

DIAGNÓSTICO DO FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO

CASO DE ESTUDO: SUB-SISTEMA DA FONTE SANTA

Catarina Sousa¹; Dídía Covas²; Helena Ramos³; André Pina⁴; Julieta Marques⁵

¹Engenheira, ECOSERVIÇOS, Lda., csousa@ecoservicos.pt

²Professora Auxiliar, Instituto Superior Técnico, didia.covas@civil.ist.utl.pt

³Professora com Agregação, Instituto Superior Técnico, helena.ramos@civil.ist.utl.pt

⁴Engenheiro, SMAS de Oeiras e Amadora, ampina@smas-oeiras-amadora.pt

⁵Chefe de Departamento, SMAS de Oeiras e Amadora, mjmarques@smas-oeiras-amadora.pt

Palavras-Chave: avaliação de desempenho; modelação hidráulica; optimização.

Resumo

O presente trabalho tem por objectivo o diagnóstico do funcionamento de um sistema de distribuição de água e a análise cenários alternativos de funcionamento que melhorem o seu desempenho técnico. Para este efeito, desenvolveu-se um modelo computacional integrado para a avaliação de desempenho e a optimização operacional de sistemas de abastecimento de água. O modelo foi aplicado a um sistema de distribuição real – o sub-sistema da Fonte Santa - integrado no Sistema de Abastecimento de Água da Amadora. A aplicação do modelo permitiu analisar três cenários de funcionamento distintos: o cenário actual de funcionamento e dois cenários alternativos. O cenário alternativo 1 consiste na definição de um esquema de bombagem óptimo para a central sobreprensa de Moinhos da Funcheira por forma a minimizar os custos de energia. O cenário alternativo 2 corresponde também à solução de custo mínimo de bombagem, mas com a implementação de medidas complementares para o controlo e a gestão de pressões. Os resultados obtidos permitiram concluir que o cenário alternativo 2 permite não só melhorar o desempenho do sistema em termos de perdas de água e de pressões (*i.e.*, garantia de satisfação das necessidades dos consumidores) relativamente à situação actual de funcionamento, como também reduzir os encargos de exploração; o investimento inicial inerente a este cenário (*i.e.*, instalação de uma sobreprensa e de três válvulas redutoras de pressão) é recuperado em 4 anos.

1. Introdução

A definição de estratégias de gestão e operação de sistemas de abastecimento de água é uma tarefa complexa pelos múltiplos aspectos a gerir e a equacionar. O objectivo principal é garantir a fiabilidade do abastecimento de água com o mínimo de custos operacionais. A concretização deste objectivo depende fundamentalmente da dimensão e complexidade do sistema, da experiência da equipa de operação, da existência de estruturas de controlo e comando e da disponibilidade de modelos matemáticos para análise dos sistemas.

Neste trabalho apresenta-se um modelo computacional integrado desenvolvido para a avaliação de desempenho técnico e a optimização operacional dos sistemas, constituído por três módulos: (i) um módulo de *simulação hidráulica* que descreve o comportamento hidráulico do sistema (EPANET); (ii) um módulo de *avaliação do desempenho técnico* do sistema nas vertentes técnico-hidráulica, fiabilidade, perdas e custos de energia; e (iii) um módulo de *optimização* baseado em Algoritmos Genéticos que, nas vertentes de optimização simples e multi-objectivo, permite minimizar o custo de energia, ajustando-o às tarifas em vigor e, maximizar a fiabilidade hidráulica em termos de volume de reserva disponível.

A avaliação de desempenho relativa às variáveis hidráulicas (pressão e velocidade de escoamento) tem por base as curvas de desempenho propostas por Alegre (1992), Coelho (1997) e Coelho e Alegre (1999), também aplicadas por Dias (2004), Araújo (2005), Duarte *et al.* (2005) e Jacob (2006) na avaliação de desempenho de sistemas de distribuição reais. Para as restantes variáveis aplicaram-se as curvas de desempenho propostas por Sousa (2007).

Neste trabalho apresentam-se os principais resultados obtidos da aplicação do modelo desenvolvido a um sistema de distribuição de água real – o *sub-sistema da Fonte Santa* – integrado no Sistema de Abastecimento de Água da Amadora.

