

# OS VARIADORES DE VELOCIDADE COMO INSTRUMENTOS DE OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUAS RESIDUAIS.

Vantagens e limitações da sua aplicação.

**Pedro LEITE**

*Smartive, Lda; pedro.leite@smartive.net*

**Fernando FERREIRA**

*Águas e Parque Biológico de Gaia, EEM, ferreira@aguasgaia.pt*

**Luís TENTÚGAL VALENTE**

*Noraqua, Lda, luisvalente@noraqua.pt*

**Eduardo VIVAS**

*Smartive. Lda; eduardo.vivas@smartive.net*

## **RESUMO:**

Os sistemas de drenagem de águas residuais apresentam variações significativas de caudal transportado. Assim, como os sistemas elevatórios são dimensionados para o valor máximo afluente, a possibilidade de, na exploração, adaptar o caudal bombeado à variação do caudal afluente traduzir-se-á numa redução significativa dos custos de energia.

Existem diversas técnicas de optimização energética. Porém, a escolha da solução ideal implica a análise global do funcionamento do sistema elevatório, a avaliação dos limites de aplicabilidade das soluções e a avaliação económica das mesmas. No caso dos variadores de velocidade é importante distinguir se o sistema é controlado pela perda de carga ou pelo desnível geométrico, sendo que, neste caso, uma alteração do ponto de funcionamento poderá levar à variação significativa do rendimento do sistema.

Como caso de estudo foi considerada a estação elevatória de Espírito Santo, integrada no sistema de drenagem de águas residuais do Município de Gaia, sob responsabilidade da empresa Águas e Parque Biológico de Gaia, EEM. Esta estação é constituída por 2+1 grupos electrobomba, com uma potência total de 175 kW, para um caudal máximo de 535 l/s. A avaliação de eficiência energética foi efectuada por simulação numérica do sistema elevatório com a ferramenta PUMP3E.

O estudo realizado permitiu concluir que os variadores de velocidade possibilitam uma redução das perdas de carga e dos custos de energia do sistema. Contudo, a aplicação a outras situações deverá ser precedida de uma análise custo-benefício, incluindo a necessária comparação com outras soluções de optimização energética.

**Palavras chave:** Eficiência energética, simulação do sistema elevatório, custos de ciclo de vida, variadores de velocidade.

## 1 INTRODUÇÃO

Analisando o ciclo de vida dos sistemas elevatórios verifica-se que os custos do consumo de energia são os mais significativos, podendo, nos sistemas de maior dimensão, atingir valores na ordem dos 80 a 90% do custo total (DOE *et al*, 2001). Assim, a maximização da eficiência energética revela-se essencial devido à tendência crescente do custo de energia, e à necessidade de redução da dependência energética e da emissão de gases de efeito de estufa, resultantes da produção de energia (EUROSTAT, 2009; IRAR, 2009).

Por outro lado, as entidades gestoras do sector de serviços de águas em Portugal são avaliadas, desde 2005, segundo um conjunto de indicadores (IRAR&LNEC, 2004;) cujos resultados são publicados num relatório anual de avaliação, o RASARP (ERSAR, 2011). Actualmente, o principal indicador, nesta matéria, é o de utilização de recursos energéticos [kWh/m<sup>3</sup> de água facturada], embora, na proposta de segunda geração do sistema de avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores (ERSAR&LNEC, 2009), esse indicador deva passar a avaliar, directamente, a eficiência energética das instalações elevatórias (kWh/(m<sup>3</sup>.100m), reforçando a necessidade de optimização das mesmas.

De facto, os sistemas elevatórios de águas residuais são um exemplo claro de um processo de bombagem controlado pela variação do caudal afluente. Independentemente da capacidade de regularização de caudal, associada ao poço de bombagem, o sistema é obrigatoriamente dimensionado para o caudal máximo afluente (no ano horizonte de projecto). Como as perdas de carga do sistema aumentam segundo uma relação de segundo grau com o caudal, um funcionamento do sistema acima das necessidades reais de elevação implica, também, um consumo desnecessário de energia (HI&PSM, 2008). Como tal, a possibilidade de adaptar o caudal bombeado à variação do caudal afluente traduzir-se-á numa redução significativa dos custos de operação, por minimização dos custos de energia.

Tomando por base procedimentos de avaliação de eficiência energética e estudo de soluções de optimização aprofundados em trabalhos anteriores (LEITE *et al*, 2010a; 2010b) é efectuada, no presente trabalho, uma avaliação específica das principais vantagens, condicionantes e desvantagens da aplicação de variadores de velocidade na optimização energética de sistemas de elevatórios de águas residuais. Para tal é efectuada uma descrição dos principais aspectos técnicos relativos a essa solução (ponto 2), bem como da ferramenta de avaliação específica utilizada para o efeito (PUMP 3E) (ponto 3) e ainda do caso de estudo considerado (estação elevatória de Espírito Santo, no município de Gaia) (ponto 4). A análise dos resultados obtidos é efectuada no ponto 5 e, no ponto 6, são sistematizadas as principais conclusões em relação à possível aplicação de variadores de velocidade para a optimização energética de outros sistemas elevatórios.

## 2 VARIADORES DE VELOCIDADE COMO SOLUÇÕES DE OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

Das diversas técnicas/metodologias de optimização energética existentes, a alteração do diâmetro do impulsor, a instalação de variadores de velocidade, a substituição dos grupos electrobomba por outros mais eficientes ou, mesmo, a instalação de grupos de pequena capacidade, destacam-se por serem especialmente vocacionadas para aplicação a sistemas já existentes, em operação (Leite *et al*, 2010a; 2010b).

No que toca aos variadores de velocidade verifica-se que estes permitem o controlo da velocidade de rotação da bomba, alterando o ponto de funcionamento do sistema elevatório através da alteração da tensão e frequência da corrente fornecida ao motor eléctrico (CEATI, 2009). Sendo de simples instalação, este tipo de dispositivos permite, assim, um maior ajuste entre os volumes afluentes e os caudais bombeados, podendo conduzir a importantes benefícios económicos devido à redução dos consumos de energia. Por outro lado, por redução da velocidade de rotação, verifica-se, também, uma redução das forças exercidas sobre o impulsor, o que permite um aumento do período de vida dos

apoios, bem como dos vedantes do grupo electrobomba, além da redução de vibrações e ruídos (EUROPUMP & HI, 2004).

Todavia, deverá ser distinguida a aplicação destes sistemas consoante o sistema elevatório é controlado pela perda de carga ou pelo desnível geométrico (EUROPUMP & HI, 2004):

(i) em sistemas cuja resistência ao escoamento (perdas de carga) representa a principal componente da altura manométrica, é possível definir uma relação entre caudal e potência, mantendo o nível de eficiência do ponto de funcionamento e, conseqüentemente, obedecendo às leis de afinidade do grupo electrobomba (Figura 1). Nesta situação o sistema apresentará um funcionamento próximo do ideal, com a manutenção de uma elevada eficiência mecânica, e permitindo ainda uma redução significativa das perdas de carga totais.

