

# OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS ELEVATÓRIOS DE ÁGUAS RESIDUAIS

Pedro LEITE

*Eng. Civil, Smartive, Lda, Rua António Arroio 46, 4150-071, Porto, [pedro.leite@smartive.net](mailto:pedro.leite@smartive.net)*

Eduardo VIVAS

*Eng. Civil, Smartive, Lda, Rua António Arroio 46, 4150-071, Porto, [eduardo.vivas@smartive.net](mailto:eduardo.vivas@smartive.net)*

Paulo MONTEIRO

*Professor Auxiliar FEUP, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200 – 465, Porto, [psm@fe.up.pt](mailto:psm@fe.up.pt)*

Luís TENTÚGAL VALENTE

*Eng. Civil, Noraqua, Lda, Rua de Monte Cativo 313, 4050 – 402, Porto, [luisvalente@noraqua.pt](mailto:luisvalente@noraqua.pt)*

## RESUMO

Em sistemas elevatórios de águas residuais, caracterizados por variação relevante do caudal afluente, o consumo de energia dependerá da capacidade de adaptação do sistema às necessidades de bombagem.

No paradigma actual, a base de dimensionamento é focada no investimento inicial e na capacidade máxima de bombagem do sistema, desprezando o comportamento diário do sistema e os encargos energéticos. Assim, um dimensionamento focado na optimização energética, promovendo a simulação do comportamento diário do sistema e comparação de alternativas segundo os custos totais do ciclo de vida, resultará numa optimização das soluções e consequente diminuição dos custos energéticos.

Para análise do comportamento energético destes sistemas é apresentada uma metodologia de avaliação e dimensionamento global, assente numa ferramenta informática, abrangente e flexível, que permite a simulação do sistema, face a diversos cenários de caudais afluentes e de configuração do mesmo. Várias opções podem ser consideradas, tais como o escalonamento da capacidade de bombeamento, por recurso a vários conjuntos de grupos electrobomba, para resposta mais eficaz a variações significativas de caudal afluente, ou a instalação de grupos de pequena capacidade para bombeamento em períodos de afluência reduzida. Estas soluções poderão levar a reduções significativas de perdas de carga e à optimização global dos pontos de funcionamento.

No presente trabalho demonstra-se como essa optimização pode conduzir a reduções significativas dos custos de energia no ciclo de vida dos sistemas (cerca de 30%), com consequente diminuição das emissões de gases de efeitos de estufa associadas e com baixos custos de investimento inicial.

**Palavras chave:** Eficiência energética, metodologia de avaliação, custos de ciclo de vida

## 1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética de um sistema elevatório de caudal afluyente aproximadamente constante irá depender, principalmente, da escolha adequada do grupo electrobomba e a consequente optimização do ponto de funcionamento do sistema. Porém, em situações em que se verifica uma variação relevante desse caudal afluyente, como é o caso dos sistemas de drenagem de águas residuais, a eficiência energética dependerá, sobretudo, da capacidade de adaptação do sistema às necessidades de bombeamento. De facto, a elevação de um caudal acima do necessário implica, directamente, um maior consumo energético por acarretar um aumento das perdas de carga ao longo da conduta elevatória e um afastamento do ponto de funcionamento óptimo, com consequências claras ao nível dos custos de energia e da própria manutenção dos grupos elevatórios (HI&PSM, 2008).

Devido à sua ampla utilização, mas também às funções fundamentais que asseguram, aos sistemas elevatórios são globalmente atribuídas cerca de 20% de todas as necessidades energéticas a nível mundial (DOE *et al*, 2001). Não obstante, analisando o ciclo de vida destes sistemas, os custos do consumo de energia são mesmo os mais significativos, podendo, nos sistemas de maior dimensão integrados em redes públicas de água ou saneamento, atingir valores na ordem dos 80 a 90% do custo total (DOE *et al*, 2001).

A eficiência energética neste domínio acaba por ser uma questão essencial em termos de sustentabilidade económica, devido à tendência crescente dos custos de energia no seio da União Europeia e também em Portugal (EUROSTAT, 2009), mas também na sustentabilidade dos recursos naturais, dada a necessidade de redução dos impactos dos serviços de águas no ambiente, em especial através da minimização de utilização de recursos energéticos (IRAR, 2009), com reflexos nas emissões de gases de efeito de estufa, resultantes da produção de energia.

Nesse sentido, no presente trabalho será destacada a importância que esta temática representa para as entidades gestoras do sector, descrevendo os principais indicadores de sustentabilidade e respectivos resultados, segundo os quais as empresas são já avaliadas (ERSAR, 2009), bem como a componente de custos envolvidos no ciclo de vida destes sistemas (HI & PSM, 2008).