2. Descrição do Caso de Estudo

O sub-sistema da Fonte Santa abrange uma área de aproximadamente 1.6 km² e caracteriza-se por uma ocupação tipicamente residencial, sendo a população, actualmente servida, estimada em cerca de 4 000 habitantes. Este sistema é constituído pela central sobreprensa de Moinhos da Funcheira (ponto de entrega da EPAL, S.A.), implantada à cota 198.00, por um reservatório intermédio (o reservatório da Fonte Santa), implantado na zona de cota topográfica mais elevada (270.00), e por uma rede de distribuição com cerca de 45 km de condutas, em que cerca de 80% são de policloreto de vinilo (PVC) e 20% de polietileno de alta densidade (PEAD). Apresenta-se na Figura 1 a topografia do sub-sistema da Fonte Santa e respectivas isolinhas de pressão na hora de maior consumo para o cenário actual de funcionamento.

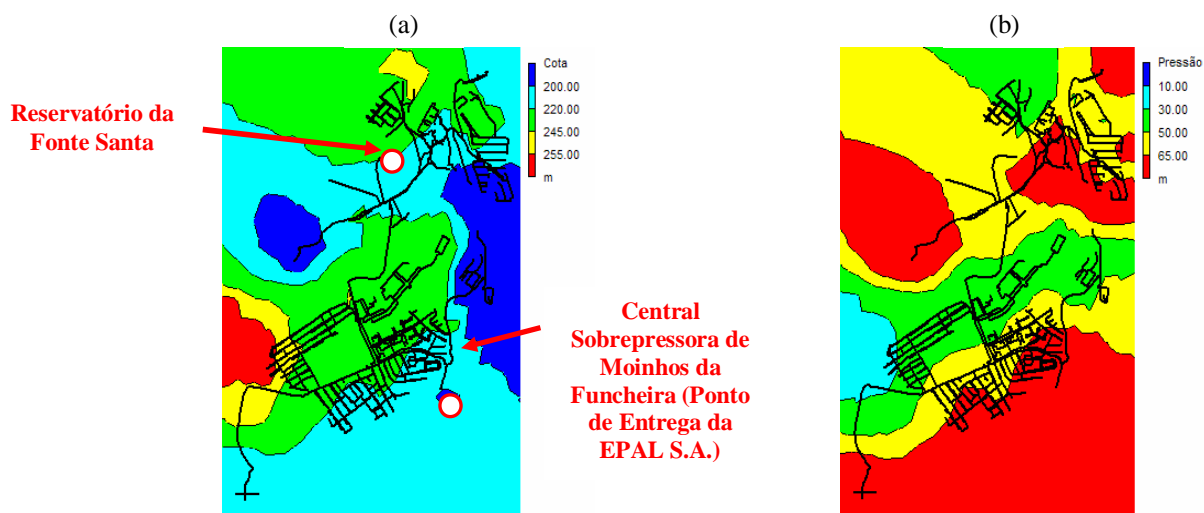


Figura 1. Sub-sistema da Fonte Santa: (a) topografia e (b) isolinhas de pressão na hora de maior consumo

No cenário actual de funcionamento, a satisfação de consumos na rede de distribuição no período diurno (das 8h30m às 20h) tem origem na central sobreprensa de Moinhos da Funcheira e no período nocturno (das 20h às 8h30m) no reservatório da Fonte Santa. A necessidade de manter em funcionamento a central sobreprensa no período diurno, com elevados custos energéticos associados, deve-se à necessidade de garantir a pressão mínima de 30 m c.a. na zona localizada a uma cota topográfica mais elevada (assinalada a vermelho na Figura 1a e a azul na Figura 1b).

O modelo do sistema em estudo foi disponibilizado pelos Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento de Oeiras e Amadora (SMASOA) em formato “INP”, para importação directa em EPANET. Este modelo foi gerado automaticamente a partir de um sistema de informação geográfica (SIG) através de uma aplicação desenvolvida especificamente para o efeito. A referida aplicação permite não só a definição física do sistema em termos de condutas e nós, como também a distribuição de consumos nos nós em termos percentuais.

3. Cenário Actual de Funcionamento

3.1 Descrição Geral

O diagnóstico do funcionamento do sistema é efectuado com base na aplicação do módulo de avaliação do desempenho técnico-hidráulico ao sistema em estudo para o cenário actual (*status quo*) de funcionamento ao longo de um período de 24 horas para posterior comparação com cenários alternativos de funcionamento, correspondentes à minimização dos custos de bombagem (cenário alternativo 1) e à implementação de medidas complementares associadas ao controlo e gestão de pressões no sistema (cenário alternativo 2).