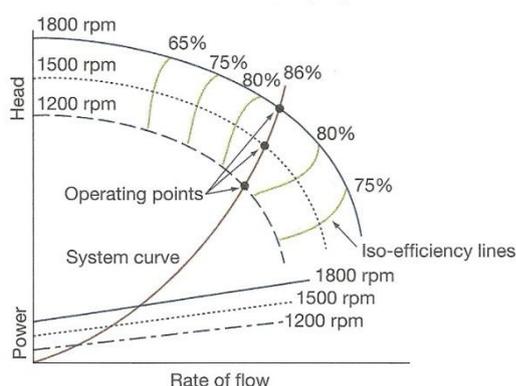


Figura 1: Exemplo do efeito da variação de frequência em grupos electrobomba dominados pelas perdas de carga (HI & PSM, 2008).

(ii) nos sistemas elevatórios em que o desnível geométrico é bastante relevante quando comparado com a altura manométrica (correspondentes à grande maioria dos sistemas existentes), existe uma discrepância significativa entre o declive da tangente à curva da instalação e o correspondente das tangentes às curvas de iso-eficiência dos equipamentos (Figura 2). Nesta realidade, o funcionamento dos variadores de velocidades deixa de ser representado pelas leis de afinidade, pelo que, uma mudança do ponto de funcionamento do sistema poderá conduzir a uma alteração significativa no rendimento global do mesmo.

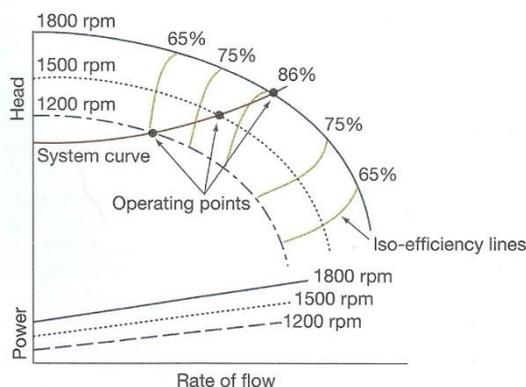


Figura 2: Exemplo do efeito da variação de frequência em grupos electrobomba dominados pela altura geométrica (HI & PSM, 2008).

Um segundo ponto a ter em atenção é a operação a velocidades demasiado reduzidas que podem ser prejudiciais ao funcionamento da bomba (próximo do caudal mínimo para fecho da válvula de retorno),

ou levar à deposição de sólidos que podem aumentar as perdas de carga ou conduzir à colmatação da tubagem (EUROPUMP & HI, 2004).

Assim, a análise das vantagens de implementação de um sistema de variação de frequência num sistema elevatório pressupõe o conhecimento das necessidades de funcionamento do mesmo (caracterização da situação actual, nomeadamente pelo diagrama de caudais afluentes), bem como a análise energética/hidráulica do ponto de funcionamento e, ainda, a avaliação global das condicionantes do sistema (EUROPUMP & HI, 2004).

No caso da caracterização da situação actual, tendo em atenção a habitual reduzida capacidade de regularização associada ao poço de bombagem, o diagrama do caudal afluente condiciona o esquema e capacidade de bombagem e, conseqüentemente, qualquer metodologia de optimização energética. Assim, e conforme referido, a primeira interrogação prende-se com a variação de caudal afluente, a sua distribuição ao longo do tempo e com os valores máximos e mínimos verificados. O diagrama de caudais classificados é, assim, um instrumento simples que permite compreender as necessidades do sistema, associando, para um determinado intervalo de análise, a frequência de ocorrência do caudal afluente.

Por outro lado, a energia específica (kWh/ m<sup>3</sup>) é um parâmetro útil para, no caso dos variadores de velocidade, calcular o custo de bombagem e, em última análise, efectuar uma comparação com outras possíveis soluções de optimização do sistema. Quando o sistema apresenta apenas um ponto de bombagem o cálculo da energia específica é uma tarefa simples. Contudo, em sistemas com vários pontos de funcionamento, a determinação da energia específica (1) implica um cálculo ponderado, por volume bombeado, da energia específica de cada ponto de funcionamento.

$$\text{Energia Específica } (E_s) = \frac{\text{Energia consumida}}{\text{Volume bombeado}} \text{ (kWh/ m}^3\text{)} \quad (1)$$

Assim, no caso de sistemas praticamente sem desnível geométrico, a energia específica é dependente das perdas de carga no sistema (2), o que, por sua vez, é função do caudal e da combinação do rendimento ( $\eta$ ) dos componentes (variador – motor eléctrico – bomba). É importante notar que, neste tipo de sistemas, tal como indicado anteriormente, a eficiência do grupo electrobomba mantém-se praticamente inalterada com a alteração da frequência e conseqüentemente da rotação da bomba.

$$E_s = \frac{H_{man} \times \rho \times g}{\eta_{variador} \times \eta_{motor} \times \eta_{bomba}} \text{ (kWh/ m}^3\text{)} \quad (2)$$

Porém, em sistemas com desnível geométrico significativo o cálculo da energia específica passa a incorporar uma importante parcela referente ao desnível geométrico. Se se admitir que o factor hidráulico do sistema,  $f_{HS}$ , indica a importância do desnível geométrico na altura manométrica (3):

$$f_{HS} = \frac{H_f + H_g}{H_g} \quad (3)$$

sendo  $H_f$  a componente de perdas de carga (fricção) e  $H_g$  o desnível geométrico, a expressão da energia específica assume a seguinte forma (4):

$$E_s = \frac{H_g \times \rho \times g}{\eta_{drive} \times \eta_{motor} \times \eta_{pump} \times f_{HS}} \text{ (kWh/ m}^3\text{)} \quad (4)$$

O denominador ( $\eta_{drive} \times \eta_{motor} \times \eta_{pump} \times f_{HS}$ ) pode, então, ser considerado como o parâmetro global de eficiência, ficando evidente que a energia específica apresenta um valor mínimo igual a  $H_g \times \rho \times g$  se a eficiência de todas as componentes fosse igual a 100% e não se verificassem perdas de carga no sistema. No entanto, verifica-se que a energia específica aumenta drasticamente quando o sistema se aproxima dos limites de funcionamento dos grupos electrobomba devido à redução da eficiência do conjunto grupo electrobomba e do variador de velocidade.

Assim, em sistemas controlados pelo desnível geométrico existe uma gama limitada em que a variação de caudal, e conseqüente redução das perdas de carga, conduz a um real aumento da eficiência global do sistema.

Com base nestes dados é possível equacionar o potencial de optimização dos sistemas elevatórios por variação da capacidade de bombagem e, em caso afirmativo, se a mesma deve ser continuamente variável ou alternada por patamares. A avaliação do potencial de optimização dos variadores de velocidade surge em comparação com o sistema convencional do tipo *on/off*.