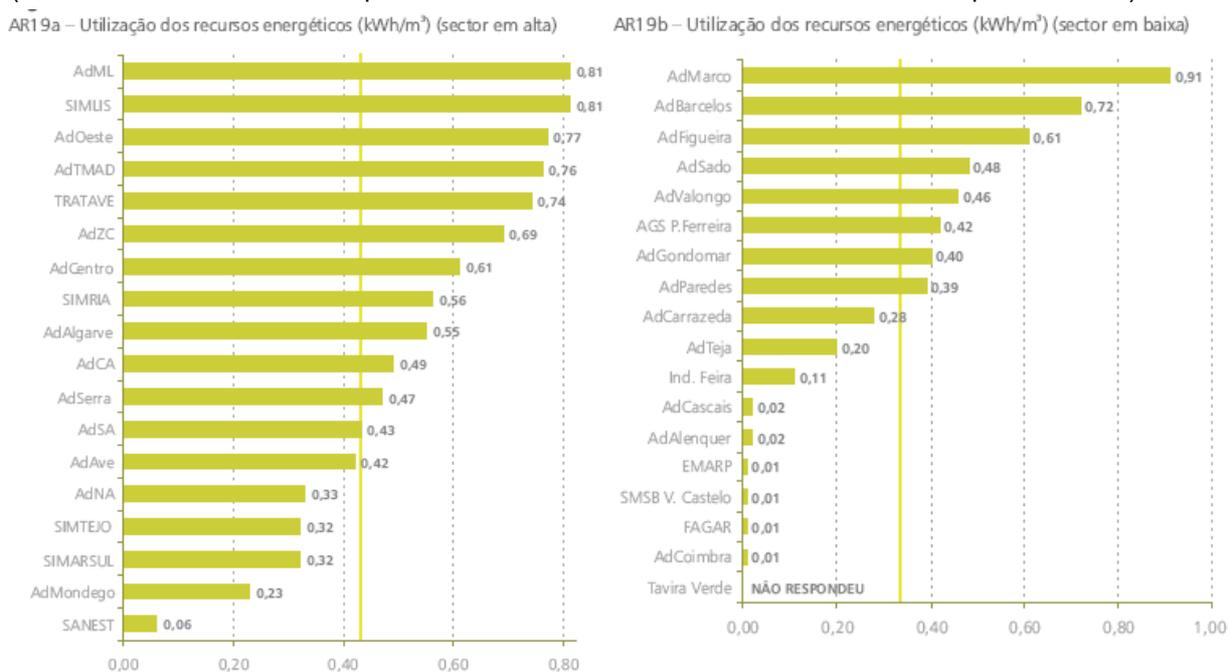
Por fim, será apresentada uma metodologia de avaliação para a optimização energética de um sistema elevatório de águas residuais que irá, fundamentalmente, assentar na utilização de uma ferramenta de simulação. Esta será também a base de avaliação aplicada a dois casos de estudo, para os quais serão quantificados os níveis de redução nos consumos de energia e consequente reflexo na avaliação económica desses sistemas. Nas principais conclusões, serão, ainda, destacadas as características dos sistemas onde a metodologia apresentada poderá ter melhores resultados.

## 2. AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DAS ENTIDADES GESTORAS

As atribuições da actual Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR, I.P.), segundo o disposto no Artº 5 do Decreto-Lei nº 277/2009 de 2 de Outubro, são reforçadas, face ao anterior Instituto Regulador de Águas e Resíduos (Decreto-Lei n.º 362/98, de 18 de Novembro, actualmente revogado), no que toca à regulação económica das entidades gestoras desses serviços, bem como na regulação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores. Essa regulação incide, então, sobre a prática de preços que permitam assegurar a viabilidade económica e financeira dessas entidades, num ambiente de eficiência e eficácia na prestação do serviço e ainda sobre uma avaliação do desempenho das mesmas, promovendo a melhoria dos níveis de serviço. De facto, as entidades gestoras são avaliadas, desde 2005, segundo um conjunto de indicadores (IRAR&LNEC, 2004; IRAR&LNEC, 2004a; IRAR&LNEC, 2009) que dá origem a um relatório anual de avaliação do sector de

serviços de águas e resíduos em Portugal, o RASARP, cuja versão mais actual se refere a dados de 2008 (ERSAR, 2009).

Nesse sentido, os sistemas elevatórios de águas residuais irão ter influência nas componentes de avaliação (segundo IRAR&LNEC, 2009): de sustentabilidade económico-financeira da entidade gestora (custos operacionais [€/m<sup>3</sup> de água facturada]), de sustentabilidade infraestrutural (% de utilização de bombeamento das águas residuais na rede de drenagem), de sustentabilidade operacional (falhas em grupos electrobomba [horas/(grupo electrobomba . ano)]), e de sustentabilidade ambiental (utilização de recursos energéticos [kWh/m<sup>3</sup> de água facturada]). Em especial em relação a este último caso, a optimização energética dos sistemas elevatórios de águas residuais poderá proporcionar uma melhoria dos resultados das diferentes entidades gestoras que, tal como se pode comprovar na Figura 1, no ano de 2008 (ERSAR, 2009), ainda se encontravam, de forma significativa, acima dos valores de referência (0,43 kWh/m<sup>3</sup> e 0,33 kWh/m<sup>3</sup> para as entidades do sector em alta e em baixa, respectivamente).



**Figura 1 – Resultados do indicador de utilização de recursos energéticos (kWh/m<sup>3</sup>), para as entidades em alta e em baixa, no sector de drenagem e tratamento de águas residuais (ERSAR, 2009)**

Importa realçar, todavia, que a avaliação das entidades gestoras tenderá a reforçar a importância dos consumos de energia dos sistemas elevatórios de águas residuais, uma vez que, na proposta de segunda geração do sistema de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores (ERSAR&LNEC, 2009), o indicador de utilização de recursos ambientais deverá passar a avaliar, directamente, a eficiência energética das instalações elevatórias (kWh/(m<sup>3</sup> .100m)).