Os resultados obtidos apresentam-se na forma de diagramas de simulação dinâmica, com as curvas de desempenho e respectivas bandas de percentil (de 25 em 25%). Para a representação espacial das variáveis e dos seus desempenhos, utilizaram-se as ferramentas de representação gráfica disponíveis no EPANET.

3.2 Avaliação do Desempenho Técnico-hidráulico

3.2.1 Pressão

Na Figura 2 apresenta-se a curva de desempenho médio obtida para a pressão, ponderada com o consumo nos nós, ao longo das 24 horas. Esta curva desenvolve-se em torno do nível de desempenho médio de 65% (serviço aceitável). No período de funcionamento da central sobressora (*i.e.*, das 8h30m às 20h), apresenta um patamar inferior correspondente ao valor de desempenho de 60%, uma vez que o patamar de pressão criado é superior ao estabelecido pelo reservatório da Fonte Santa (no período nocturno). Na análise das bandas de percentis verifica-se que mais de 50% do caudal é distribuído com um nível de desempenho inferior a 75%.

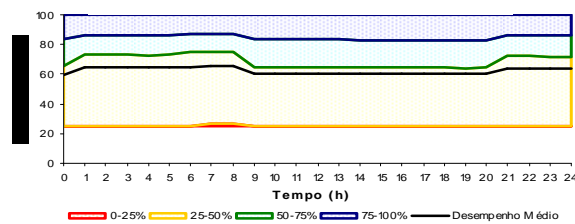


Figura 2. Diagrama de simulação dinâmica para a pressão

No entanto, a análise isolada da Figura 2 não permite identificar se os baixos desempenhos se devem a pressões reduzidas ou elevadas. Nesse sentido, apresentam-se na Figura 3 (a) e (b) os diagramas de simulação dinâmica que permitem a análise independente dos desempenhos relativos às pressões mínimas e máximas.

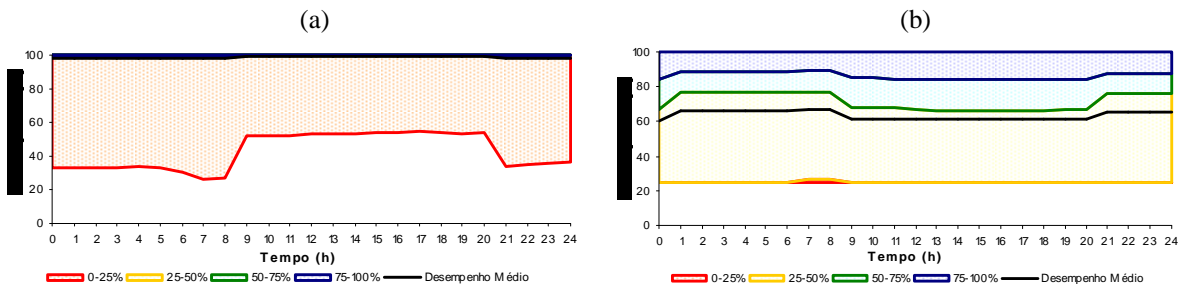


Figura 3. Diagramas de simulação dinâmica para a (a) pressão mínima e para (b) pressão máxima

Em termos de pressão mínima, a análise da Figura 3 (a) permite verificar que a largura da banda de percentil mais baixo contra a inexistência das outras bandas, indica que os problemas relativos à pressão mínima ocorrem muito localmente. Por outro lado, em termos de pressão máxima, o diagrama apresentado na Figura 3 (b) é muito semelhante ao da Figura 2, que penaliza toda a gama

de pressões, evidenciando que o desempenho relativo à pressão mínima não é penalizante para o sistema. Ao nível da flutuação de pressão, o sistema apresenta um desempenho global médio de 92%, ao qual correspondem flutuações de pressão inferiores a 10 m c.a..