### 3. FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – PUMP 3E

A escolha da solução óptima implica a análise global do funcionamento do sistema, a avaliação dos limites de aplicabilidade das diferentes soluções e a avaliação económica das mesmas, considerando a poupança de energia passível de ser obtida com cada uma das opções possíveis, ao longo do ciclo de vida do equipamento (LEITE *et al*, 2010a; 2010b). Como tal, a avaliação da eficiência energética do sistema, considerando a hipótese de optimização com variadores de velocidade, face a outras soluções de eficiência energética, poderá ser conseguida com a simulação numérica do sistema elevatório, como por exemplo através da ferramenta PUMP3E (*Pump Energy Efficiency Evaluation*). Esta ferramenta (Figura 3) possibilita, com base na definição de caudais afluentes, uma modelação dos diversos componentes do sistema elevatório e, ainda, a avaliação de alguns parâmetros de eficiência energética (EER - *Energy Efficiency Rating* e custo diário de energia), facilitando o teste e avaliação de soluções de optimização incluindo a estimativa de melhorias de eficiência. Esta ferramenta apresenta como principais funcionalidades:

- Definição de diferentes cenários de caudais afluentes;
- Modelação dos diversos componentes de um sistema elevatório, incluindo o efeito de regulação do poço e o arranque/paragem dos grupos, de acordo com níveis definidos pelo utilizador;
- Selecção de um ou vários grupos electrobomba, iguais ou distintos, possibilitando a definição das curvas características e de eficiência;
- Cálculo das perdas de carga contínuas e localizadas para cada ponto de funcionamento;
- Simulação do funcionamento do sistema, em intervalos de 60 s, permitindo a avaliação da evolução contínua de diversas variáveis;
- Definição dos parâmetros de eficiência energética, EER (*Energy Efficiency Rating*) e custo diário de energia.

Sendo um parâmetro complementar à avaliação da energia específica descrita no ponto 2, o *Energy Efficiency Rating* – EER (5) tem, também, como objectivo a avaliação do comportamento energético do sistema para facilitar a comparação de soluções de optimização energética de um sistema elevatório. No entanto, o EER permite aferir a discrepância entre as perdas de carga mínimas do sistema (consistindo na altura manométrica teórica, segundo a curva característica da instalação, considerando uma bombagem teórica e contínua do caudal afluente), e as perdas de carga reais, face aos caudais reais de bombeamento do sistema. Assim, quanto mais próximo de 100%, maior será a eficiência do sistema.

$$\text{EER (\%)} = \frac{H \text{ manométrica teórica} \times Q \text{ afluente}}{(H \text{ manométrica real} \times Q \text{ bombeado})} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

H manométrica teórica = Altura manométrica, em cada instante, de acordo com o diagrama de caudais afluentes definidos;

Q afluente = Caudal afluente à estação elevatória, em cada instante;

H manométrica real = Altura manométrica, em cada instante, para o caudal bombeado real;

Q bombeado = Caudal realmente bombeado pela estação elevatória, em cada instante.

Por outro lado, o custo de energia diário resulta da potência despendida (kWh) por cada grupo em funcionamento, individual ou em paralelo, ao longo do período de simulação. No caso de se verificar um aumento do custo de energia diário entre duas soluções, este facto pode dever-se a um aumento das perdas de carga injustificadas, visível num aumento simultâneo do parâmetro EER, ou por o sistema apresentar pontos de funcionamento mais afastados da maior eficiência de cada grupo electrobomba, reduzindo a eficiência energética do sistema global.

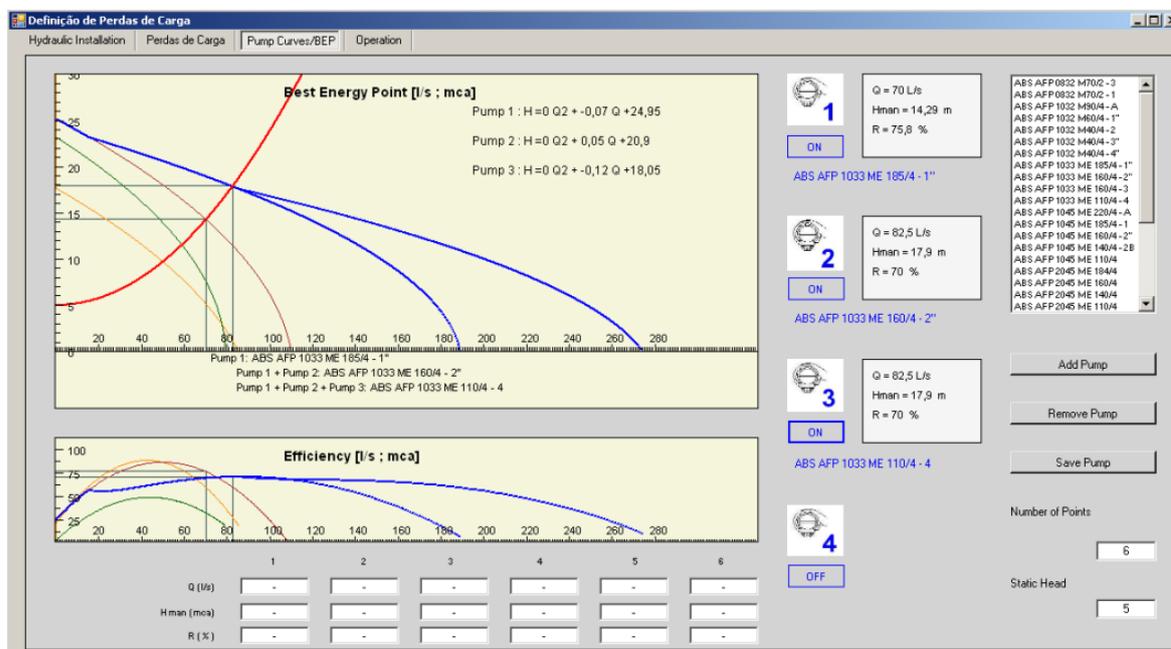


Figura 3 – Pump 3E - Módulo de selecção dos grupos electrobomba, com apresentação das curvas características dos grupos e definição dos pontos de funcionamento

#### 4. CASO DE ESTUDO DE OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA – EE DE ESPÍRITO SANTO

O estudo de optimização energética foi levado a cabo tomando por base o caso da estação elevatória de Espírito Santo, localizada em Miramar e sob responsabilidade da empresa Águas e Parque Biológico de Gaia, EEM. Assentou nas seguintes etapas:

- Caracterização do sistema.
- Verificação da variação do consumo energético anual;
- Análise do funcionamento hidráulico actual, compreendendo:
  - Diagrama do caudal afluente semanal em tempo seco e avaliação dos tempos de funcionamento do sistema;
  - Ponto de funcionamento do grupo electrobomba.
- Avaliação técnica e económico-financieira das soluções de optimização.