### 3. AVALIAÇÃO ECONÓMICA DE UM SISTEMA ELEVATÓRIO

#### 3.1 Custos totais do ciclo de vida

A avaliação dos custos do ciclo de vida (ou *Life Cycle Costs* – LCC) permite identificar, na fase de investimento e de construção de novos sistemas, qual, das várias soluções para um determinado

sistema, poderá ser a mais eficiente do ponto de vista económico, dentro das limitações óbvias da informação disponível em fase de projecto (DOE *et al*, 2001).

Uma vez que uma estação elevatória de águas residuais tem normalmente um período de vida útil situado entre os 15 e os 20 anos, verifica-se que alguns dos custos envolvidos neste sistemas terão lugar de forma faseada no tempo, decorrentes da própria operação do sistema. Por esse motivo, o custo do ciclo de vida (LCC) de um sistema elevatório de águas residuais deverá resultar de um somatório dos principais custos devidos a estes sistemas, no seu período de vida útil, tal como apresentado em (1), devendo ser devidamente actualizados ao momento presente, de forma a poder avaliar as diferentes soluções na mesma base temporal (adaptado de HI&PSM, 2008):

$$\text{LCC} = \text{C}_{\text{aq}} + \text{C}_{\text{in}} + \text{C}_{\text{e}} + \text{C}_{\text{m}} + \text{C}_{\text{o}} \quad (1)$$

Sendo:

$\text{C}_{\text{aq}}$  = custos de aquisição (equipamentos mecânicos, tubagens, etc.)

$\text{C}_{\text{in}}$  = custos de instalação e de comissionamento (incluindo a construção de instalações)

$\text{C}_{\text{e}}$  = custos de energia (de acordo com a operação expectável do sistema)

$\text{C}_{\text{m}}$  = custos de manutenção e de reparação (intervenções previsíveis)

$\text{C}_{\text{o}}$  = Outros custos (recursos humanos, ambientais, de remoção, etc.)

Em termos relativos verifica-se, contudo, que os custos mais significativos no ciclo de vida de um sistema deste género correspondem aos custos de energia, representando, em termos médios, valores na ordem dos 40 % dos custos totais (Figura 2) (DOE *et al*, 2001). Além disso, tal como destacado em (ABELIN *et al*, 2006), em termos gerais, o custo de aquisição de um sistema deste género variará proporcionalmente ao quadrado do diâmetro do impulsor, enquanto os custos de energia serão proporcionais à quinta potência desse mesmo diâmetro, destacando a importância da eficiência energética, em especial em sistemas de caudais mais elevados.

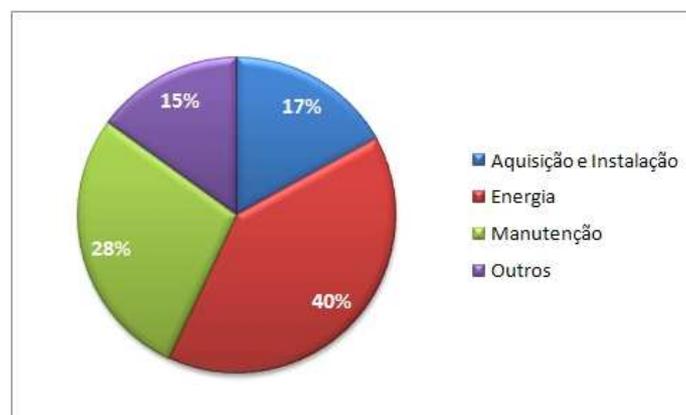


Figura 2 – Ordem de grandeza para os principais custos no ciclo de vida de um sistema elevatório (DOE *et al*, 2001)

De forma geral, poderá considerar-se que, para os mesmos requisitos de projecto, a optimização energética no dimensionamento de sistemas elevatórios irá influenciar directamente os custos de energia, bem como os custos de aquisição e instalação destes sistemas, dependendo da solução de optimização considerada. Os custos de manutenção, embora possam, teoricamente, ser consideravelmente reduzidos com a optimização de funcionamento dos grupos electrobomba (HI

&PSM, 2008), não constituem um benefício directamente mensurável e variará de caso para caso. Por essa razão a estimativa deste tipo de custos deverá ser obtida junto do fabricante dos equipamentos em causa ou, no limite, considerado fixo na avaliação das diferentes alternativas (ABELIN *et al*, 2006).

### 3.2 Sistemas elevatórios enquanto activos da empresa

Por outro lado, tradicionalmente, a avaliação económica efectuada no dimensionamento deste tipo de sistemas foca, essencialmente, o investimento inicial, procurando minimizar esse valor, desde que assegurada a capacidade do sistema, face aos requisitos do projecto. Como os custos na sua operação diária são bastante significativos e variam com as condições reais de funcionamento (HI&PSM, 2008), existe também uma oportunidade de optimização energética dos sistemas existentes.