3.2.2 Velocidade de Escoamento

Na Figura 4 apresenta-se o diagrama de simulação dinâmica para a velocidade de escoamento no sistema. Esta figura mostra que a curva de desempenho médio se desenvolve acima do nível de serviço inaceitável (25%), apresentando ao longo do período de simulação valores inferiores ao limite da aceitabilidade (50%). O desempenho médio global obtido é de 36%. Ao contrário do desempenho relativo à pressão, o patamar do nível de desempenho máximo evidencia-se no período de funcionamento da central sobreprensa. Na análise das bandas de percentis verifica-se que mais de 50% do sistema apresenta valores de desempenho inferiores ao nível de desempenho médio do sistema. O facto da largura das bandas de percentil mais baixas (0-25% e 25-50%) ser praticamente inexistente, revela que o problema não é pontual, abrangendo grande parte da rede.

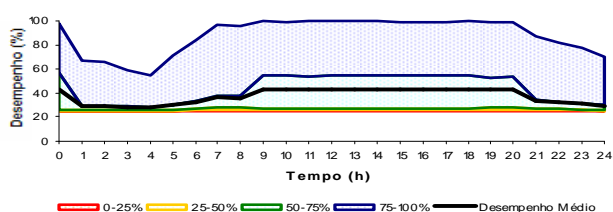


Figura 4. Diagrama de simulação dinâmica para a velocidade de escoamento

A análise da Figura 4 permite ainda verificar que o nível de desempenho mínimo corresponde ao limite da inaceitabilidade (25%). Contudo, não é possível identificar a gama de velocidades que determina os baixos desempenhos. Nesse sentido, apresentam-se na Figura 5 (a) e (b) os diagramas de simulação dinâmica que permitem a análise independente dos desempenhos relativos às velocidades mínimas e máximas.

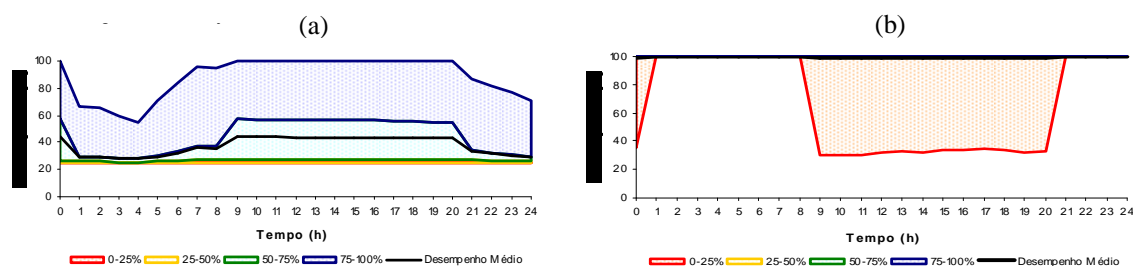


Figura 5. Diagrama de simulação dinâmica para (a) velocidade mínima e (b) velocidade máxima

A análise da Figura 5 permite constatar que o baixo desempenho se deve principalmente às velocidades baixas, existindo apenas problemas pontuais de velocidades elevadas.

3.2.3 Custos de Energia

A avaliação do desempenho relativo aos custos de energia tem com principal objectivo determinar até que ponto é que o modo de operação actual da central sobreprensa de Moinhos da Funcheira tira partido da variação do tarifário de energia eléctrica ao longo do dia. Neste contexto, e de acordo com a curva de desempenho proposta por Sousa (2007), o desempenho é máximo (100%) quando o período total de bombagem se concentra nos períodos de tarifa mais baixa e mínimo (0%) quando se concentra nos períodos de tarifa mais elevada.

De acordo com o modo de operação actual do sistema, a central sobreprensa encontra-se em funcionamento no período diurno (das 8h às 20h30m), o que significa que das 12h30m de funcionamento diário, 6 h correspondem ao período de ponta e 6h30m ao período de cheia, o que

conduz a que o desempenho do sistema relativo aos custos de energia de apenas 50%, uma vez que o funcionamento actual do sistema está imposto nos períodos de ponta e de cheia, de tarifa mais elevada, não havendo qualquer aproveitamento do período de vazio, de tarifa reduzida.

4. Cenário Alternativo 1

Com o objectivo de reduzir os custos de bombagem na central sobreprensa de Moinhos da Funcheira, foi avaliado o desempenho do cenário alternativo 1 que resultou da aplicação do módulo de optimização desenvolvido à central sobreprensa de Moinhos da Funcheira o que permitiu obter um esquema de bombagem óptimo de custo mínimo.

