

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE GRUPOS ELETROBOMBA ATRAVÉS DA REALIZAÇÃO DE TESTES DE EFICIÊNCIA

Pedro LEITE⁽¹⁾, Eduardo VIVAS⁽²⁾, Luís VALENTE⁽³⁾, Fernando FERREIRA⁽⁴⁾, José RÊGO COSTA⁽⁵⁾, Miguel TEIXEIRA⁽⁶⁾

RESUMO:

Os grupos eletrobomba são uma componente central dos sistemas de abastecimento de água e drenagem de águas residuais, em termos operacionais e ao nível do consumo de energia. Contudo, estes equipamentos são escolhidos pela informação dos fabricantes (condições ideais), que poderá não corresponder ao funcionamento real do sistema. Por outro lado, a deterioração do desempenho, ao longo do tempo, constitui uma fonte adicional de ineficiência, aumentando o consumo de energia.

Estes fatores justificam a definição de uma manutenção preventiva, baseada na avaliação periódica de desempenho dos equipamentos, que atenda, de forma conjugada, à avaliação do ponto de funcionamento (caudal bombeado e altura manométrica), e à aferição do rendimento do equipamento, integrando a otimização energética nos procedimentos de manutenção. Os testes de eficiência apresentam-se como uma solução para essa avaliação de desempenho.

Atualmente existem dois métodos principais para testar a eficiência e o funcionamento dos grupos eletrobomba: o método convencional e o método termodinâmico. Estes apresentam vantagens e desvantagens diferenciadas, dependendo das condições e características dos sistemas elevatórios. Neste contexto foram identificados os possíveis benefícios e constrangimentos da aplicação dos mesmos, tomando como exemplo um conjunto de estações elevatórias sob gestão da SIMDOURO S.A., no concelho de Vila Nova de Gaia.

Palavras-chave: desgaste dos impulsores, método convencional, método termodinâmico, otimização energética, planeamento de manutenção.

¹ NORAQUA, Rua Monte Cativo, 313, 4050-402 Porto, Telefone: +351 22 834 95 50, Fax: +351 22 834 95 59, email: pedro.leite@noraqua.pt

² Instituto Superior de Engenharia do Porto, Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Telefone: +351 22 83 40 500, Fax: +351 22 83 21 159, email: ebv@isep.ipp.pt

³ Engenheiro Civil, NORAQUA, Rua Monte Cativo, 313, 4050-402 Porto, Telefone: +351 22 834 95 50, Fax: +351 22 834 95 59, email: luisvalente@noraqua.pt

⁴ SIMDOURO, S.A., Rua Mártir S. Sebastião, 251, 1º A, 4400-499 Vila Nova de Gaia, Telefone: +351 221 209 300, Fax: +351 221 209 399, email: ferreira@aguasgaia.pt

⁵ SIMDOURO, S.A., Rua Mártir S. Sebastião, 251, 1º A, 4400-499 Vila Nova de Gaia, Telefone: +351 221 209 300, Fax: +351 221 209 399, email: rego.costa@simdouro.pt

⁶ SIMDOURO, S.A., Rua Mártir S. Sebastião, 251, 1º A, 4400-499 Vila Nova de Gaia, Telefone: +351 221 209 300, Fax: +351 221 209 399, email: miguel.teixeira@simdouro.pt

1. INTRODUÇÃO:

Os sistemas elevatórios de água e de águas residuais são consumidores intensivos de energia e representam cerca de 65% do consumo total de energia no setor da água em Portugal (ERSAR, 2012; 2013). Por outro lado, o encargo com energia corresponde, também, normalmente, a mais de 40% dos custos totais do ciclo de vida do próprio sistema elevatório podendo, nos sistemas de maior dimensão, atingir valores na ordem dos 80 a 90% do custo total (DOE *et al*, 2001).

Nesse sentido, as conclusões do Relatório Anual dos Serviços de Água e Resíduos em Portugal de 2012 (ERSAR, 2013) destacam a necessidade de realização de um esforço, por parte das entidades gestoras, para redução dos encargos com energia, especialmente, no que concerne aos indicadores de 2ª geração de eficiência energética em estações elevatórias (Figura 1), indicador AA15, para sistemas de abastecimento de água potável e indicador AR11, para sistemas de drenagem de águas residuais.

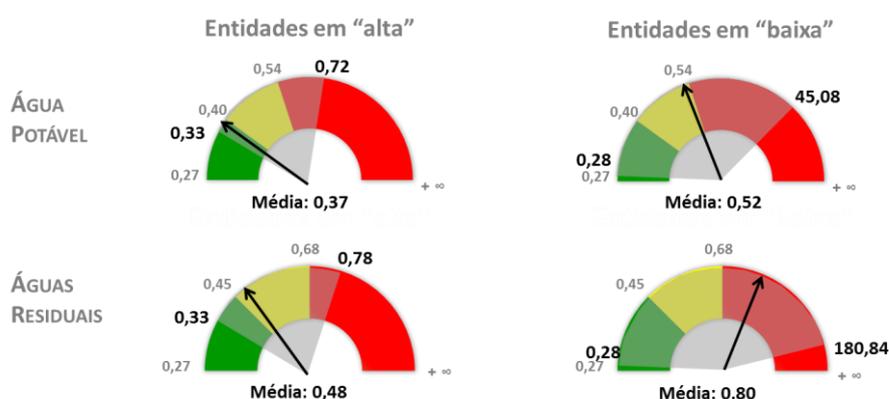


Figura 1: Representação dos valores dos indicadores AA15 (água potável) e AR11 (águas residuais) a nível nacional, para o ano de 2011, face aos valores de qualidade de serviço (boa, a verde; mediana, a amarelo; insatisfatória, a vermelho) (adaptado de ERSAR, 2013).