Nesse contexto e atendendo à actual estrutura empresarial do sector, o objectivo primordial deverá ser o de garantir uma elevada rentabilidade (a curto e longo prazo) dos investimentos efectuados, através de uma maximização da eficiência de todos os equipamentos em funcionamento (enquanto activos da empresa). Para tal, a abordagem a seguir deverá ser a de avaliação do investimento para a intervenção de optimização, considerando que a eficiência passível de ser obtida (redução do consumo de energia e consequentemente dos custos associados) corresponde ao retorno do mesmo (HI&PSM, 2008). Uma vez que esses ganhos serão conseguidos de forma distribuída no tempo, a forma ideal de serem avaliados será através de métodos que atendam aos *cash flows* (diferença entre os fluxos de entrada e de saída de capital) gerados durante todo o período de vida útil do investimento. Nesse sentido, no presente trabalho, irá considerar-se o Índice de Rentabilidade (IRP), que permite avaliar o grau de rentabilidade do projecto em causa, por cada euro de capital investido, correspondendo a (2) (Gomes Mota & Custódio, 2006):

$$IRP = \frac{\left(-I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}\right)}{I_0} \quad (2)$$

Sendo:

$I_0$  – Investimento inicial (ano 0)

$n$  – Período de vida útil do sistema/ investimento

$CF_t$  – *Cash flow* do ano  $t$

$r$  – taxa de actualização

## 4. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

Uma vez que os custos de energia serão tanto mais reduzidos quanto mais próximo estiver o ponto de funcionamento do sistema, da eficiência máxima da bomba e menores forem as perdas de carga verificadas ao longo do ciclo de vida do mesmo (DOE & HI, 2006), a avaliação e optimização energética de um sistema elevatório de águas residuais deverá assentar na seguinte metodologia:

- Análise das condições de funcionamento do sistema (e da sua variação no tempo);
- Identificação de possíveis soluções de optimização;
- Avaliação da melhor solução técnica e económica (incluindo a simulação do funcionamento do sistema e avaliação dos principais custos do ciclo de vida destes sistemas).

#### 4.1 Análise das condições de funcionamento do sistema

Uma das principais causas de não eficiência de um sistema elevatório de águas residuais resulta da verificação de perdas de carga excessivas, pelo que deverá conjugar-se, tanto quanto possível, o funcionamento do sistema com as reais necessidades do mesmo.

No caso da avaliação de sistemas existentes, é necessário verificar as condições de funcionamento actuais, o que poderá ser conseguido através da recolha e compilação de informação de caudais afluentes ao longo de períodos significativos de tempo, segundo os diversos padrões do ciclo de funcionamento do sistema (seja ao nível diário ou em diferentes períodos do ano). No caso do dimensionamento de novos sistemas deverá ser considerada, preferencialmente, a avaliação de dados reais representativos, seja da rede de drenagem onde o sistema vai ser instalado, ou até mesmo de estações elevatórias próximas da área a ser servida. Porém, caso se verifique que tal não é possível, deverá ser definida uma aproximação segundo um esquema teórico da variação de caudais ao longo do dia, de acordo com as características da população servida e das utilizações das redes de abastecimento. De facto, essa variação é já amplamente destacada como um ponto fundamental de avaliação em sistemas de abastecimento de água, nomeadamente no dimensionamento de reservatórios para redes de distribuição, tal como apontado em (TENTÚGAL VALENTE, 1983).

Com este objectivo, deverá passar-se de uma análise estática no tempo, em que o dimensionamento de todo o sistema é assegurado unicamente pela capacidade de elevação do caudal máximo diário, para uma análise, que se poderá considerar dinâmica, onde se procura conceber o sistema elevatório de modo a assegurar uma capacidade de bombeamento variável e, onde além do valor máximo, é também considerado o diagrama de variação dos caudais afluentes ao sistema.

#### 4.2 Identificação de possíveis soluções de optimização energética

Existem diversas soluções que podem ser consideradas para aumentar a relação custo/benefício do sistema na sua globalidade. No presente trabalho serão frisadas as seguintes opções:

- Escalonamento de bombas em paralelo
- Bombas de pequena capacidade ou *Pony Pumps*
- Redução do diâmetro do impulsor
- Instalação de variadores de velocidade ou *Variable Frequency Drives* (VFD)

Embora algumas soluções sejam especialmente orientadas para a optimização de sistemas elevatórios já em funcionamento, a escolha da solução dependerá, fundamentalmente, da situação em causa.

##### 4.2.1 Escalonamento de bombas em paralelo

Esta abordagem parte do pressuposto básico de combinação de vários grupos electrobomba de funcionamento em paralelo, em alternativa à instalação de apenas um grupo electrobomba.

Com este tipo de sistema será possível obter uma maior flexibilidade de operação, permitindo uma optimização da relação entre os caudais afluentes e os caudais bombeados. Tal acaba por ser uma consequência imediata da concepção do sistema com múltiplos pontos de funcionamento, tornando-se mais fácil assegurar um funcionamento mais próximo do ponto de maior eficiência de cada grupo electrobomba. Além disso, do ponto de vista da optimização energética, este facto acarreta uma redução da discrepância entre o caudal de entrada e o de saída, com uma imediata e bastante significativa redução da perda de carga do sistema (DOE & HI, 2006; HI & PSM, 2008).

A diminuição do número de arranques e de paragens do sistema elevatório também não deve ser menosprezada, principalmente em sistemas com relação elevada entre a altura manométrica e altura geométrica, o que poderá ter influência tanto na fiabilidade do grupo electrobomba, como nos próprios consumos de energia, tendencialmente mais elevados nos primeiros momentos de arranque.

#### 4.2.2 Bombas de pequena capacidade (Pony Pumps)

A instalação de grupos electrobomba de pequena capacidade, poderá ser equacionada para o bombeamento de valores mais baixos de caudais afluentes que, normalmente, representam um período de tempo considerável ao longo do dia. Com este tipo de solução é possível conseguir uma redução bastante significativa das perdas de carga no sistema, bem como o número de arranques e paragens do grupo electrobomba de maior capacidade (DOE & HI, 2006; HI & PSM, 2008).