A solução óptima, de menor custo, obtida para o esquema de operação da central sobreprensa de Moinhos da Funcheira corresponde a um período diário de bombagem contínuo de 9h, que aproveita tanto quanto possível o período de tarifa mais baixa, correspondendo 7h ao período de vazio (das 0h às 7h) e 2h ao período de cheia (das 7h às 9h). Com a implementação deste esquema de operação, o desempenho do sistema no que se refere aos custos de energia eléctrica é óptimo (100%), uma vez que o funcionamento da central sobreprensa se encontra concentrado, tanto quanto possível, no período de vazio em que a tarifa de energia eléctrica é mínima. Na Figura 6 apresenta-se a variação do nível de água no reservatório da Fonte Santa correspondente e o tarifário de energia eléctrica e no Quadro 1 os resultados obtidos em termos de custo diário de energia e desempenho para os cenários de funcionamento actual e optimizado.

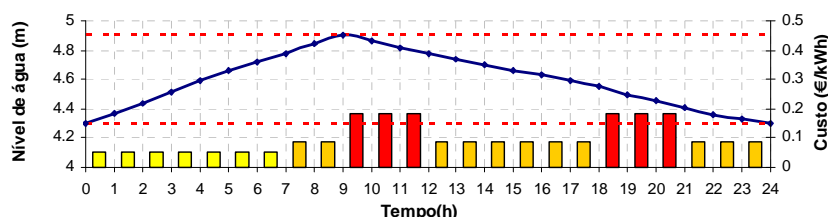


Figura 6. Variação do nível de água no Reservatório da Fonte Santa correspondente ao esquema de bombagem óptimo

Quadro 1. Sub-sistema da Fonte Santa: custo diário de energia eléctrica

Cenário de operação	Custo diário de energia eléctrica (€)	Desempenho (%)
Operação actual	44.80	50
Operação optimizada	13.90	100

A análise do Quadro 1 permite verificar que a optimização do esquema de operação da central sobreprensa de Moinhos da Funcheira permite reduzir os custos de energia eléctrica para cerca de um terço do valor gasto actualmente. Lembra-se que o esquema de funcionamento óptimo foi determinado exclusivamente em função do objectivo de minimizar os custos de energia do sistema e da necessidade de garantir no final das 24 horas, um nível de água inicial não inferior ao nível de água inicial, não sendo contemplados outro tipo de restrições (*e.g.*, verificação do limite de pressão mínima de consumo em todos os nós de consumo). Neste contexto, os problemas de pressões mínimas acentuam-se em algumas zonas da rede, o que inviabiliza a sua implementação sem medidas complementares, apresentadas no âmbito do cenário alternativo 2.

5. Cenário Alternativo 2

5.1 Medidas Complementares ao Cenário Alternativo 1

Com a implementação do esquema de operação óptimo na central sobreprensa de Moinhos da Funcheira (cenário alternativo 1), o modo de funcionamento do sub-sistema da Fonte Santa é

substancialmente alterado. A concentração do período de bombagem de água no período nocturno, de menor consumo, passa a ter como principal função a adução ao reservatório de Fonte Santa, que no período diurno deverá garantir a satisfação dos consumos na rede de distribuição. No entanto, o patamar de pressão estabelecido a partir do reservatório não é suficiente para garantir o limite de pressão mínima na zona de cota mais elevada. Paralelamente, no problema de optimização do funcionamento da central sobrepessora não foram incorporadas quaisquer restrições relativas aos limites mínimos e máximos de pressão no sistema. Nesse sentido, foram estudadas e analisadas medidas complementares que permitam garantir a satisfação dos consumos em todos os pontos da rede e pressões inferiores ao limite de pressão máxima (65 m c.a). As medidas propostas consistem na instalação de uma nova central sobrepessora que garanta a pressão mínima para abastecimento na zona de cota mais alta e de três válvulas redutoras de pressão (VRP) de carga fixa a jusante. Na Figura 7 apresenta-se a localização espacial dos componentes propostos para a melhoria do funcionamento do sistema (representados a azul).