Importa desde logo referir que, subjacente a qualquer metodologia de optimização energética considerada, esteve sempre a condição de não alteração da capacidade máxima de bombagem da estação elevatória de Espírito Santo.

#### 4.1. Caracterização do sistema

O sistema compreende uma conduta elevatória em FFD – DN700 com uma extensão de 3.562m e um desnível geométrico de, aproximadamente, 9m. Este equipamento compreende três grupos electrobomba (2+1) idênticos, modelo ABS AFP 3502 – ME1100/6-61, atingindo uma potência de 175kW, para um ponto máximo de funcionamento de 559 l/s. A altura manométrica correspondente é de cerca de 22,7m.

O sistema elevatório arranca, alternadamente, os três grupos electrobomba, de acordo com o número de horas totais de cada equipamento, podendo ter, no máximo, dois grupos em funcionamento simultâneo.

Os níveis de arranque e paragem do sistema, em função do nível de águas residuais no poço, são, então:

Nível de Arranque 2 (NA2)– 2.30 m

Nível de Arranque 1 (NA1)– 1.95 m

Nível de Paragem 2 (NP2) – 1.40 m

Nível de Paragem 1 (NP1)– 1.15 m

Por outro lado, refira-se que o sistema apresenta apenas um grupo electrobomba associado a um variador de frequência, estando os restantes grupos equipados com arrancadores suaves (*softstarters*). Como tal, no funcionamento actual, o variador de velocidade apenas tem como objectivo controlar o arranque em situação de falha de energia e assegurar o funcionamento do sistema com o auxílio do gerador de emergência. Por esse motivo, na presente análise, irá ser considerado que este equipamento não influencia o funcionamento do sistema.



a)



b)



c)

Figura 4 – Fotografias da estação elevatória de Espírito Santo: a) Grupo electrobomba ABS 3502 – ME1100; b) câmara de manobras e c) equipamento de medição do caudal afluente.

#### 4.2. Variação do consumo energético anual

A análise das facturas de energia permitiu aferir um custo referente ao período de Janeiro a Setembro de 2011 (Tabela 1), sendo a componente de energia reactiva (função de  $\text{tg } \Phi$ ) de 3.609€, associado a um custo total de 31.300€. A estimativa do custo total para o ano de 2011 foi realizada considerando uma proporção, para o ano completo, a partir dos valores obtidos até Setembro de 2011 (Tabela 1).

Tabela 1: Resumo mensal das facturas de energia da estação de Espírito Santo, no período de Janeiro a Setembro de 2011 e a correspondente estimativa para o ano global (de 2011).

Mês	Parcela de energia Reactiva	Montante total da factura
Janeiro	853,05 €	6.802,66 €
Fevereiro	355,97 €	3.473,51 €
Março	456,80 €	3.886,96 €
Abril	286,80 €	3.303,92 €
Maió	237,95 €	2.784,61 €
Junho	348,15 €	2.784,82 €
Julho	312,16 €	2.661,60 €
Agosto	376,48 €	2.825,97 €
Setembro	381,76 €	2.776,63 €
TOTAL	3.609,12 €	31.300,68 €
Estimativa (Ano 2011)	4 812.12 €	41 734.24 €

Actualmente, de acordo com a legislação em vigor (Despacho nº 7253/2010), a contabilização da energia reactiva é facturada atendendo ao quociente entre a energia reactiva e a energia activa ( $\text{tg } \Phi$ ), segundo os escalões descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Escalões de quantificação da parcela de energia reactiva, em função da  $\text{tg } \Phi$ .

Escalão 1	$0.3 \leq \text{tg } \Phi < 0.4$	A partir de 01.01.2012
Escalão 2	$0.4 \leq \text{tg } \Phi < 0.5$	Em vigor desde 01.01.2011
Escalão 3	$\text{tg } \Phi \geq 0.5$	Em vigor desde 01.01.2011

Note-se que, dada a importância da parcela de energia reactiva na factura mensal global, a aplicação de uma bateria de condensadores para compensação desta parcela, com um custo aproximado de cerca de 5.000€, permitirá reduzir o valor de  $\text{tg } \Phi$  abaixo de 0.3, representando uma solução clara de diminuição dos custos de energia (período de retorno do investimento inferior a 1 ano).

#### 4.3. Análise do funcionamento actual

A optimização energética do sistema irá depender da variação do caudal afluente e, como tal, da caracterização e determinação do funcionamento actual, conforme anteriormente referido. Nesse sentido, foi implementada uma campanha de medição do caudal afluente e de registo da variação de nível no poço de bombagem, associada a procedimentos de arranque e paragem individualizada de cada grupo electrobomba. Apesar de o período de medição ter sido mais alargado, a análise apresentada é centrada na semana de 14/10 a 21/10, em que não se verificou qualquer precipitação.

#### 4.3.1. Diagrama de caudais afluentes e tempos de funcionamento

A medição do caudal afluente foi realizada através da instalação de um medidor de caudal no colector de montante da câmara de visita localizada à entrada da estação elevatória. Os valores obtidos pelo medidor instalado foram comparados e verificados com a integração da variação de nível do poço de bombagem. No período de análise a instalação recebeu um volume total de aproximadamente 61.600 m<sup>3</sup>, correspondendo a um volume diário de 8.683 m<sup>3</sup> e um caudal médio de, aproximadamente, 100 l/s. É importante lembrar que esta medição se realizou numa semana sem qualquer precipitação, pelo que se poderá considerar que os caudais afluentes medidos serão representativos de tempo seco. Representam-se, na Figura 5, as variações de caudal afluente à estação de Espírito Santo para um dos dias do período de análise, bem como, na Figura 6, o diagrama de caudais classificados, no período de medição, representando a frequência de ocorrência dos caudais afluentes.