Esta solução é especialmente apropriada à optimização do funcionamento de sistemas já existentes, em especial daqueles que apresentam alguns sinais de funcionamento ineficiente, tais como operação intermitente dos grupos electrobomba e ruído excessivo, cavitação e vibração nas tubagens (que desaparecem quando o sistema funciona na capacidade máxima).

#### 4.2.3 Redução do diâmetro do impulsor

O processo de redução do diâmetro do impulsor tem como objectivo uma redução da energia fornecida ao fluido pelo grupo electrobomba, sem implicar uma alteração das características e comportamento do motor eléctrico, podendo ser particularmente interessante na reformulação de sistemas já existentes.

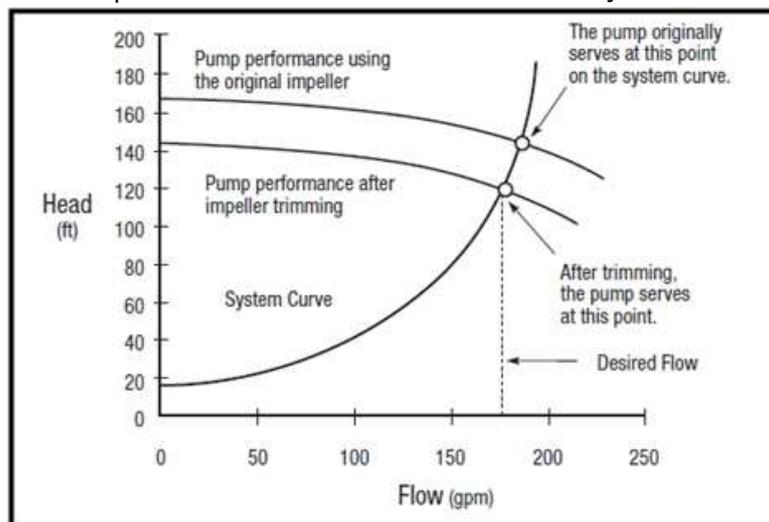


Figura 3 - Efeito de redução do diâmetro do impulsor no ponto de funcionamento (DOE & HI, 2006)

O processo de optimização do impulsor corresponde a uma translacção na curva pressão/caudal representativa do funcionamento do grupo electrobomba, tal como demonstrado na Figura 3, conseguindo-se a redução das perdas de carga, bem como um funcionamento mais próximo das necessidades do sistema, em termos de caudais bombeados (DOE & HI, 2006).

#### 4.2.4 Instalação de variadores de velocidade (VFD)

Um grupo electrobomba apresenta uma relação entre a variação da velocidade do impulsor e a pressão diferencial desenvolvida pelo sistema (grupo + impulsor). Nesse sentido, a velocidade radial será

directamente proporcional à rotação do eixo, para um diâmetro fixo. Uma variação da velocidade de rotação da bomba apresentará um efeito directo na curva de funcionamento do grupo electrobomba.

Este sistema apresenta um funcionamento próximo do ideal em sistemas dominados pelas perdas de carga, permitindo a alteração do ponto de funcionamento, mantendo uma elevada eficiência mecânica, justificada pela deslocação ao longo da curva da instalação na direcção das curvas de iso-eficiência (Figura 4). Para além de facilitar a adaptação do caudal bombeado às necessidades do sistema, reduz, ainda, as perdas de carga totais (DOE *et al*, 2004; HI & PSM, 2008)

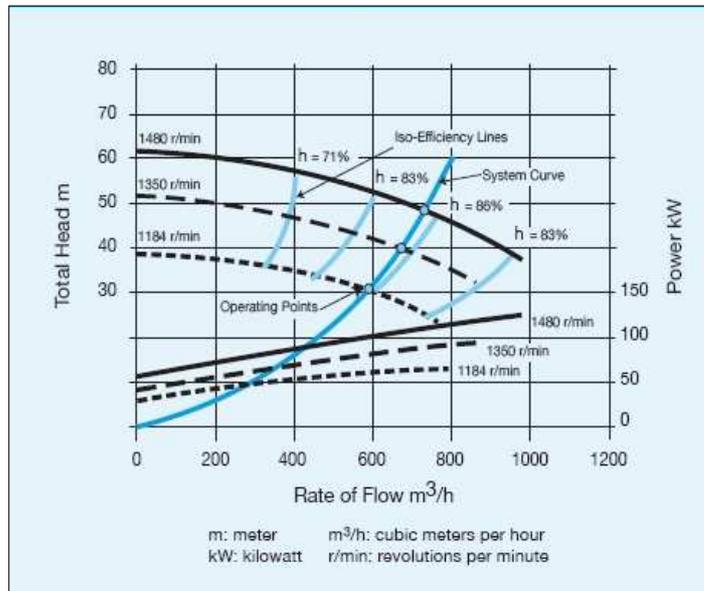


Figura 4- Variação do ponto de funcionamento de um sistema elevatório segundo as curvas de iso-eficiência de um grupo electrobomba com variador de velocidade (DOE *et al*, 2004)

Porém, de modo a evitar comprometer as vantagens da instalação do VFD e assegurar o funcionamento em condições técnica e economicamente viáveis, deve verificar-se a viabilidade da aplicação destes equipamentos às características de funcionamento do sistema (DOE *et al*, 2004).