Os valores obtidos significam que o consumo de energia nestes sistemas está, de forma global, acima do desejável, sendo a situação mais problemática nos sistemas de águas residuais em baixa, com um consumo de energia médio próximo do dobro do valor máximo recomendado. Não obstante, a situação poderá ser ainda pior, já que parte significativa das entidades gestoras não respondeu sobre o nível de eficiência dos sistemas, demonstrando a necessidade de sistematização de informação, etapa inicial para uma cultura de eficiência.

Fundamentalmente, algumas das razões de ineficiência destes sistemas correspondem: (i) às diferenças entre o funcionamento real dos sistemas, aquando da instalação, e o previsto em projeto, tomando por base informação fornecida pelo fabricante (funcionamento em condições ideais), e (ii) à deterioração espectável do desempenho do equipamento, ao longo do tempo, contribuindo para o aumento dos consumos de energia associados.

Estes fatores justificam a necessidade de definição de uma manutenção preventiva dos grupos eletrobomba, que atenda, de forma conjugada, à avaliação do ponto de funcionamento do grupo eletrobomba (caudal bombeado e altura manométrica), mas também à eficiência energética e redução de custos, por aferição do rendimento do grupo.

Nesse sentido, os testes de eficiência de grupos eletrobomba poderão servir como base de avaliação de desempenho, uma vez que permitem obter informação, não apenas relativa à capacidade da bomba, mas também ao rendimento e conseqüente consumo de energia.

Nos tópicos seguintes serão descritas: (i) as principais razões de ineficiência em sistemas elevatórios integrados em sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais, (ii) as características dos principais testes de eficiência, (iii) a aplicação dos mesmos na avaliação de desempenho e otimização energética e (iv) as possíveis vantagens e constrangimentos da aplicação desses testes, tomando como exemplo um conjunto de estações elevatórias sob gestão da SIMDOURO S.A., no concelho de Vila Nova de Gaia.

2. PERDAS DE EFICIÊNCIA

A eficiência do equipamento instalado pode diferir muito da informação teórica disponibilizada pelos fabricantes. Tal pode suceder porque (EC, 2001):

- o ponto de funcionamento real do sistema pode estar afastado do ponto de máxima eficiência (*Best Efficiency Point* – BEP), sendo a magnitude dessa diferença variável de bomba para bomba;
- a eficiência dos grupos eletrobomba reduz-se significativamente com o tempo.

No primeiro caso, algumas das razões associadas a esse afastamento, correspondem a (Figura 2): (i) margens de tolerância e majoração existentes, quer na informação fornecida pelos fabricantes (curva característica da bomba), quer na caracterização do sistema (curva característica da instalação), (ii) à caracterização dos grupos de acordo com valores médios de performance e em condições ideais (sem estrangulamentos, fluidos sem impurezas, etc.) o que poderá não corresponder à situação real, ou (iii) à variação da altura manométrica com a variação dos níveis de pressão a montante e a jusante.

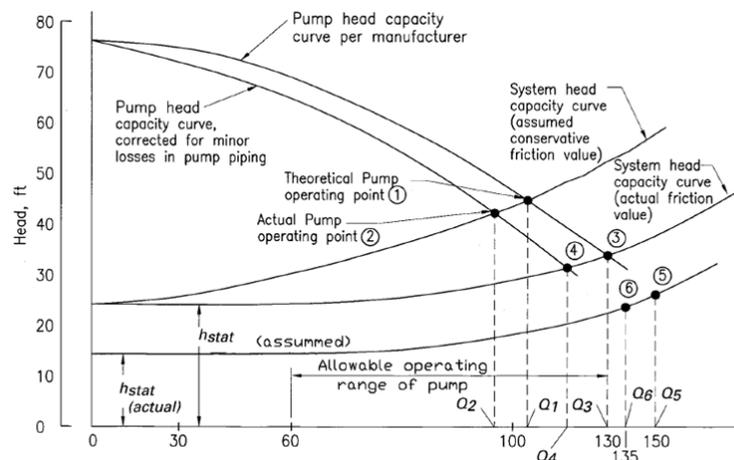


Figura 2: Possível variação do ponto de funcionamento de uma bomba (Bosserman, 2004).

No segundo caso, verifica-se uma redução significativa de eficiência dos grupos eletrobomba com o tempo, podendo, uma bomba centrífuga, de água potável, sem manutenção, perder 10 a 15% da eficiência original (EC, 2001). Refira-se, ainda que, a redução anual de eficiência média será mais acentuada nos primeiros anos de vida útil, tendendo, no entanto, a reduzir-se com o aumento do desgaste (EC, 2001; Bunn, 2010). Uma aposta numa manutenção preventiva poderá permitir poupanças bastante

significativas, garantindo uma maior capacidade do grupo eletrobomba e um nível de eficiência mais elevado (Figura 3), com inerentes reduções ao nível do consumo de energia (EC, 2001; Beebe, 2004).

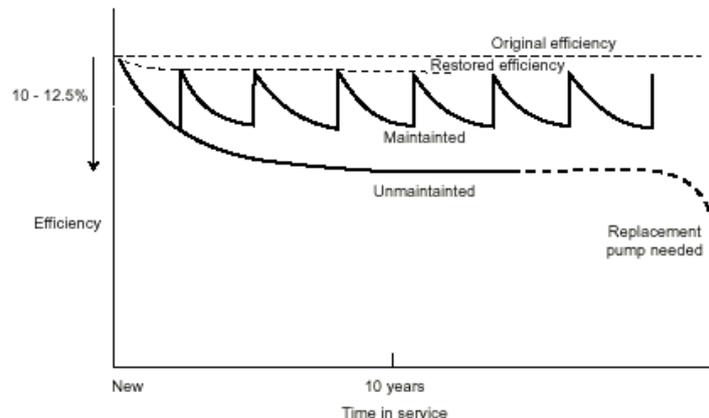


Figura 3: Evolução no tempo da eficiência de um grupo eletrobomba com e sem manutenção regular (EC, 2001).

