formulação do problema e definição de objetivos

Considere-se um sistema adutor genérico, composto por dois reservatórios, um a montante e outro a jusante (cada um com uma ou mais células), e uma estação elevatória (composta por um ou mais grupos elevatórios, que podem funcionar em simultâneo ou como reserva ativa) que permite a elevação da água tratada para abastecimento entre os dois reservatórios.

Considere-se também que a operação (e a otimização) dessa estação elevatória depende, sobretudo, do volume diário de água disponível para bombagem, do caudal diário de distribuição à(s) rede(s) de jusante, das características dos grupos eletrobomba, dos níveis máximos e mínimos dos reservatórios, dos fatores horários de consumo de água e, ainda, dos períodos tarifários da energia elétrica.

O elevado número de parâmetros intervenientes no processo de decisão operacional transforma-o num problema complexo, pelo que se torna necessário recorrer a ferramentas como os algoritmos de otimização. Esses algoritmos devem ser validados com base em dados de operação.

Procurou-se gerir os níveis de água nos reservatórios de modo a permitir concentrar os períodos de funcionamento dos grupos elevatórios maioritariamente nas horas cujo custo da energia elétrica é mais barato – satisfação de critérios económicos.

Foi ainda dada preferência à regularidade da operação, indiretamente associada também à minimização de custos de manutenção. A solução ótima procurada verifica simultaneamente as duas condições supracitadas para um período de 24 horas, com garantia das restrições hidráulicas, físicas e operacionais do sistema adutor em estudo.

3.2. Metodologia de cálculo desenvolvida

3.2.1. Função objetivo

O código MATLAB escrito para a definição da função objetivo para este trabalho está dividido em três partes: introdução, identificação das variáveis utilizadas e função de otimização.

A introdução e identificação das variáveis utilizadas, ou variáveis de estado, compreende a introdução manual dos valores da curva característica da instalação, das curvas características das bombas e das curvas de rendimento, assim como das características dos reservatórios, dos intervalos temporais, dos caudais de saída do reservatório de jusante e das tarifas energéticas.

Seguidamente inicia-se um ciclo “for”, dentro do qual todos os cálculos intermédios necessários para o cálculo do custo final por intervalo de tempo ficam registados numa matriz denominada por “Dados”. Esses cálculos intermédios compreendem o cálculo do caudal elevado, da altura manométrica, do rendimento, da potência, da energia, do custo da energia, da altura de água no reservatório de jusante após o primeiro intervalo temporal e das restrições.

A função objetivo estabelecida tem em vista a minimização do custo da energia elétrica consumida pelos grupos elevatórios. Nessa função, o volume de água a elevar em cada hora é a variável de decisão.

A equação [4] permite determinar, para um determinado intervalo de tempo, o volume final de água no reservatório de jusante, $V_{R,final}$. Conforme indicado, esse volume é igual ao volume inicial, $V_{R,inicial}$, adicionado da diferença entre o volume de água elevado, $V_{elevado}$ e o volume de água consumido, $V_{consumido}$.

$$V_{R,final} = V_{R,inicial} + (V_{elevado} - V_{consumido}) \quad [4]$$

O acumulado do volume de água elevado, entre o instante inicial e o instante final, corresponde à integração em ordem ao tempo do caudal elevado entre esses instantes ou ainda ao somatório dos volumes elevados compreendidos entre esses instantes.

O volume de água no reservatório no final de cada incremento temporal, $V_{R,i}$ não pode ultrapassar a capacidade máxima do reservatório nem deve ser inferior à capacidade mínima fixada.

Assim, o volume de água no reservatório de jusante fica sujeito às restrições de desigualdade indicadas nas Eqs. [5] e [6], onde i é o incremento temporal e n o número de intervalos de acordo com o intervalo temporal considerado.

$$V_{R,i} = V_{R,\text{inicial}} + V_{\text{elevado},i} - V_{\text{consumido},i} \leq \text{Volume máximo}, \forall i = 1, \dots, n \quad [5]$$

$$V_{R,i} = V_{R,\text{inicial}} + V_{\text{elevado},i} - V_{\text{consumido},i} \geq \text{Volume mínimo}, \forall i = 1, \dots, n \quad [6]$$

As expressões das equações [5] e [6] condicionam a função de controlo, [4], a uma faixa limitada, sendo evidente que quando esta se encosta ao limite superior, o reservatório está totalmente cheio e, quando acontece o oposto, o reservatório contém apenas o volume mínimo de água estabelecido.