### 4.3. Avaliação da melhor solução técnica e económica

A avaliação da melhor solução técnica e económica de optimização energética de sistemas elevatórios de águas residuais, poderá ser considerada como uma evolução na abordagem a seguir na própria concepção e dimensionamento destes sistemas. Este processo deverá, então, ter duas fases distintas:

#### 1ª Fase – Análise convencional

Avaliação das características das bombas respeitando a capacidade máxima do sistema.

#### 2ª Fase – Optimização energética

Análise do funcionamento do sistema global (grupo(s) electrobomba, tubagens e demais componentes) segundo uma abordagem de avaliação de caudais de entrada e de saída e do correspondente desempenho mecânico dos grupos electrobomba, ao longo do período diário, com vista à optimização energética da totalidade do sistema.

Desta forma, quer se trate do dimensionamento de novos sistemas elevatórios ou da reavaliação de sistemas existentes, a simulação do comportamento do sistema, possibilitando uma avaliação suficientemente flexível e expedita das possibilidades de optimização deste tipo de sistemas, é especialmente apropriada à aplicação de ferramentas computacionais, tal como a descrita em seguida.

#### 4.3.1 Ferramenta de simulação e avaliação energética

Para facilitar e tornar mais sistematizada a integração dos princípios de eficiência energética em sistemas elevatórios, foi desenvolvida uma ferramenta informática que permite a simulação do comportamento diário de um sistema elevatório e a avaliação da sua eficiência energética.

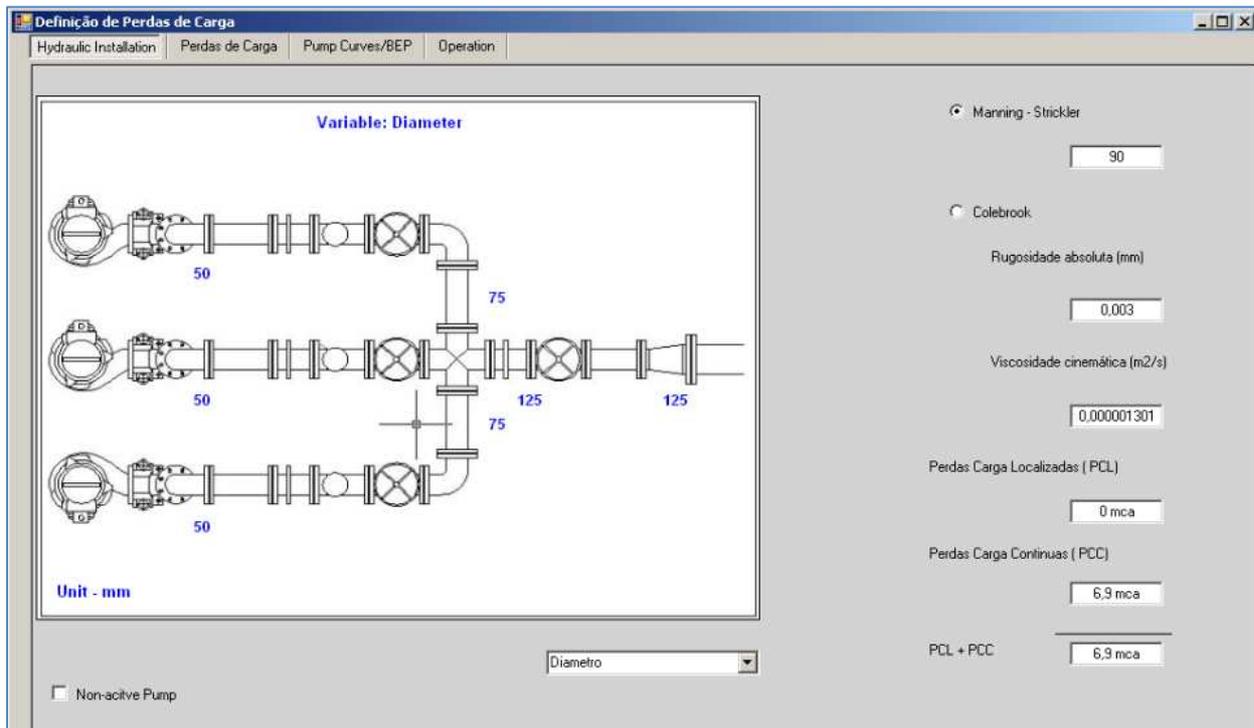


Figura 5- Módulo de introdução de dados do sistema elevatório na ferramenta de análise

Esta ferramenta (Figuras 5 e 6) possibilita a definição das características de todos os componentes do sistema elevatório, tendo como principais objectivos:

- Definição de 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 do sistema;
- Simulação do funcionamento do sistema, em intervalos de 60 s, permitindo a avaliação da evolução contínua de diversas variáveis;
- Definição de parâmetros de eficiência energética, como o EER (*Energy Efficiency Rating*) e o custo diário de energia.