3. TESTES DE EFICIÊNCIA

A realização de testes de eficiência apresenta-se como uma solução para a avaliação de desempenho dos grupos, através da aferição do funcionamento real (relações entre caudal, altura e rendimento) e, quando aplicados de forma regular e continuada, para análise da variação, ao longo do tempo, do rendimento do equipamento. Assim, tendo em atenção que o desgaste do equipamento é inevitável, a caracterização da variação do funcionamento do sistema, permitirá prever um escalonamento temporal para a substituição dos impulsores, por exemplo, atendendo à diminuição da capacidade de elevação e ao aumento do consumo de energia (o mais restritivo dos dois fatores).

Atualmente as entidades do setor têm disponíveis duas metodologias, com resultados comprovados e áreas de aplicação complementares, para avaliar o desempenho *in-situ* dos grupos eletrobomba: o Método “Convencional” e o Método “Termodinâmico”.

Independentemente do método utilizado, os resultados finais compreendem a determinação da potência, da altura de elevação e do rendimento, para vários pontos de funcionamento, para cada grupo eletrobomba individual e nas condições de funcionamento reais.

Por outro lado, os seguintes procedimentos são comuns a ambas as metodologias:

- Medição direta da potência absorvida pelo motor, em situações particulares, a montante do variador de frequência;
- Medição do diferencial de pressão entre a tubagem de aspiração e a de compressão, valor que após as necessárias correções, face ao diferencial de velocidade e de energia potencial de posição, permite aferir a altura de elevação do grupo;
- Incorporação da eficiência do variador de frequência e do motor através dos dados do fabricante. Esta informação é normalmente fidedigna, não sofrendo uma alteração significativa com o funcionamento do equipamento, podendo assim ser utilizada sem implicar um aumento significativo da incerteza do teste de desempenho.

No mesmo sentido, em ambas as metodologias é utilizada a equação da potência de uma bomba hidráulica (1): (i) no caso do método convencional, para o cálculo direto do rendimento do equipamento (após a definição das restantes variáveis) e, (ii) no método termodinâmico, para a determinação indireta do caudal, após a determinação do rendimento do equipamento.

$$P_a = q \cdot \rho \cdot g \cdot H / (\eta_M \cdot \eta_B) \quad (1)$$

Sendo:

η_M a eficiência do motor e variador de velocidade (expressa em fração);

η_H a eficiência hidráulica do grupo eletrobomba (expressa em fração);

P_a a potência absorvida pelo motor ou sistema (caso exista variador de velocidade), em W;

q o caudal volumétrico, em m³/s;

ρ a massa volúmica do fluido, em kg/m³, sendo uma função da temperatura e pressão;

g a aceleração da gravidade, em m/s²;

H a altura de elevação total, em m.

Contudo, apesar dos vários procedimentos comuns, o modo como os resultados são incorporados em ambas as metodologias e, em última análise, a forma como afetam o cálculo do rendimento, é completamente distinta. Nesse sentido, a perceção clara das vantagens e limitações de cada metodologia, deverá ser incorporada na seleção da metodologia a empregar, face às características reais do sistema.

Relativamente à incerteza associada a cada uma das metodologias (Tabela 1), o método “convencional” apresenta o potencial, na generalidade dos casos, de garantir as classes de “Grau 1” e “Grau 2” de acordo com a EN ISO 9906, ficando o grau de “Precisão” reservado para testes realizados em laboratório ou plataformas de teste, ou mesmo no local da instalação, mas apenas se forem cumpridas condições próximas das ideais (de acordo com a norma ISO 5198: 1999). Não obstante, o método termodinâmico pode ser, normalmente, enquadrado na classe de “Precisão” de acordo com a norma EN ISO 5198.

Tabela 1: Valores máximos de incerteza por classe

Norma	EN ISO 5198:1999	EN ISO 9906:1999	
Classe	Precisão	Grau 1	Grau 2
Parâmetro	Valor máximo de incerteza		
Caudal	1.5	2.0	3.5
Eficiência	2.25	3.2	6.4

3.1 Método convencional

O método designado por convencional é mais usual, apresentando um reconhecimento e aceitação geral pelas entidades do sector e corresponde à medição dos parâmetros: caudal, pressão e potência. Utilizando estes parâmetros, é possível estimar o rendimento do grupo eletrobomba. De facto, este método resulta da aplicação do balanço energético completo (princípio de conservação de energia) a um volume de controlo que engloba o grupo eletrobomba. Após algumas simplificações, o valor do rendimento hidráulico para diversos

pontos de funcionamento do sistema pode ser calculado através de (2), versão reorganizada da equação (1).

$$\eta_H = q \cdot \rho \cdot g \cdot H / \eta_M \cdot P_a \quad (2)$$

A exatidão do método convencional está relacionada com a precisão da medição dos parâmetros q , H , P_a e η_M , sendo a definição do caudal, por natureza, o parâmetro limitativo deste método e o ponto de distinção para com o método termodinâmico. De uma forma geral, os valores de incerteza associada à medição do caudal pelo método convencional oscilam entre os 0.5 e os 5%, dependendo das condições do sistema e do método considerado (ultrassónico, eletromagnético, etc.) (Henriques *et al*, 2006).