De modo a evitar que o algoritmo convergisse para uma solução correspondente a um mínimo local, as restrições não foram aplicadas no formato apresentado, mas sim como penalizações ao valor final do custo. Ou seja, quando se transpõe o volume máximo ou o volume mínimo, é somado ao custo um valor.

O valor da penalização a aplicar foi alvo de um estudo cuidadoso, uma vez que estes parâmetros necessitam de ser ajustados empiricamente para todos os problemas. Concluiu-se que a forma mais adequada de aplicar a penalização seria incrementar o custo da iteração em função do número de intervalos de tempo em que as condições não são respeitadas.

Assim, para cada ocorrência é calculado o valor médio do funcionamento da bomba no intervalo, agravado de um fator de 1,5, e adicionado ao valor total do custo. Da mesma forma, para permitir obter um resultado regularizado da operação dos grupos elevatórios, usou-se o fator penalizador, desta feita, aplicado apenas quando ocorre o arranque de uma ou duas bombas, levando a diminuição no número de paragens e arranques do modelo.

Este cálculo é apenas executado durante a otimização, sendo descartado na apresentação dos resultados. A função de penalização adotada resulta de um estudo experimental com base nas propostas de Coello *et al.*, 2012.

Quanto ao volume de água no interior do reservatório no instante inicial e final dos períodos de energia mais cara, não foi definido nenhum patamar, dando liberdade ao modelo.

Como consequência destas considerações, a função objetivo utilizada no decorrer da otimização, cujo valor interessa minimizar, tem a seguinte forma:

$$F_{\text{obj}} = \sum_{i=1}^n [(E_i * T_i) + P_i + A_i] \quad [7]$$

em que, E_i representa a energia consumida durante o incremento temporal de ordem i , T_i o custo unitário de energia associado a esse incremento temporal, P_i o valor de penalização correspondente às restrições (que quando bem dimensionado será igual a zero) e A_i o valor de penalização correspondente aos arranques.

Após a obtenção do conjunto mais regularizado de bombas, é executada uma função muito semelhante à anterior, mas onde não se contabilizam as penalizações, obtendo o valor final correspondente ao custo real.

3.2.2. Parâmetros de Caracterização do Algoritmo Genético

O algoritmo genético foi utilizado para obter uma solução otimizada e célere para o problema. Trata-se de um método mais limitado em termos de amplitude de opções e do resultado final; contudo fornece soluções que cumprem com todos os requisitos regulamentares.

O comportamento do algoritmo genético pode ser influenciado por diversos parâmetros, tais como o tamanho da população inicial, o número de gerações e a probabilidade de cruzamento, migração e mutação. Assim sendo, realizaram-se vários testes de sensibilidade para analisar a forma como os parâmetros afetam o resultado final do problema em causa.

A escolha da melhor configuração para os parâmetros é uma tarefa difícil pois depende do tipo de problema tratado e obriga à realização de um elevado número de testes para cada parâmetro.

Apesar da importância conhecida dos parâmetros mencionados anteriormente, no problema proposto não se verificou uma influência significativa. Após testes preliminares, a amplitude dos valores testados para cruzamento, mutação e migração não trouxeram proveito à otimização, pelo que se optou pela adoção dos valores propostos pela ferramenta de otimização do Matlab.

Executaram-se, então, testes ao tamanho da população, pois, desde logo, se notou a sua elevada ação no resultado final. Apresentaram-se várias hipóteses e os testes foram realizados para o dia de maior consumo anual, na versão final do programa.

O tamanho da população adotado é 2000, uma vez que se mostra o mais adaptado ao objetivo final, minimizando os custos.