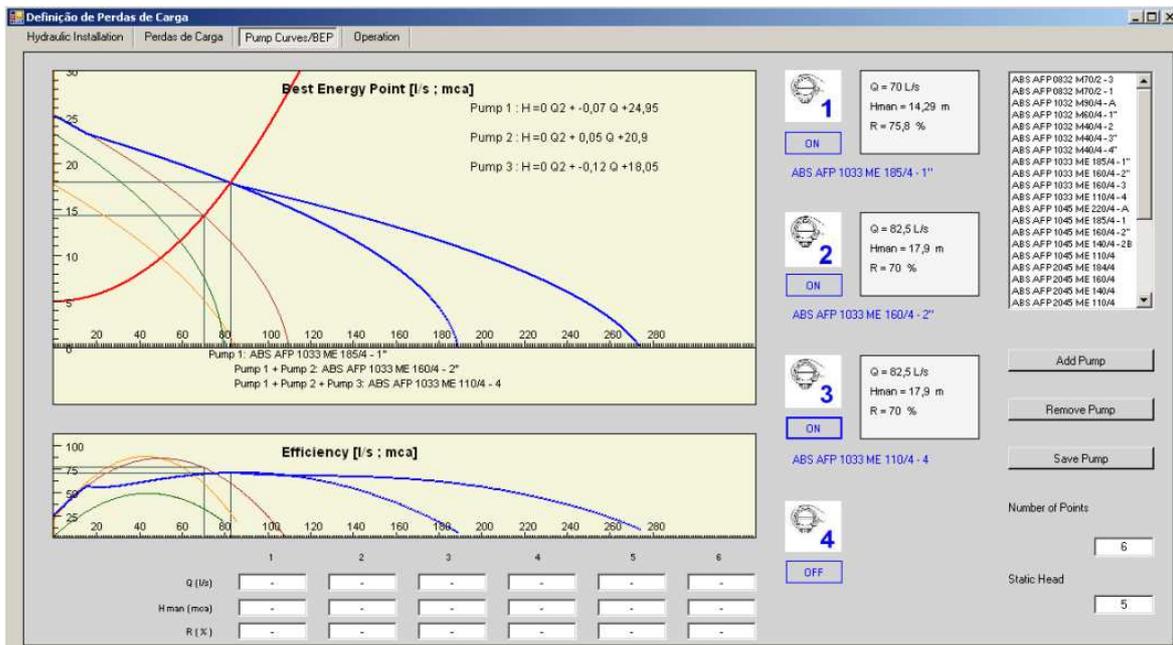


Figura 6 Módulo de selecção dos grupos electrobomba, com apresentação das curvas características dos grupos e definição dos pontos de funcionamento

O *Energy Efficiency Rating* – EER (3) é um parametro teórico de avaliação do comportamento energético, com o objectivo de facilitar a comparação de soluções. Este parâmetro permite aferir a discrepância entre as perdas de carga mínimas do sistema, considerando uma bombagem teórica e contínua do caudal afluyente e as perdas de carga reais, face aos caudais reais de bombeamento do sistema. Quanto mais próximo de 100%, maior será a eficiência do sistema (Figura 7).

$$EER (\%) = H \text{ manométrica teórica} \times Q \text{ afluyente} / (H \text{ manométrica real} \times Q \text{ bombeado}) \times 100 \quad (3)$$

Em que:

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

Q afluyente = Caudal afluyente 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.

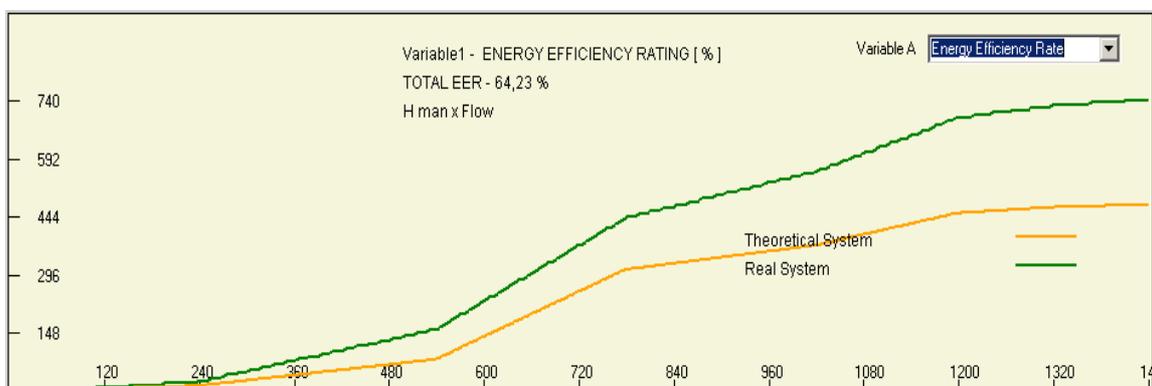


Figura 7 – Representação gráfica, segundo uma evolução no tempo, do significado do EER (diferença entre as relações HmanxQ para o sistema real e para um sistema teórico)

O custo de energia diário resulta da potência dispendida (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.

## 5. CASOS PRÁTICOS

Os casos de estudo, apresentados em seguida, visam aferir a validade de algumas das soluções de optimização, quer se trate do dimensionamento de um novo sistema, como pode ser o caso da variação do diâmetro do impulsor e do escalonamento de bombas em paralelo, como da avaliação de um sistema já operacional, considerando-se a opção de instalação de uma *Pony Pump*.