Por outro lado, o procedimento de medição de caudal *in situ* apresenta uma incerteza adicional face à incerteza associada a estes equipamentos, por duas razões principais (HydraTek, 2013): (i) o perfil de velocidade pode não ser uniforme no ponto de medição e para o ponto de funcionamento do sistema, devido ao efeito da turbulência no escoamento e (ii) a quantidade de ar dissolvido e bolsas de ar, efeito ampliado em situações de cavitação, pode influenciar significativamente os resultados. Não obstante, podem ser tomadas diversas medidas para diminuir os efeitos anteriores, tais como: garantir comprimentos retos mínimos a montante e a jusante do medidor, evitar juntas de desmontagem nos comprimentos anteriores, utilizar válvulas de passagem plena a montante e a jusante do equipamento, limitar a gama de pontos de operação do sistema e controlar o depósito de sedimento no interior da tubagem e sensores.

Por outro lado, os grupos eletrobomba não apresentam, usualmente, medidores de caudal individuais, especialmente para diâmetros grandes, tendo em atenção os custos de aquisição destes equipamento, a construção civil associada e a necessária manutenção e calibração desses equipamentos. Nessas situações será necessária a instalação de um medidor portátil, que poderá ser dificultada pelas exigências acima referidas, de minimização das margens de incerteza associadas (Figura 4).



Figura 4: Instalação de medidor portátil ultrassónico de caudal (HydraTek, 2013).

3.2 Método termodinâmico

O método termodinâmico constitui uma alternativa ao método convencional, tendo em atenção a elevada precisão da sua metodologia, principalmente em sistemas com altura de elevação e rendimentos relevantes, e face à flexibilidade de implementação no *layout* do sistema.

Esta metodologia baseia-se no princípio de que as perdas de energia do grupo eletrobomba são dissipadas, quase na sua totalidade, no escoamento. Assim, o rendimento do grupo eletrobomba é calculado pela relação (3), entre a energia hidráulica (E_H) e a energia mecânica (E_M). A energia hidráulica representa a operação ideal do sistema (100% de eficiência), sendo dependente, unicamente, das características do fluido. Por outro lado, a energia mecânica resulta na energia recebida pelo fluido do grupo eletrobomba na situação real e para as condições de operação.

$$\eta_B = \frac{E_H}{E_M} = \frac{\frac{1}{\rho} \cdot dp}{a \cdot dp + C_p \cdot dT} \quad (3)$$

Sendo:

η_B a eficiência da bomba (expressa em fração);

ρ a massa volúmica do fluido, em kg/m^3 , sendo uma função da temperatura e pressão;

C_p o calor específico a pressão constante (alteração da entalpia com a temperatura a pressão constante), em $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

a o coeficiente isotérmico (alteração da entalpia com a pressão a temperatura constante), em m^3/kg ;

dT o diferencial da temperatura entre os pontos de medição;

dp o diferencial da pressão entre os pontos de medição.

A principal característica do método termodinâmico é a medição estável e rigorosa do diferencial de temperatura (dT), parâmetro que varia principalmente com o rendimento hidráulico e altura de elevação (Tabela 2). Assim, alturas de elevação reduzidas implicam diferenciais de temperatura reduzidos, enquanto rendimentos da bomba elevados acarretam o mesmo efeito. É importante referir que os sensores de temperatura apresentam medições com incertezas inferiores a 1 mK ($10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabela 2: Valores típicos de diferencial de temperatura em função da altura de elevação e da eficiência hidráulica (Cartwright & Eaton, 2008)

Altura de elevação (mca)	Eficiência hidráulica (%)		
	70	80	90
25	26 mK	16 mK	8 mK
50	53 mK	32 mK	16 mK
100	106 mK	64 mK	35 mK

A vantagem do método termodinâmico prende-se com o facto de este medir diretamente a ineficiência da bomba (HydraTek, 2013). De facto, como a exatidão deste valor está associada apenas ao diferencial de temperatura e pressão, este método revela-se superior ao convencional, uma vez que os sensores de temperatura são mais precisos do que os medidores de caudal convencionais e menos sujeitos ao layout do sistema.

Por outro lado, associando a medição da potência, é possível estimar o caudal bombado. Para tal, será necessário utilizar a equação (1), associando o erro dos restantes parâmetros à determinação do caudal. Por fim, refira-se que, através da medição da ineficiência da bomba é possível utilizar esta metodologia para aferir, também, a existência de cavitação no sistema.

Não obstante, esta metodologia poderá, também, apresentar algumas desvantagens, nomeadamente (HydraTek, 2013): possibilidade de ocorrência de medições de temperatura instáveis, associadas a fenómenos de recirculação do fluido; dependência do valor de elevação do grupo eletrobomba (associando incertezas significativas a sistemas com alturas de elevação reduzidos); necessidade de materializar pontos de inserção para as sondas (Figura 5); e dificuldades acrescidas na aplicação em grupos eletrobomba verticais ou submersíveis.



Figura 5: Instalação das sondas de medição de temperatura e de pressão para o método termodinâmico (HydraTek, 2013).

4. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

A avaliação de desempenho, através da realização de testes de eficiência, pode, tal como referido anteriormente, servir de base à definição de um escalonamento temporal de realização de ações de manutenção preventiva, diminuindo os custos de manutenção, por minimização das situações de falha, ou de funcionamento muito deficiente do equipamento, que poderá acarretar danos adicionais. Todavia, essa avaliação poderá, ainda, ter um importante contributo no processo de otimização energética dos sistemas elevatórios, na medida em que, a determinação da eficiência dos grupos eletrobomba apresenta, ainda, o potencial de fomentar a identificação e implementação de medidas que contribuem para a minimização do consumo de energia e dos consequentes custos associados.