O número de gerações não foi alvo de testes exaustivos, pois os testes realizados convergiam sempre para o valor utilizado.

Com o objetivo de encontrar um equilíbrio entre o tempo de análise e a qualidade dos resultados, foram definidos dois critérios de paragem: o primeiro é o número máximo de gerações e o segundo é um critério de estabilidade que interrompe o processo, caso decorram 200 iterações sem alteração do resultado. Inicialmente o valor máximo de iterações sem alteração escolhido foi de 100, mas por uma razão de segurança, decidiu-se alterar para 200 iterações, tendo assim maiores garantias de estabilização da otimização.

3.2.3. Parâmetros de caracterização da pesquisa harmónica

Com o objetivo de obter uma solução o mais otimizada possível foi implementado um algoritmo de pesquisa harmónica, (Geem *et al.*, 2001).

Foram realizados vários testes de sensibilidade dos parâmetros, incluindo o impacto da utilização de parâmetros adaptativos. Os testes foram realizados para o dia de maior consumo e na versão final do programa.

O método aplicado baseia-se no proposto por Nogueira, 2015. Este método aplica um decréscimo exponencial do PAR (Pitch Adjustment Rate) e um crescimento linear do HMCR (Harmony Memory Consideration Rate), sugerido por Kumar, *et al.*, 2014, Figura 1.

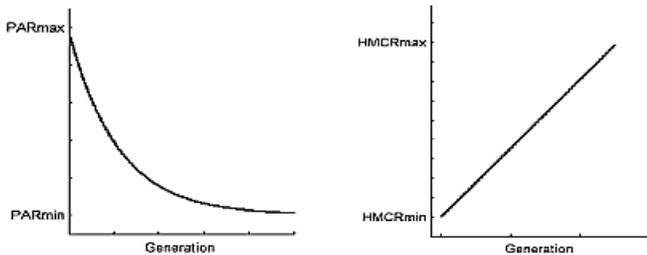


Figura 1. Evolução dos parâmetros proposta por Kumar, *et al.*, 2014.

Como era esperado, verificou-se que o melhor resultado era alcançado muito próximo da última iteração. Deste modo mostrou-se oportuno testar a hipótese de considerar um maior número de iterações ou um patamar, uma vez que Nogueira, 2015, obteve melhores resultados com essa opção.

Mantêm-se então os valores mínimos e máximos de PAR e HMCR até se verificar um determinado número de iterações. Alcançando-se este valor de iterações, e até ao final do patamar proposto, adota-se somente o valor de HMCR máximo e de PAR mínimo. Considerou-se ainda um patamar, sem alteração da melhor solução, um total de 5% do número máximo de improvisações.

O número de iterações, a aplicação do parâmetro adaptativo e os intervalos entre os quais os valores podem variar foram objeto de estudo, concluindo-se que o número máximo de iterações mais vantajoso é 2 milhões, pois para um custo final aproximadamente igual tem uma duração muito menor. Para os casos do PAR os valores que devolviam resultados satisfatórios encontravam-se no intervalo [0,01, 0,8], já no caso do HMCR observou-se que os melhores resultados eram obtidos para um valor constante, 0,9. Assim, a metodologia de pesquisa harmónica implementada neste trabalho utiliza parâmetros adaptativos até um limite de iterações (20% do número máximo de iterações adotado), nos quais é aplicado o método proposto por Kumar, *et al.*, 2014, Figura 2.

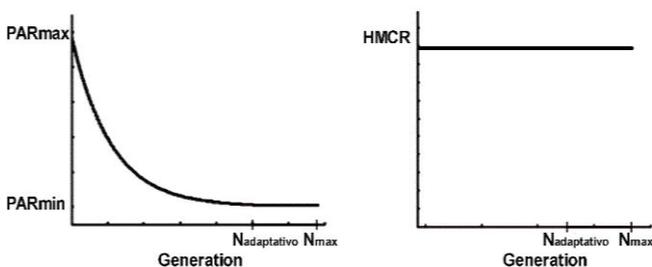


Figura 2. Representação gráfica dos parâmetros utilizados no presente trabalho, Kumar, *et al.*, 2014.