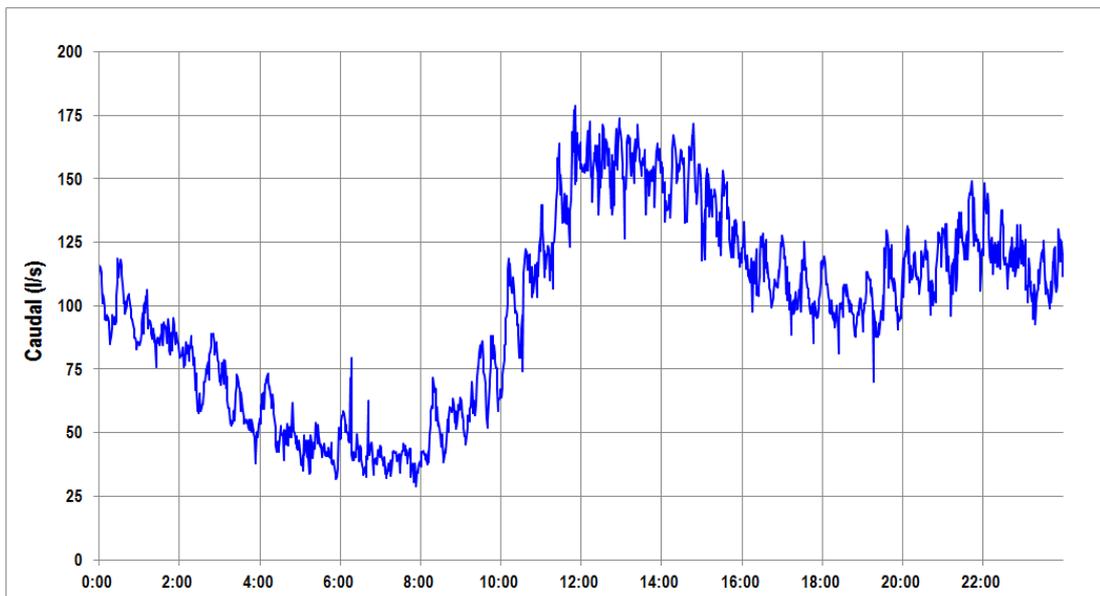


Figura 5 – Variação de caudal afluente à estação de Espírito Santo para o dia 16/10 (Domingo)

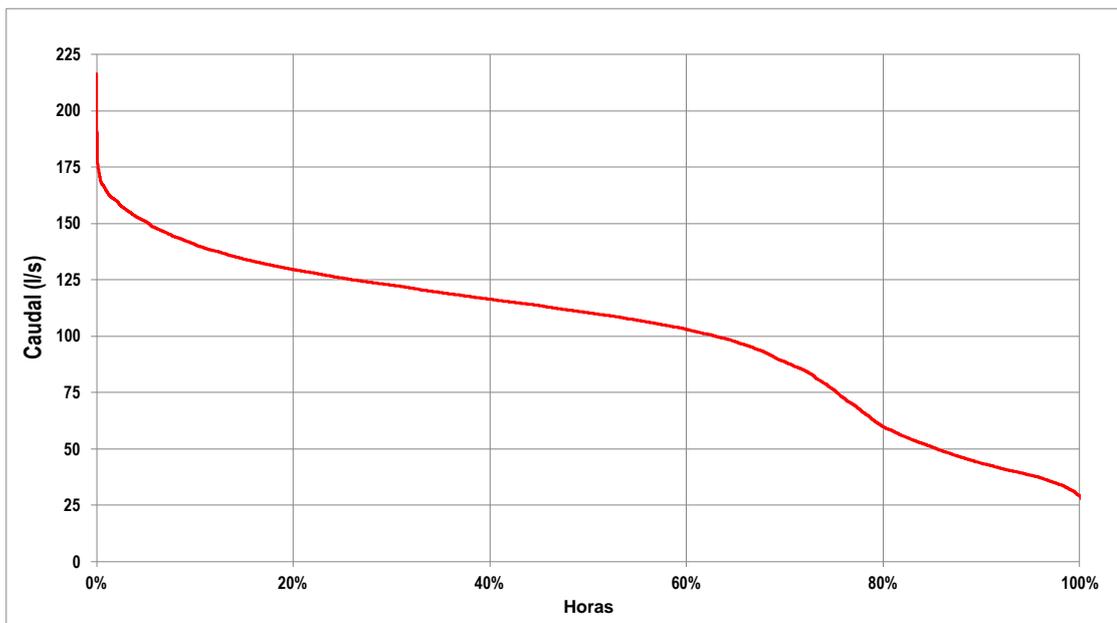


Figura 6 – Caudal de caudais classificados, identificando a frequência de ocorrência dos caudais afluentes para o período de análise.

Com vista à optimização energética do sistema a informação mais relevante relativa à variação do caudal ao longo do período de análise, corresponde à identificação dos seguintes aspectos:

- O valor máximo registado é de cerca de 215 l/s e o valor mínimo ligeiramente superior aos 25l/s;
- O valor mediano situa-se nos 110 l/s;
- Os valores de caudal superior a 150 l/s correspondem a uma frequência de ocorrência ligeiramente superior a 5%;
- Os valores de caudal entre 125 l/s e 100 l/s correspondem a, aproximadamente, 40% da frequência;

Por outro lado, a avaliação realizada permitiu, ainda, a análise dos tempos de funcionamento dos grupos electrobomba do sistema elevatório, em particular o tempo de arranque para cada equipamento (Tabela 3). O período de arranque foi definido como o intervalo de tempo decorrido entre o início do funcionamento e ser atingido um valor de caudal bombeado de 75 l/s. Neste regime de funcionamento os grupos electrobomba registaram valores de rendimento médios de 15%.

Tabela 3 – Análise dos tempos de funcionamento e do número de arranques no período em análise

	GE Nº1	GE Nº2	GE Nº3	Total
<b>Tempo funcionamento (h)</b>	3,5	27,6	21	52
<b>Nº arranques</b>	94	616	617	1.327
<b>Nº arranques/h</b>	0,6	3,7	3,7	7,9
<b>Tempo médio de funcionamento (min)</b>	2,2	2,7	2,0	-
<b>Tempo arranque (min)</b>	0,80	0,78	0,65	-

Considerando a comparação do tempo de arranque com o tempo médio de funcionamento, é possível concluir que a componente do consumo de energia, associado ao arranque dos grupos, é de aproximadamente 30% do consumo total. Este valor é elevado e resulta do facto do caudal de bombagem ser superior ao recomendado para o volume útil do poço de bombagem, implicando um número elevado de arranques por hora e um tempo de funcionamento total reduzido.

#### 4.3.2. Análise do ponto de funcionamento

A determinação das condições de funcionamento para cada grupo electrobomba pressupõe a análise em simultâneo das seguintes variáveis, em função do nível do poço de bombagem: altura manométrica, caudal e potência absorvida. Apresentam-se, nas Figuras 7 a 9, os resultados das medições efectuadas individualmente para os três grupos electrobomba (GE). É importante referir que o registo da variação da altura manométrica e da potência foram determinados em operação manual do sistema, em contraste com os registos do caudal que estão associados ao funcionamento automático do sistema (determinado pelos níveis de arranque estabelecidos).