Por um lado, é possível, com esses testes, verificar a adequação do grupo eletrobomba ao sistema em que está inserido (relação entre o ponto de funcionamento e o ponto de máxima eficiência), bem como o rendimento real da bomba, identificando, por exemplo, situações de desgaste elevado dos impulsores, ou a existência de fenómenos de cavitação. Por outro lado, com a implementação de medidas de otimização, permite uma monitorização e acompanhamento das mesmas, com a consequente aferição quantitativa dos benefícios financeiros conseguidos.

Assim, a avaliação de desempenho corresponde ao ponto de partida fundamental para a implementação de um processo de otimização energética, que se poderá considerar constituído por diversas etapas (Figura 6), aplicáveis tanto a sistemas elevatórios integrados em sistemas urbanos de abastecimento de água, como em sistemas de drenagem de águas residuais.



Figura 6: Processo de otimização energética de sistemas elevatórios, integrados em sistemas urbanos de águas e águas residuais.

Nesse processo de otimização energética dever-se-á, então:

- (i) partir de uma caracterização do estado de funcionamento do equipamento elevatório (**Etapa 1 – Avaliação de desempenho**), que permitirá identificar situações problemáticas e realizar um *benchmarking* dos grupos elevatórios, atendendo à eficiência energética (atual e potencial) dos mesmos;
- (ii) integrar a informação proveniente da avaliação de desempenho para definição de um planeamento de manutenção para cada sistema elevatório (**Etapa 2 – Planos de manutenção**), reportando-se, quer à garantia de uma capacidade de elevação necessária (caudal), quer à minimização dos custos de energia, através de uma análise dos custos totais do ciclo de vida do sistema elevatório;
- (iii) caracterizado o funcionamento do sistema e identificadas e corrigidas situações de degradação do equipamento que conduzam a um aumento do consumo de energia, face às características originais do equipamento, analisar, técnica e economicamente, possíveis soluções de otimização energética (**Etapa 3 – Otimização do sistema**), que permitam, a nível individual do sistema elevatório, uma melhoria da eficiência no consumo de energia.
- (iv) analisar o potencial de otimização energética que possa ser conseguida através de alterações no funcionamento e gestão do sistema global (**Etapa 4 – Gestão integrada**), a decorrer em paralelo, ou posteriormente à etapa 3, dependendo das características do sistema em causa.

Este processo não é estático, devendo haver uma renovação permanente que se exige, quer pela degradação inevitável do equipamento, e que obriga a uma avaliação regular do desempenho do mesmo e readaptação das etapas subsequentes, se necessário, quer pela necessária flexibilização do sistema à evolução dos aglomerados populacionais em que está inserido e que traduzirá as solicitações presentes e futuras a que o mesmo estará sujeito.

Para uma melhor compreensão do papel fundamental da avaliação de desempenho em todo este processo, cada uma das etapas será devidamente detalhada nos pontos seguintes.

4.1 Etapa 1 – Avaliação de desempenho

No que toca à avaliação de desempenho propriamente dita, o objetivo principal será, então, o de definir um *benchmarking* do funcionamento real dos grupos elevatórios, nomeadamente no que toca à eficiência energética. Para tal, deverão ser considerados índices de classificação do desempenho adequados, como por exemplo a energia específica [kWh/m³], os indicadores de eficiência sugeridos pela ERSAR [kWh/(m³.100m)], ou mesmo o *Green*

Pump Index –GPX (adimensional) (Riventa & Deritrend Ind., 2011). Tomando como exemplo este último índice, a definição do mesmo é apresentada em (4):

$$GPX = \frac{Q \times H_{geo}}{3.67 \times Pot} \quad (4)$$

Sendo Q o caudal bombeado medido (em m^3/h), H_{geo} o desnível geométrico a vencer (em m), e Pot a potência elétrica consumida pelo grupo eletrobomba (em kW).

Analisando a definição deste índice em maior detalhe, verifica-se que corresponde à estimativa de um rendimento equivalente do sistema, considerando a eficiência do mesmo na satisfação das necessidades do sistema (elevação de um dado caudal para vencer um dado desnível geométrico), mas deixando as perdas de carga (contínuas ou localizadas) inerentes ao escoamento, do lado das ineficiências que poderão ser alvo de otimização, bem como as perdas associadas rendimento do(s) equipamento(s), sejam elas da bomba, do motor, ou mesmo do variador de frequência (se existente). Comparando com o índice de energia específica, ou mesmo com o indicador de eficiência da ERSAR, verifica-se que, mais do que incorporar o rendimento do equipamento, como é o caso desses dois índices, o GPX procura refletir a eficiência do equipamento nas especificidades do sistema, facilitando a comparação entre grupos eletrobomba distintos, independentemente da sua aplicação.

Por outro lado, refira-se que o GPX tem, ainda, como objetivo definir o desempenho real do equipamento, considerando uma comparação do desempenho atual do sistema, com o que poderá ser potencialmente atingido (exemplo na Figura 5, sendo “C” – o estado atual e “P” – o estado que se poderá potencialmente atingir).

GPX INDEX	C	P	ACTION
<50 G8	48		BELOW RECOMMENDED EFFICIENCY Immediate Action recommended to improve Energy Efficiency
50 - 54 G7			
55 - 59 G6			
60 - 64 G5			AVERAGE PERFORMANCE Future planning should include Energy Reduction measures
65 - 69 G4			
70 - 74 G3			EXCELLENT PERFORMANCE
75 - 79 G2	75		
80+ G1			

Figura 5: Escala de classificação do índice GPX, de acordo com o funcionamento atual “C” e o que se poderá, potencialmente, atingir “P” (exemplo) (Riventa & Deritrend Ind., 2011).