Com o objetivo de encontrar um equilíbrio entre o tempo de análise e a qualidade dos resultados, foram definidos dois critérios de paragem: o primeiro é um número máximo de improvisações obtido em função do número de variáveis; o segundo é um critério de estabilidade que interrompe o processo caso decorram 5% do número máximo de improvisações sem alteração da melhor solução.

Encontrar um equilíbrio entre o número máximo de improvisações e a dimensão da memória harmónica (HMS) foi um processo bastante complexo, pois o algoritmo é altamente sensível a estes dois parâmetros. Naturalmente, quanto maior for o número de iterações, mais barata será a solução encontrada, porém, maior será o tempo despendido no processo.

4. Caso de Estudo

- Análise e Discussão de Resultados

4.1. Considerações iniciais

Os dados necessários para testar a metodologia desenvolvida foram fornecidos pela empresa Águas do Norte, S.A. Esses dados de operação da estação elevatória EE1 compreendiam marca dos grupos elevatórios, o seu número de rotações por minuto, a sua potência e o seu rendimento, relativos ao ano de 2015.

Conforme já referido, o funcionamento dos grupos eletrobomba está condicionado pelo nível da água no reservatório a jusante da estação elevatória, RR2. Foi, por isso, implementada uma restrição de volumes máximo e mínimo nesse reservatório. Além desta restrição, foram ainda implementadas outras restrições devidas à capacidade de elevação dos grupos e ao número de arranques máximo, que usualmente atinge os 15 arranques por hora, valor este que não se encontra regulamentado, podendo apenas ler-se no Decreto regulamentar n.º 23/95, no seu artigo n.º 174, que, "Na definição e caracterização dos grupos eletrobomba deve ter-se em consideração os seguintes aspetos: a) Número máximo de arranques por hora admissível para o equipamento a instalar;".

A aplicação da metodologia de otimização desenvolvida obrigou à definição de algumas variáveis e à assunção de algumas premissas e simplificações que a seguir se apresentam.

Foi considerado que a cota da superfície livre do reservatório de montante, RR1, é constante e igual a 19 m, correspondente ao nível máximo de água possível neste reservatório. Esta opção foi tomada pela necessidade de estabilizar o nível de água num dos reservatórios, no pressuposto de que o volume de água tratada disponível diariamente não é ultrapassado. Não sabendo com fiabilidade a cota a que se encontra o eixo de cada grupo elevatório, foi adotada a cota da soleira do reservatório RR1 no cálculo da altura geométrica.

Quanto ao nível de água no reservatório de jusante RR2 estes mantiveram-se livres de outras restrições, além das já referidas alturas de água máxima e mínima, respetivamente, 4,7 e 0,5 m. A cota de entrada de água neste reservatório foi fixada em 148,7 m, ou seja, 0,3 m acima do nível máximo de água permitido.

As premissas anteriores permitiram definir a curva característica da instalação, as curvas características das bombas e as respetivas curvas de rendimento. Na definição das constantes, viscosidade cinemática da água (ν) e rugosidade equivalente da conduta (k), foram feitas análises de sensibilidade.

No caso da viscosidade cinemática, foram testados os valores da viscosidade cinemática da água a 20°C e a 4°C, respetivamente, $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, tendo sido verificado que este parâmetro tinha um impacto limitado na curva característica da instalação. Assim, nos cálculos efetuados, foi adotada a viscosidade cinemática da água a 20°C, ou seja, $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Relativamente ao impacto da rugosidade equivalente da conduta (k), foram testados três valores de rugosidade, 2, 1 e 0,5 mm. Como seria de esperar, para o mesmo caudal elevado, a altura manométrica aumenta com o aumento da rugosidade equivalente.

No presente estudo, foi adotado o valor de 1 mm para a rugosidade equivalente da conduta (k) por se considerar que será um valor próximo da rugosidade equivalente atual da conduta e por ser o valor intermédio dos valores testados. De acordo com a configuração atual, podem funcionar no máximo dois grupos eletrobomba em simultâneo, constituindo o terceiro uma reserva ativa. É ainda importante referir que, neste estudo, todas as otimizações se iniciam às zero horas e que não se consideraram tarifários energéticos de fim-de-semana.