Figura 7. Representação esquemática das medidas complementares propostas

5.2 Avaliação do Desempenho Técnico

5.2.1 Pressão

A avaliação do desempenho técnico do Cenário Alternativo 2 permitiu concluir que o sub-sistema apresenta um desempenho global de pressões de aproximadamente 70%, ligeiramente superior ao obtido na avaliação da situação de referência (65%). Os problemas existentes em termos de pressão mínima deixam de ter significado, uma vez que a instalação da nova central sobrepessora permite garantir o limite de pressão mínima na zona de cota mais alta e os problemas de pressão máxima deixam de ter expressão nas zonas em que foram colocadas VRP, permanecendo nas zonas em que a sua colocação se mostrou inviável. Paralelamente, a introdução de VRP reduz o nível de perdas de água no sistema (Araújo, 2005).

Em termos de flutuação de pressão, o valor de desempenho médio global obtido foi de 82%, ligeiramente inferior ao obtido na situação de referência (92%).

5.2.2 Velocidade de escoamento

Em termos de velocidade de escoamento são muito semelhantes aos verificados na avaliação da situação de referência, sendo o valor de desempenho médio global estimado em cerca de 34%, apenas 2% inferior ao do primeiro cenário.

Neste cenário, as maiores velocidades registam-se no período diurno, nos trechos da conduta adutora/distribuidora através da qual o caudal de adução ao Reservatório da Fonte Santa é transportado.

5.3 Análise Custo-Benefício

Depois de avaliado o desempenho técnico do cenário alternativo de funcionamento proposto torna-se imperativo analisar a sua viabilidade económica. O objectivo principal desta análise consiste em avaliar os benefícios económicos provenientes da implementação deste cenário alternativo de modo a concluir se se trata de um cenário técnica e economicamente mais vantajoso, quando comparado com a situação de referência.

A análise económica realizada, do tipo convencional, consiste na determinação dos custos directos associados, onde se inclui o investimento inicial e os custos actualizados de exploração, manutenção e demolição dos componentes que o diferenciam do cenário actual de funcionamento (e.g., válvulas redutoras de pressão). Nesta análise recorre-se ao conceito de Valor Actualizado Líquido (VAL), que permite obter uma estimativa actualizada para o ano 0, dos custos ao longo da vida útil do sistema. Esta análise é efectuada a preços constantes, admitindo-se preços constantes ao longo do tempo. Neste contexto, todos os custos são actualizados ao ano 0 de acordo com a seguinte expressão (Sousa, 2001):

$$C_0 = C_n \times \frac{1}{(1+t_a)^n} \quad (1)$$

sendo:

- C_0 : custo actualizado ao ano 0 (€);
- C_n : custo no ano n (€);
- t_a : taxa de actualização dos custos (-);
- n : ano em que se efectua o investimento/despesa.

Os custos associados ao novo equipamento proposto, nomeadamente os referentes ao fornecimento e instalação da nova central sobreprensa e das três válvulas redutoras de pressão, foram obtidos junto dos respectivos fabricantes. Estima-se que o investimento inicial associado à instalação da central sobreprensa prevista, incluindo custos de construção civil e equipamento electromecânico, seja da ordem dos 25 000 € e que a instalação das três válvulas redutoras de pressão seja de cerca de 20 000 €. No que se refere aos encargos anuais de manutenção e exploração destes equipamentos electromecânicos, admitiu-se 2.5 % do respectivo custo inicial. Para estimar os custos totais de manutenção e exploração ao longo da vida útil do sistema aplicou-se a seguinte expressão (Sousa, 2001):

$$C_{\text{exp}} = \frac{C_1}{(1+t_a)} \times \frac{(r^n - 1)}{(r - 1)} \quad (2)$$

sendo:

- C_{exp} : custo total de manutenção e exploração (€);
- C_1 : custo total de exploração no ano 1;
- t_a : taxa de actualização dos custos (3.0%);
- r : razão geométrica definida por $r = \frac{(1+t_g)}{(1+t_a)}$;
- t_g : taxa geométrica de evolução de consumos (0.5%).

Por forma a determinar a rentabilidade da implementação deste cenário alternativo, apresenta-se no Quadro 2 o balanço entre os custos e os benefícios ao longo de um período de 10 anos. Os benefícios foram calculados com base na redução de custos de energia resultante da implementação do esquema de operação otimizada na central sobreprensa de Moinhos da Funcheira.