4.2 Etapa 2 – Planos de manutenção

Uma vez caracterizado o funcionamento real dos grupos elevatórios, idealmente com base em avaliações de desempenho regulares, será possível comprovar o desgaste dos grupos eletrobomba, em especial no que diz respeito à degradação dos impulsores (HydraTek, 2013). Além disso, se existir um registo da evolução do rendimento do sistema com o tempo, será, até, possível prever um escalonamento de substituição/ reparação dos impulsores (e voluta), de modo a garantir um determinado nível de capacidade de elevação (caudal) e eficiência, com os consequentes benefícios em termos de energia consumida (Beebe, 2004; Bunn, 2010).

Os planos de manutenção deverão, assim, partir dos resultados da avaliação de desempenho, incluindo a necessária comparação com os dados teóricos de performance do equipamento disponibilizados pelo fabricante e identificar as situações em que se justifica, técnica e economicamente, a realização de intervenções preventivas de manutenção.

A avaliação económica associada deverá ter em conta os custos totais do ciclo de vida do sistema elevatório, incorporando tanto os custos da intervenção de manutenção, como os sobrecustos de energia, assumindo uma poupança no custo anual de energia, decorrente do aumento da eficiência do equipamento com essa intervenção (Figura 6).

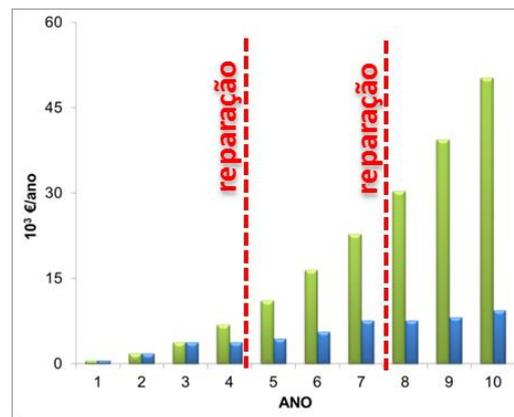


Figura 6: Exemplo de somatório de sobrecustos de energia, associados à degradação do impulsor, sem intervenção de manutenção (a verde) e com recuperações regulares (a azul).

Essa análise, fundamental, é conceitualmente simples, mas acaba por assumir uma maior complexidade na prática, visto que a reposição das condições de eficiência depende do grau de recuperação conseguido pela intervenção de manutenção (Figura 7), mas também do rigor de caracterização do processo de degradação do equipamento.

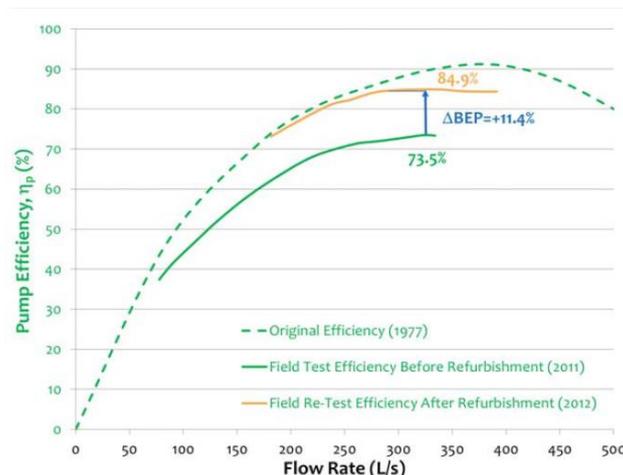


Figura 7: Exemplo de diferenças ao nível da eficiência de um equipamento entre a informação teórica do fabricante e o funcionamento real (medida, por testes de eficiência, antes e depois da intervenção de recuperação) (HydraTek, 2013).

Este último aspeto reforça, mais uma vez, a importância de realização de avaliações regulares de desempenho, no sentido de caracterizar, ao nível de cada sistema, o padrão de degradação específico, que permitirá identificar a cadência de intervenção nos sistemas

respetivos. Embora desenvolvido de forma genérica, tomando por base um estudo realizado no Canadá para mais de 150 bombas (HydraTek, 2013), apresenta-se na Figura 8, um possível escalonamento temporal máximo, em função da potência da bomba e da percentagem de tempo de funcionamento, para a realização de avaliações de desempenho, que poderão auxiliar o processo de caracterização da degradação dos grupos.

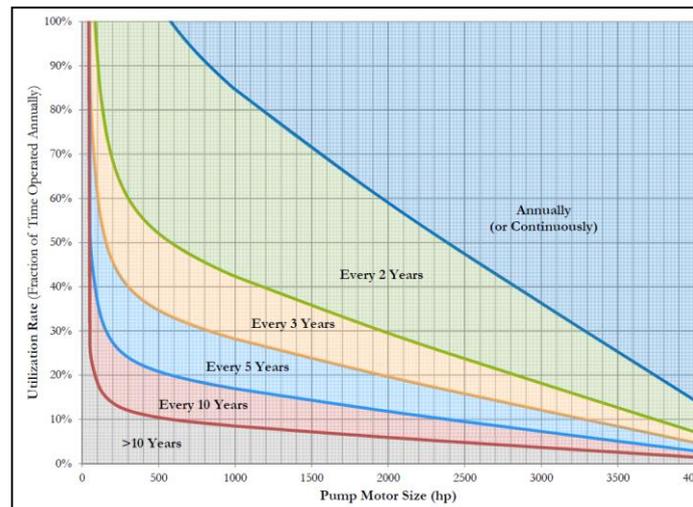


Figura 8: Proposta de escalonamento para a realização de testes de avaliação de desempenho em grupos eletrobomba (HydraTek, 2013).