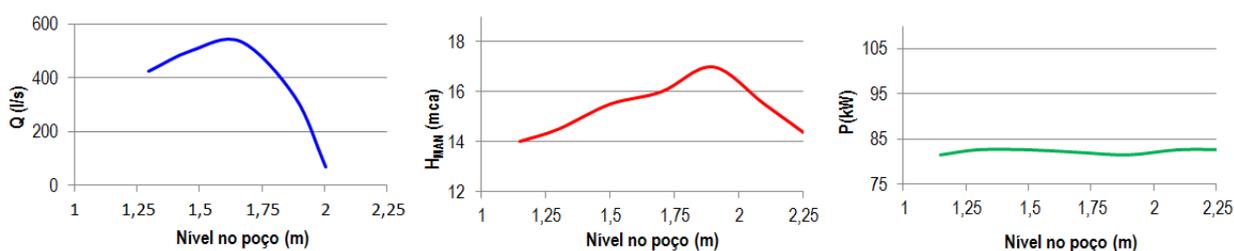


Figura 7 – Variação do caudal bombeado, da altura manométrica e da potência em função do nível no poço (GE1)

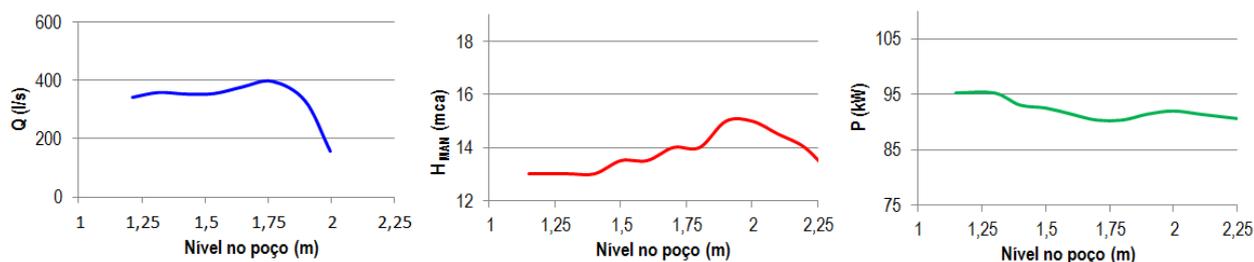


Figura 8 – Variação do caudal bombeado, da altura manométrica e da potência em função do nível no poço (GE2)

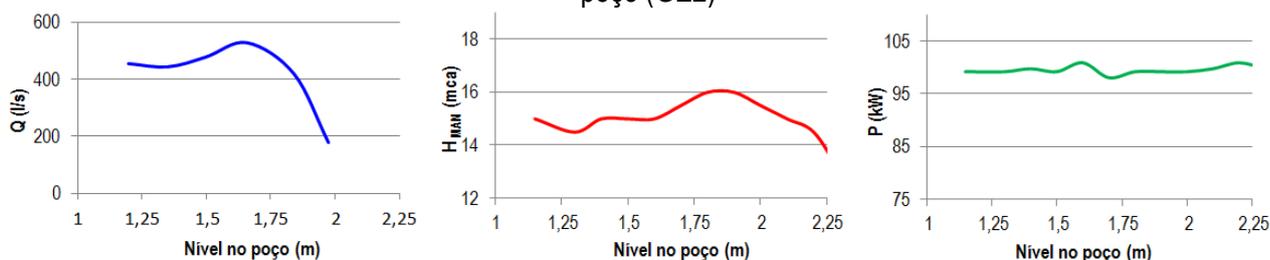


Figura 9 – Variação do caudal bombeado, da altura manométrica e da potência em função do nível no poço (GE3)

Os ensaios realizados permitiram aferir o comportamento dos grupos electrobomba e determinar o rendimento dos grupos electrobomba para um determinado ponto da gama de funcionamento do sistema (Tabela 4). Assim, considerando os valores para o nível de 1.75 m verifica-se que os grupos n<sup>o</sup>1 e n<sup>o</sup>3 apresentam, ambos, um rendimento de, aproximadamente, 78%. Contudo, o grupo electrobomba n<sup>o</sup>2 apresenta uma diminuição de rendimento, face aos outros dois, de aproximadamente 25%.

Tabela 4 – Aferição dos pontos de funcionamento dos grupos electrobomba do sistema

	GE N <sup>o</sup> 1	GE N <sup>o</sup> 2	GE N <sup>o</sup> 3
Pot. (kW)	84	90	97
H <sub>MAN</sub> (mca)	16.0	14.0	15.5
Q (l/s)	420	400	475
η (%)	78%	61%	78%

A diminuição de rendimento do grupo electrobomba n<sup>o</sup>2 deverá estar associada a uma degradação excessiva do impulsor, tendo em atenção que se regista uma redução simultânea, face aos outros grupos, dos valores de caudal bombeado e das alturas manométricas correspondentes.

#### 4.4. Optimização do comportamento hidráulico e mecânico do sistema

Para avaliação da optimização energética foi considerada, como solução de base, a opção de instalação de variadores de velocidade (ponto 4.4.1). Não obstante, face à verificação de um número exagerado de arranques na situação actual, foram ainda consideradas as opções de alteração dos níveis de arranque para, em complemento com os variadores de velocidade, permitir uma maior poupança de energia (ponto 4.4.2), bem como a opção alternativa de instalação de uma bomba de menor capacidade para, também dessa forma, reduzir o número de arranques dos grupos actualmente instalados (ponto 4.4.3).

##### 4.4.1. Variadores de velocidade

Atendendo aos princípios base enunciados nos pontos anteriores do presente trabalho, a instalação de variadores de velocidade nos diferentes grupos do sistema, possibilita, até determinado ponto, a

diminuição das perdas de carga contínuas associadas ao ponto de funcionamento, reduzindo a potência de bombagem. Na Figura 10 é efectuada uma representação dos diferentes pontos de funcionamento, passíveis de serem obtidos com a instalação de variadores de velocidade, por variação da frequência de rotação do grupo electrobomba.

É importante referir que esta solução não altera a capacidade máxima do sistema porque a automação do sistema pode facilmente prever um nível no poço a partir do qual os variadores sejam desactivados.

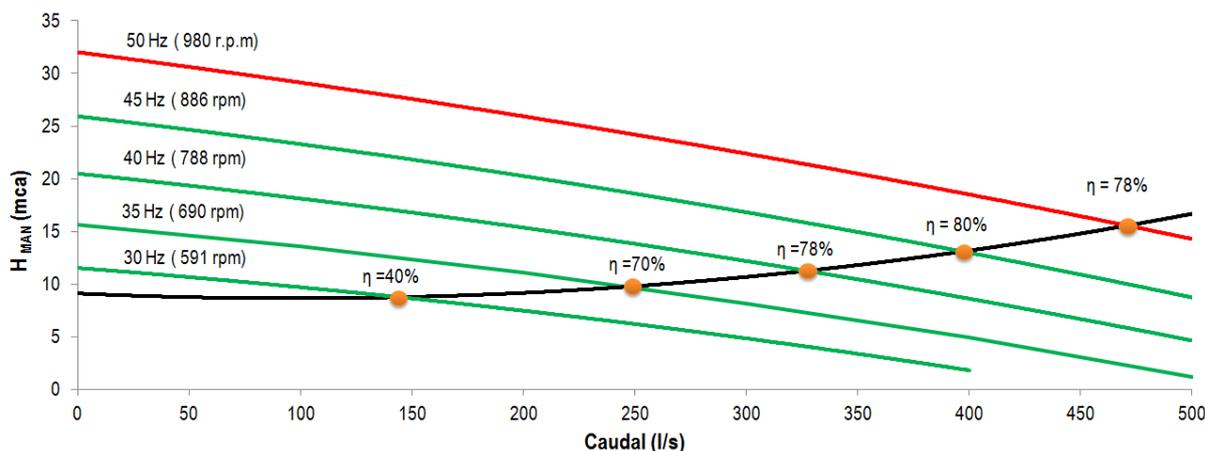


Figura 10 – Variação do ponto de funcionamento do sistema em função da frequência de rotação do grupo electrobomba (GE nº3).