A análise do Quadro 2 permite verificar que ao fim de 4 anos os benefícios (60 737.04 €) são superiores aos custos totais (52 316.40 €), e que a partir desse instante os proveitos económicos serão crescentes, concluindo-se que a implementação deste cenário de funcionamento, para além de melhorar o desempenho em termos de pressão e custos de energia se traduz em significativos benefícios económicos. Ao fim de 10 anos, o benefício excede em cerca de 2.5 vezes os custos.

Quadro 2: Análise Custo-Benefício

Ano	Investimento Inicial	Custos de exploração ao fim de <i>n</i> anos	Custo Total Actualizado	Benefício Total Actualizado	Custo Total Actualizado Acumulado	Benefício Total Actualizado Acumulado
0	45 000.00 €	0.00 €	45 000.00 €	0.00 €	45 000.00 €	0.00 €
1	-	1 125.00 €	1 121.64 €	15 366.50 €	46 121.64 €	51366.50 €
2	-	3 863.83 €	3 840.75 €	15 274.71 €	48 840.75 €	03641.21 €
3	-	5 672.85 €	5 622.10 €	15 138.06 €	50 622.10 €	54779.28 €
4	-	7 404.59 €	7 316.40 €	14 957.76 €	52 316.40 €	60 737.04 €
5	-	9 062.36 €	8 927.64 €	14 735.40 €	53 927.64 €	57472.44 €
6	-	10 649.30 €	10 459.61 €	14 792.92 €	55 459.61 €	89 945.36 €
7	-	11 915.96 €	11 915.96 €	14 172.61 €	56 915.96 €	104 117.97 €
8	-	13 300.14 €	13 300.14 €	13 837.01 €	58 300.14 €	117 954.98 €
9	-	14 615.47 €	14 615.47 €	13 468.96 €	59 615.47 €	131 423.93 €
10	-	15 865.09 €	15 865.09 €	13 071.47 €	60 865.09 €	144 495.41 €

6. Conclusões

A análise dos resultados obtidos da avaliação do desempenho técnico do sistema permitiu concluir que a implementação do cenário alternativo 2 conduz a níveis de desempenho semelhantes aos obtidos para o cenário actual de funcionamento. No período diurno, de maior consumo e com maior impacto junto dos utilizadores verifica-se uma melhoria significativa do desempenho em termos de pressão (máxima e mínima). Verifica-se, no entanto, uma ligeira redução nos desempenhos associados à flutuação de pressão e velocidade de escoamento.

Ao nível de custos de energia, o cenário alternativo 2 corresponde ao desempenho óptimo (100%). Os resultados obtidos na análise custo-benefício relativa a este cenário mostram que os benefícios económicos resultantes da optimização do esquema de operação da central sobreprensa de Moinhos da Funcheira cobrem o investimento a realizar num período inferior a 4 anos e que ao fim de 10 anos excedem em cerca de 2.5 vezes os custos.

7. Referências Bibliográficas

- Alegre, H. (1992) – “Instrumentos de Apoio à Gestão Técnica de Sistemas de Distribuição de Água”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Alegre, H., Coelho, S. T., Almeida, M. C., e Vieira, P. (2005) – “Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição”, Série Guias Técnicos 3, LNEC, Lisboa.
- Araújo, L. (2005) – “Controlo de Perdas na Gestão Sustentável dos Sistemas de Abastecimento de Água”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Coelho, S. T. (1997) – “Performance in Water Distribution - A System Approach”, Research Studies Press, Ltd., England.
- Coelho, S. T. E Alegre H. (1999) – Indicadores de Desempenho em Sistemas de Saneamento Básico, LNEC, Lisboa.
- Dias, N. (2004) – “Diagnóstico de sistemas de abastecimento de água para diferentes condições de operacionalidade e segurança”, Trabalho Final de Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Duarte, P., Farmani, R., Alegre, H., Savic, D., Walters, G., e Monteiro, A. J. (2005) – “Water distributions Systems Optimisation and Technical Performance Assessment - Using technical performance assessment for comparing solutions”, 8th International Conference on Computing and Control for Water Industry - CCWI, Universidade de Exeter, U.K.
- Jacob, A. (2006) – “Avaliação de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água: o caso de estudo da ZMC 320 da EPAL”, Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Sousa, C. (2007). Optimização Multicritério da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água Utilizando Algoritmos Genéticos. Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Sousa, E. R.(2001) – “Saneamento Ambiental I - Licenciatura em Engenharia Civil”, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.