4.3 Etapa 3 – Otimização energética

A eficiência global de um sistema elevatório depende da capacidade de adequação às necessidades de bombeamento, mesmo que o equipamento instalado apresente um bom nível de eficiência para o seu ponto de funcionamento. Situações onde se verifique um número de arranques excessivos, um ruído elevado ou um número de avarias significativo, poderão corresponder a sistemas sobredimensionados e/ou com variações relevantes de consumos (em sistemas de abastecimento de água) ou de caudais afluentes (em sistemas de drenagem de águas residuais). Estes casos, frequentes, justificam uma nova abordagem de análise onde, para além do nível de eficiência dos grupos eletrobomba, seja considerada uma avaliação global e real de todo o sistema elevatório (Leite *et al*, 2010).

Existem diversas soluções de otimização aplicáveis a sistemas elevatórios, algumas mais vocacionadas para sistemas já em funcionamento, tais como e entre outras: instalação de bombas mais eficientes, introdução de bomba de pequena capacidade (*pony pump*), instalação de variadores de velocidade, etc.. No entanto, a opção pela solução ideal implica uma análise global do funcionamento do sistema, na situação atual, e uma simulação da solução de otimização para um período de tempo significativo. De facto, os estudos de otimização poderão ser aplicados a todo o tipo de estações elevatórias, muito embora o potencial de otimização seja variável (Leite *et al*, 2012). Por outro lado, estações que apresentem consumos intensivos de energia poderão apresentar um potencial total de poupança (em custos) mais significativo do que estações elevatórias menos eficientes e, teoricamente, com um potencial relativo de otimização superior.

Neste caso, a avaliação de desempenho representa, não só a forma de caracterização do funcionamento real do grupo eletrobomba, determinando com rigor o ponto de partida para a otimização do sistema, mas também uma monitorização e acompanhamento das medidas implementadas, com a consequente quantificação dos reais benefícios financeiros conseguidos.

4.4 Etapa 4 – Gestão integrada

A gestão integrada do consumo de energia no sistema global em que os sistemas elevatórios estão integrados, pressupõe uma análise do funcionamento conjunto, idealmente, incluindo os diferentes elementos que constituem estes sistemas e as respetivas capacidades e consumos de energia associados, de modo a maximizar os potenciais de poupança que se possam conseguir ao nível de cada sistema elevatório (GWRC, 2010).

Obviamente essa análise será bastante distinta no que toca a sistemas de abastecimento de água potável, ou a sistemas de drenagem de águas residuais e, em cada um destes dois tipos de sistemas, deverá atender, ainda, às diversas especificidades dos sistemas, quer no que toca à inter-relação dos diferentes componentes, quer no que toca às necessidades condicionadas pelas características do aglomerado servido.

Demonstrando tratar-se de uma análise bastante complexa, será especialmente apropriada a utilização de *softwares* que permitam a modelação desses sistemas. Tal permitirá a simulação de múltiplos cenários de funcionamento, mas também de aplicação de possíveis soluções de otimização nos diversos componentes. Dessa forma será possível avaliar os consumos de energia do sistema global e identificar as soluções de otimização e/ou regras de operação do sistema que permitirão uma minimização desse consumo.

Também, aqui, a avaliação de desempenho poderá representar um papel fundamental, na medida em que permite: (i) por um lado, aferir e validar os cenários de funcionamento considerados e, (ii) por outro, fornecer informação atualizada (podendo, no limite, chegar à avaliação em tempo real, com uma monitorização contínua dos parâmetros descritos no tópico 3) ao operador do sistema, tornando possível a incorporação, na gestão corrente do sistema, de informação referente aos consumos de energia dos diferentes componentes.

5. POTENCIAL DE APLICAÇÃO DOS TESTES DE EFICIÊNCIA

A avaliação do potencial de aplicação dos métodos convencional e termodinâmico, enquanto procedimentos de avaliação de desempenho, baseou-se na comparação da incerteza relativa no cálculo do rendimento, por ambas as metodologias, para o ponto de funcionamento teórico do sistema. Essa análise tomou por base, informação referente a uma amostra de 6 sistemas elevatórios (EE Lavadores, EE Canelas, EE Valadares, EE Afurada, EE Espírito Santo e EE Madalena), enquadrados no sistema da SIMDOURO, S.A., concelho de Vila Nova de Gaia, que pelas características de funcionamento (caudal, altura de elevação e rendimento) foram considerados representativos do sistema global.

Tal como referido anteriormente, a grande distinção entre os dois métodos reside na incerteza associada à determinação do rendimento do sistema, tendencialmente menor no termodinâmico. No entanto, a incerteza associada a este último, varia significativamente com a altura de elevação e com o próprio rendimento do sistema. Assim, a comparação baseou-se na fixação de uma incerteza relativa para a eficiência do sistema, para o método convencional, assumindo o cumprimento do Grau 1 de precisão, da norma ISO 9906:1999 (incerteza de 3.2%). Por sua vez, a incerteza relativa no método termodinâmico foi calculada recorrendo à fórmula (4), apresentada na ISO 5198:1998, tendo em atenção que este parâmetro depende dos valores absolutos da variação de pressão (Δp) e de temperatura ($\Delta \theta$). Para a medição da temperatura considerou-se uma incerteza absoluta de 1 mK e para a variação da pressão assumiu-se uma incerteza relativa de 1%.

$$\frac{\delta\eta}{\eta} = \left\{ \left[1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{\bar{c}_p \Delta\theta}{\bar{a} \Delta p}\right)^2} \right] \left(\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \frac{1}{\left(1 + \frac{\bar{a} \Delta p}{\bar{c}_p \Delta\theta}\right)^2} \left(\frac{\delta\Delta\theta}{\Delta\theta}\right)^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

Observando a Figura 9, verifica-se que a incerteza associada ao método termodinâmico apenas é superior ao método convencional para duas estações elevatórias (EE Espírito Santo e EE Afurada). Neste contexto, para as demais, o método termodinâmico afirma-se como uma alternativa válida para a realização de análises de desempenho em sistemas elevatórios de águas residuais, mesmo com alturas elevação reduzida, sistemas que, à partida, não constituiriam o âmbito de aplicação preferencial desta metodologia.