Tal como devidamente salientado no ponto 2, a análise energética desta solução deverá, então, basear-se na análise da variação de energia específica associada a cada ponto de funcionamento, uma vez que este indicador agrega o efeito da redução das perdas de carga contínuas e a alteração do rendimento do equipamento (Figura 11). Assim, é possível observar-se uma redução do custo de energia até à frequência de 40Hz (788 rpm), associada a uma redução do caudal bombeado, mantendo o sistema numa gama de rendimentos próxima da verificada para a situação actual. Não obstante, refira-se que, abaixo dessa frequência, a diminuição do rendimento do equipamento vai ultrapassar, progressivamente, o efeito da redução do caudal e os variadores deixam de representar uma vantagem.

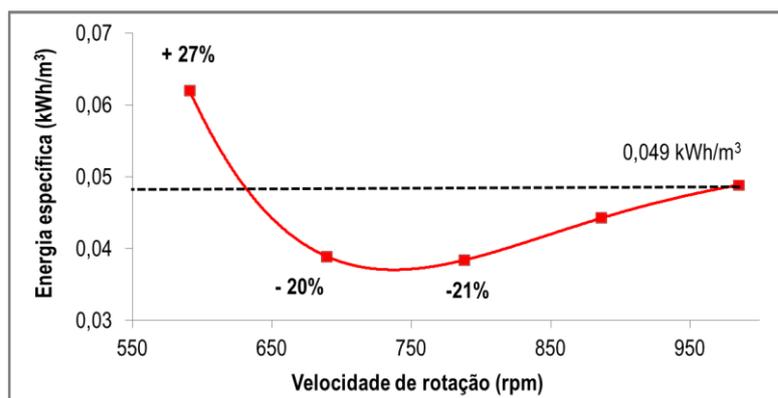


Figura 11 – Variação da energia específica em função da velocidade de rotação do grupo

Por outro lado, considerando, a solução de instalação de variadores de velocidade, reduzindo a velocidade de rotação até 788 rpm, verifica-se um natural aumento do parâmetro EER (definido no ponto 3), de 57% para os 76%. Relativamente ao custo diário de energia, verifica-se que a redução deste parâmetro é proporcionalmente semelhante à variação da energia específica.

Porém, refira-se que estes equipamentos não permitem uma redução significativa do número de arranques do sistema, uma vez que o caudal bombeado para 788rpm corresponde a cerca de 330 l/s,

nem da correspondente parcela do consumo de energia associada ao tempo de arranque dos grupos electrobomba. Assim, a redução do consumo de energia diário, referente a essa solução, será inferior à redução da energia específica e corresponderá a, aproximadamente, 15%, já que a componente de consumos associada ao tempo de arranque dos grupos poderá considerar-se praticamente idêntica.

Desta forma, como um dos grupos electrobomba já possui um dispositivo variador de velocidade instalado, e considerando os valores de redução obtidos, poderá prever-se que, caso fosse necessário instalar apenas dois variadores, com um custo unitário de 4200€, o período de retorno do investimento seria inferior a 21 meses (ou de 31 meses caso fosse necessário instalar variadores nos três grupos).

#### 4.4.2. Alteração dos níveis de bombagem

A alteração dos níveis de arranque e de paragem dos grupos electrobomba levará a um aumento do volume útil do poço e a uma redução do número de arranques. Assim, na solução hipotética de subir o nível de arranque em 0.80 m, aumentando o volume útil do poço para o dobro da capacidade, é possível reduzir o número de arranques para uma média de 4/ hora e o consumo de energia em cerca de 15%.

A implementação conjunta da alteração dos níveis de bombagem e da redução da rotação dos grupos, através da instalação de variadores de velocidade, apresenta um efeito cumulativo, podendo apresentar uma redução do consumo energético em, aproximadamente, 30%, e, conseqüentemente, reduzindo o período de amortização do investimento nos variadores para cerca de metade.

#### 4.4.3. Instalação de uma bomba de menor capacidade

A instalação de um grupo electrobomba de menor capacidade apresenta duas vantagens expressivas quanto à optimização energética do sistema em análise. A primeira prende-se com a redução significativa do número de arranques dos grupos de maior potência, ganhando importância redobrada face ao consumo de energia e tempo de arranque. A segunda resulta da redução da componente de perdas de carga contínuas, com a alteração do ponto de funcionamento, potenciando a natural redução da energia específica do sistema. Obviamente que as vantagens anteriormente enunciadas implicam a selecção de um equipamento com um rendimento total similar ao dos grupos actualmente instalados.

Assim, tendo em atenção a curva dos caudais classificados (Figura 12), o equipamento a instalar deve funcionar na gama de 100 l/s a 125 l/s. A opção recaiu no valor máximo, 125 l/s, tendo em atenção a importância de reduzir significativamente o número de arranques dos equipamentos actuais.

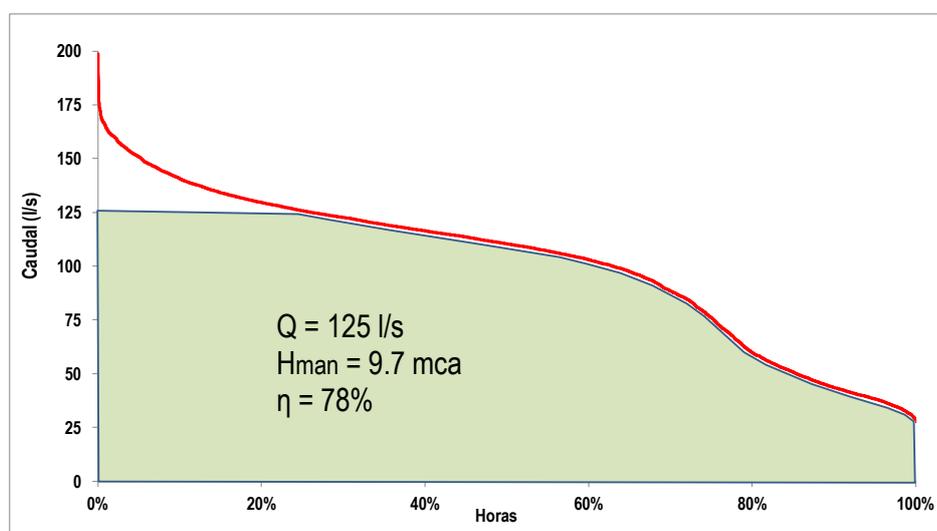


Figura 12 – Gama de utilização do grupo electrobomba de pequena capacidade

A instalação deste equipamento possibilitaria dispensar a utilização dos grupos electrobomba actuais em, aproximadamente, 75% do período em análise. Contudo, é importante referir que, mesmo em situação de afluência de um caudal superior a 125l/s, este equipamento pode continuar em funcionamento até ser atingido um determinado nível no poço que accione os grupos de capacidade superior. Neste modo de operação esta opção pode ser responsável por, aproximadamente, 95% do volume bombeado na estação elevatória de Espírito Santo.