4.2. Cenário em estudo

Tendo em vista a avaliação da ferramenta de otimização desenvolvida e os objetivos propostos para este trabalho, foi escolhida a semana de 23 a 30 de setembro de 2015.

A escolha prende-se com a possibilidade de poder comparar os resultados obtidos no presente estudo com os obtidos num estudo anterior, (Andrês, 2016), no qual foi utilizado o *add-in* para o Microsoft Excel Evolver, ferramenta que tem por base o algoritmo Genético.

4.2.1. Análise da semana de setembro

Os dados reais do caso de estudo correspondem às condições de operação da estação elevatória EE1, nos oito dias finais do mês de setembro do ano de 2015. Esses dados, disponibilizados pela empresa Águas do Norte, S.A., estão sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1. Valores do cenário real.

Volume Total Elevado (m³)	643907
Custo Energético (€)	19290
Custo específico (€/m³)	0,0300

No estudo de Andrês, 2016, foi utilizado o *add-in* para o Microsoft Excel Evolver, ferramenta que tem por base o algoritmo genético. Além da ferramenta de otimização utilizada, esse estudo distingue-se do presente em algumas das premissas assumidas. Assume-se que o nível do reservatório de jusante RR2 é constante e igual ao nível máximo.

Assume-se ainda que o reservatório tem sempre capacidade de vazão e as restrições ao funcionamento das bombas são aplicadas em função do caudal de entrada no reservatório de montante RR1e dos níveis máximo e mínimo deste.

Outras diferenças estão nos grupos elevatórios, designadamente na velocidade de rotação de 1480 RPM e no intervalo de tempo considerado que foi de 15 minutos. Não obstante estas diferenças, são apresentados no Quadro 2 os melhores resultados obtidos por Andrês, 2016.

Quadro 2. Valores da otimização utilizando o Evolver.

Volume Total Elevado (m³)	653271
Custo Energético (€)	18716
Custo específico (€/m³)	0,0286

No Quadro 3 são apresentados os resultados de otimização obtidos com a metodologia desenvolvida neste estudo. Importa referir que, para facilitar esta comparação, foram assumidas as características dos grupos eletrobomba utilizadas no estudo de Andrês, 2016. Conforme se pode observar, a pesquisa harmónica resulta, uma vez mais, num volume total elevado e um custo menores.

Quadro 3. Valores das otimizações feitas utilizando as metodologias desenvolvidas

	Algoritmo genético	Pesquisa harmónica
Volume Total Elevado (m³)	653449	652440
Custo Energético (€)	14067	13830
Custo Específico (€/m³)	0,0215	0,0212

4.2.2. Discussão

Os resultados de otimização apresentados, tanto os obtidos anteriormente por Andrês, 2016, como os obtidos neste estudo, correspondem a um custo específico por m³ de água elevado menor do que o custo específico real.

No cenário real a política de operação privilegia o funcionamento mínimo dos grupos elevatórios nos períodos de tarifa energética mais cara (critério económico) em detrimento do critério de regularidade, ou seja, o número de arranques e paragens. Essa política resulta numa diminuição dos custos energéticos, no entanto, de acordo com análise efetuada, é passível de ser mais otimizada.

Na otimização desenvolvida por Andrês, 2016, o critério económico e o critério de regularidade são ambos privilegiados. Nesta otimização o custo específico por m³ de água elevado é eduzido em relação ao caso real e, além disso, o número de arranques é menor.

No entanto, porque neste estudo não são consideradas as variações do consumo das populações de jusante, poderá haver um distanciamento entre a operação assim otimizada e a realidade.

Da aplicação das metodologias desenvolvidas à semana de 23 a 30 de setembro de 2015, resultou um custo específico menor do que o verificado na realidade e menor do que o obtido no estudo de Andrès, 2016.

Como se pode observar na Figura 3, a otimização permitiu o maior aproveitando das horas onde a tarifa energética é mais barata, no entanto, o número de arranques dos grupos eletrobomba é pouco inferior à situação real.