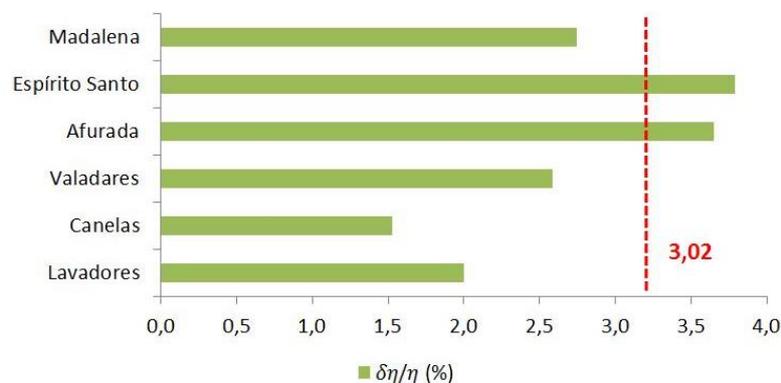


Figura 9: Incerteza relativa do rendimento do sistema obtida para o método termodinâmico para os casos em estudo. Comparação com a incerteza relativa associada ao método convencional ($\delta\eta/\eta = 3.02\%$)

Por outro lado, é fundamental ter em atenção os seguintes pontos: (i) a degradação do impulsor implica uma diminuição do rendimento do equipamento, processo que diminui a incerteza associada ao método termodinâmico e (ii) a análise anterior considerou um valor teórico para a incerteza na medição de caudal (método convencional), valor que dificilmente se poderá obter em medições *in situ*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- BEEBE, R. (2004), *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*, Elsevier Science & Technology Books, ISBN: 1856174085, Abril.
- BOSSERMAN, B. (2004), *Chapter 10 - Pump System Hydraulic Design*, em Mays, L., *Hydraulic Design Handbook*, McGraw-Hill Education, ISBN: 9780070411524.
- BUNN, S. (2010), *Impact of Pump Wear on Efficiency*, Derceto Aquadapt, The World's Water Event, Annual Conference and Exposition 10, American Water Works Association, Junho, Chicago, Illinois.
- CARTWRIGHT, S., EATON, B. (2008), *Accurate measurement of pump efficiency improvements using cutting edge technology*, Proc. New Zealand Water and Waste Association Annual Conf., Water New Zealand, Wellington, New Zealand.
- DOE, HI, EUROPUMP (2001), *Pump Life-Cycle costs: A Guide to LCC analysis for pumping systems*, US Department of Energy's Office of Industrial Technologies (OIT- DOE), Hydraulic Institute, Europump.
- EC (2001), *Study on Improving the Energy Efficiency of pumps*, European Commission, ETSU, CETIM, TFA, David T. Reeves Consultant, NESAs, disponível online em: http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/sites/energyefficiency/files/files/documents/save_pumps_final_report_june_2003.pdf
- ERSAR (2012), *A evolução dos Serviços de Água em Portugal*, Entidade Reguladora de Sistemas de Águas e Resíduos, I.P., Março de 2012, AquaLifeExpo, Lisboa.
- ERSAR (2013), *Relatório Anual do Sector das Águas e Resíduos em Portugal (RASARP) 2012 – Volume 03 – Avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores*, Entidade Reguladora de Sistemas de Águas e Resíduos, I.P., Setembro, ISBN 978-989-8360-17-5.
- GWRC (2010), *Energy Efficiency in the Water Industry: A Compendium of Best Practices and Case Studies - Global Report*, Global Water Research Coalition, UK Water Industry Research Limited, ISBN 1 84057 571 9.
- HENRIQUES, J., PALMA, J., RIBEIRO, A. (2006), *Medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas*, Série de Guias Técnicos 9, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Instituto Regulador de Águas e Resíduos, (Atual ERSAR I.P.), 2006.
- HYDRATEK, D. (2013), *Toward Municipal Sector Conservation: A Pump Efficiency Assessment and Awareness Pilot Study*, HydraTek & Associates, Canada, Maio 2013.
- LEITE, P., FERREIRA, F., TENTÚGAL-VALENTE, L., VIVAS, E., (2012), *Os variadores de velocidade como instrumentos de optimização energética em estações elevatórias de águas residuais. Vantagens e limitações da sua aplicação*, publicação em atas do 11º Congresso da Água, APRH, Porto, 6 a 8 de fevereiro de 2012.
- LEITE, P., VIVAS, E., MONTEIRO, P., TENTÚGAL-VALENTE, L, (2010), *Planos de optimização energética de estações elevatórias de águas residuais*, publicação em actas da conferência 14º ENaSB-SILUBESA, APESB, Porto, 26 a 29 de Outubro de 2010.
- RIVENTA, DERITREND IND. (2011), *Green Pump Index – A methodology to benchmark in situ pump performance* (Whitepaper), Riventa, Deritrend Industries, 2011.