Com esta solução é possível obter uma redução, nos períodos de funcionamento, do valor de energia específica de 0.049 kWh/m<sup>3</sup> para 0.033 kWh/m<sup>3</sup>, ou seja uma redução de 32%. Assim, considerando o período em que o sistema está em funcionamento e a diminuição muito acentuada dos arranques dos grupos de maior capacidade, o valor de redução do consumo acaba por ser de cerca de 42%. Esta solução apresenta como ponto forte uma maior adaptação do caudal bombeado ao caudal afluente, visível na subida do parâmetro EER dos actuais 57% para praticamente 95%.

A implementação desta solução implica a aquisição de um novo grupo electrobomba, bem como empreender as necessárias alterações no equipamento electromecânico da câmara de manobras e ao nível do quadro de comando. No entanto, considerando a aquisição de um grupo electrobomba com as características desejadas, com um custo de cerca de 4.700€, representa um investimento total estimado de 9.250€. Assim, esta solução apresentaria um período de retorno de 8 meses, sendo independente da possibilidade de optimização dos níveis de arranque e paragem dos grupos de maior dimensão.

## **5. ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES**

A avaliação da Estação de Espírito Santo permitiu verificar que esta apresenta uma resposta eficiente na bombagem de caudais afluentes de valor elevado, mas não surge adequada à variação do caudal afluente. Este facto leva a um custo energético significativo, tanto mais que o sistema apresenta uma capacidade de bombagem mínima de aproximadamente 450 l/s quando, em aproximadamente 75% do tempo, os caudais afluentes são inferiores a 125 l/s.

A avaliação do funcionamento actual do sistema elevatório apontou, assim, três pontos principais:

- O tempo de arranque dos grupos, independentemente de associados ao variador de velocidade ou a arrancadores suaves, é elevado devendo ser avaliada a possibilidade de promover a sua redução;
- O grupo N°2 apresenta um rendimento inferior ao espectável devendo ser monitorizado
- Os grupos N°1 e N°3 apresentam um rendimento dentro dos valores fornecidos pelo fabricante.

No que toca às soluções de optimização consideradas verifica-se que, exclusivamente do ponto de vista da eficiência energética representam vantagens económicas significativas, sendo a instalação de uma bomba de pequena capacidade a que apresenta maiores vantagens ao nível da adaptação do sistema ao caudal afluente e à diminuição significativa do número de arranques dos grupos actuais. No caso dos variadores de velocidade verifica-se que a sua aplicação é limitada, apresentando vantagens apenas para uma ligeira redução de caudal. Todavia, a redução dos custos de energia será mais significativa se associada a uma alteração dos níveis de arranque dos grupos.

Não obstante, como a implementação das soluções deve equacionar, também, as dificuldades associadas à sua implementação e ao risco para a operação do sistema, a opção pelos variadores de velocidade poderá ser mais adequada.

O estudo efectuado permite, assim, concluir que os variadores de velocidade possibilitam uma redução das perdas de carga do sistema e dos custos de energia do mesmo. Contudo, a sua utilização deverá ser criteriosa tendo em atenção a inevitável redução de rendimento dos equipamentos. É importante referir que, no sistema em análise, em que o desnível geométrico é significativo, a redução de 20% da velocidade de rotação beneficiou da curva de rendimento do equipamento, o que não poderá ser considerado como uma situação genérica. Um segundo ponto a destacar, será a verificação das

condições hidráulicas exigíveis (velocidade de sedimentação e NPSH), que poderão condicionar a aplicação destes equipamentos em situações de redução significativa de rotação dos equipamentos.

Em resumo, conclui-se que a aplicação de variadores de velocidade não deverá ser considerada como uma solução genérica de optimização energética, devendo ser sujeita, previamente, a uma análise técnica detalhada. Essa análise deverá incluir, por um lado, a caracterização do funcionamento actual do sistema (destacando a avaliação das necessidades de bombagem - caudais afluentes) e, por outro, a necessária comparação com outras soluções de optimização energética, permitindo seleccionar a opção de maior benefício na relação custo/ eficiência.

## **BIBLIOGRAFIA**

CEATI (2009), *Variable Frequency Drives - Energy Efficiency Reference Guide*, Natural Resources Canada, CEATI International, disponível online em <http://oee.nrcan.gc.ca/industrial/equipment/vfd-ref/pdf/variable-frequency-drives-eng.pdf>

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.

ERSAR (2011), *Relatório Anual do Sector das Águas e Resíduos em Portugal (RASARP) 2010 – Volume 03 – Avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores*, Entidade Reguladora de Sistemas de Águas e Resíduos, I.P., ISSN 1647-9238.

ERSAR, LNEC (2009a), *Guia de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores – 2ª Geração do sistema de avaliação (versão preliminar)*, Instituto Regulador de Águas e Resíduos (actual Entidade Reguladora de Sistemas de Águas e Resíduos) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Dezembro de 2009.

EUROPUMP & HI (2004), *Variable Speed Pumping – A guide to successful applications*, EUROPUMP, Hydraulic Institute, Elsevier, ISBN 1-85617-449-2.

EUROSTAT (2009), *Panorama of Energy - Energy statistics to support EU policies and solutions*, EUROSTAT statistical books, European Commission, ISBN 978-92-79-11151-8

HI, PSM (2008), *Optimizing Pumping Systems – A guide for Improved Energy Efficiency, Reliability and Profitability*, Hydraulic Institute, Pump Systems Matter, 1ª edição, EUA, 2008

IRAR (2009), *Desafios para os serviços de águas em Portugal numa perspectiva de médio e longo prazo*, Publicação do Instituto Regulador de Águas e Resíduos (actual Entidade Reguladora de Sistemas de Águas e Resíduos), Agosto de 2009.

IRAR, LNEC (2004), *Guia técnico 2: Indicadores de desempenho para serviços de Águas Residuais*, Instituto Regulador da Água e Resíduos (actual Entidade Reguladora de Sistemas de Águas e Resíduos, I.P.) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004.

Leite, P., Vivas, E., Monteiro, P., Tentúgal Valente, L, (2010a), *Optimização energética no dimensionamento de estações elevatórias de águas residuais*, em actas da conferência 10º Congresso da Água – “Marcas d'Água”, APRH, Algarve, 21 a 24 de Março de 2010.

Leite, P., Vivas, E., Monteiro, P., Tentúgal Valente, L, (2010b), *Planos de optimização energética de estações elevatórias de águas residuais*, em actas da conferência 14º ENaSB-SILUBESA, APESB, Porto, 26 a 29 de Outubro de 2010.