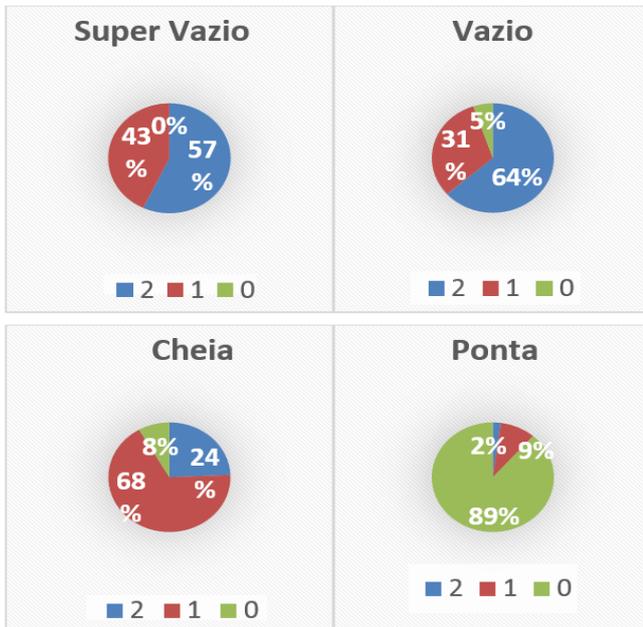


Figura 3. Percentagem de bombas ativas para cada período horário, análise semanal

Importa ainda referir que esta otimização resulta numa poupança de cerca de 5 mil euros; no entanto, foram desprezadas as variações de nível no reservatório de montante que, a serem consideradas, influenciariam esta análise e resultariam certamente num custo total e num custo específico por m³ de água elevada, mais elevado.

5. Considerações Finais

5.1. Desenvolvimentos futuros

Considera-se que este trabalho atingiu todos os objetivos propostos. No entanto, considera-se também que outras funcionalidades interessantes poderiam vir a ser implementadas, mas que, face ao tempo limitado para o desenvolvimento deste trabalho, estão fora do presente estudo, mas são propostas para desenvolvimentos futuros. A implementação da variação dos caudais a montante da estação elevatória, em complemento com a variação a jusante, permitirá obter políticas operacionais mais aproximadas à realidade e é, por isso, um desenvolvimento futuro óbvio. Outras opções simples e interessantes passam por incorporar a possibilidade de testar várias capacidades de reservatórios e outros cenários como, por exemplo, a indisponibilidade de captação de água durante 24 horas, ou ainda, a colocação de uma célula em manutenção. Naturalmente, algumas implementações mais complexas tais como a introdução do parâmetro de qualidade de água e o modo com este afeta a política operacional da estação elevatória ao longo do dia, seriam também interessantes.

Referências

- Andrès, D. (2016). *Otimização Energética de um Sistema de Abastecimento de Água. Análise de um Caso Prático da Águas do Norte*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Coello, C. A. (2012). *Constraint-Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms*. Proceedings of the 14th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation. pp. 849–872.
- Darwin, C., Wallace, J. e Griffith, T. (1998). *The Origin of Species*. New edition. Hertfordshire: Wordsworth Editions.
- Driscoll, T. A. (2009). *Learning MATLAB*. SIAM.
- Geem, Z. W., Kim, J. H. e Loganathan, G. V. (2001). *A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search Simulation*, vol. 76, n. 2, pp. 60–68.
- Kumar, V., Chhabra, J. K. e Kumar, D. (2014). *Parameter Adaptive Harmony Search Algorithm for Unimodal and Multimodal Optimization Problems*. Journal of Computational Science, vol. 5, n. 2, pp. 144–155.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M. e Damangir, E. (2007). *An Improved Harmony Search Algorithm for Solving Optimization Problems*, Applied Mathematics and Computation, vol. 188, n. 2, pp. 1567–1579.
- Nogueira, J. (2015). *Automatização do Dimensionamento Gravítico e Sísmico de Estruturas Metálicas*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.