Com o intuito de facilitar e sistematizar a análise e validação das metodologias referidas, foi utilizada a ferramenta computacional de análise, anteriormente descrita, aplicada a um caso teórico de base, comum, com as seguintes características:

Altura Geométrica = 10 mca

Comprimento da Conduta Elevatória = 1800 m

População abrangida pelo sistema elevatório = 17 500 hab

Capitação = 150 L/hab/dia

Caudal médio diário afuente ( $Q_{mda}$ ) = 24,3 L/s

Factor de ponta = 1,95 (Art. 125º do D.R nº 23/95 de 23 de Agosto)

Factor de segurança (grupos electrobomba) = 1,15

Capacidade máxima de bombagem = 54 L/s

Para a definição do diagrama de caudais diários, tal como referido anteriormente, na inexistência de dados de avaliação dos caudais reais afluentes ao sistema, foi considerada uma aproximação teórica dos mesmos. A variação do factor de ponta, ao longo de um dia, para um aglomerado com população superior a 10000 hab, foi considerada de acordo com uma variação horária similar à habitualmente admitida no dimensionamento de reservatórios em sistemas de abastecimento de água (TENTÚGAL VALENTE, 1983). Da aplicação desse factor de ponta ao caudal médio diário do sistema em causa, resulta a variação do caudal afuente ao longo do dia (Figura 8).

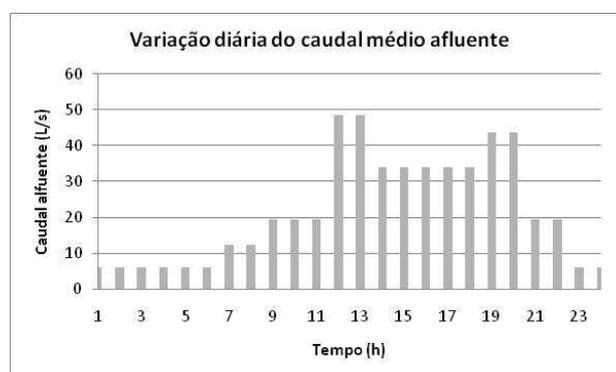


Figura 8 – Variação diária do caudal médio afuente ao sistema

Por outro lado, de forma a manter a validade da análise, a definição do sistema irá respeitar as regras básicas de concepção e dimensionamento de sistemas elevatórios, nomeadamente a garantia, em todas as simulações, da capacidade máxima de bombeamento de 54 L/s.

A avaliação dos custos do ciclo de vida do sistema será efectuada para um período de vida útil de 15 anos, actualizando as diferentes parcelas ao momento presente. Nesse sentido, atendendo à desvalorização da moeda durante o período considerado, a taxa de inflação adoptada foi de 3%.

Para a quantificação dos encargos de energia, é fundamental estabelecer um custo unitário para o Ano 0, considerado igual a 0,09€/kWh, e a correspondente evolução no tempo, de 3% ao ano. A adopção desta taxa corresponde a assumir que o aumento do custo de energia se deverá, apenas, à inflação, o que constitui o cenário referência de base para avaliação de eventuais reduções neste tipo de encargos. Assim, qualquer aumento do custo de energia, acima da taxa considerada, irá conduzir a uma acentuação das diferenças encontradas e salientar as vantagens apontadas.

No que toca aos custos de manutenção, atendendo ao referido em 3.1, estes foram considerados iguais para todas as alternativas avaliadas, com um valor global, para o período de vida útil do equipamento, de 2000 €, já actualizados ao momento presente. Para os presentes casos de estudo não foram considerados quaisquer outros custos.

### 5.1 Variação do diâmetro do impulsor

Para esta opção irá ser efectuada a avaliação do comportamento do sistema descrito, considerando um conjunto de bombas de uma mesma gama do fabricante ABS (AFP 1543), o que permitirá realçar a influência dos diferentes diâmetros do impulsor na eficiência de um sistema deste género (Figura 9).

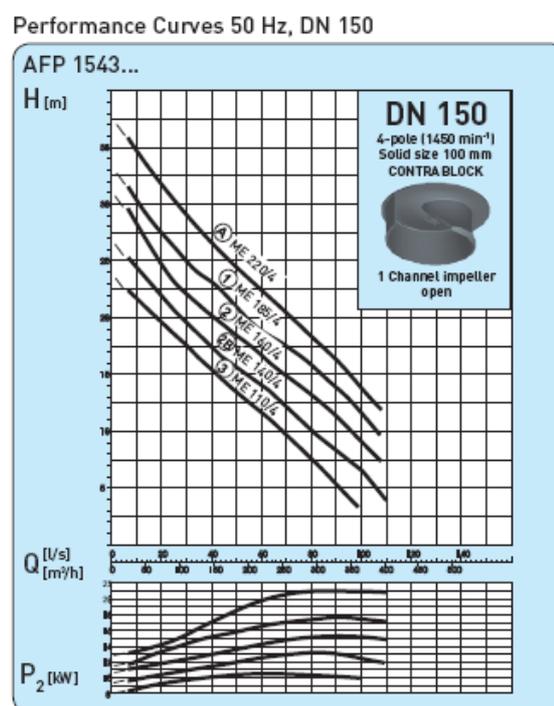


Figura 9 – Curvas características das bombas para a gama ABS AFP 1543, segundo o diâmetro do impulsor

Além disso, de forma a manter a capacidade do sistema, 54 l/s, será considerada uma constituição variável do número de bombas activas (escalonamento de bombas em paralelo). A análise de eficiência

energética será efectuada através do EER (%) e do custo diário de energia, proporcionados pela ferramenta descrita. A comparação das diferentes alternativas será realizada pela análise dos correspondentes custos de ciclo de vida.

**Quadro 1 – Resultados da simulação das diferentes configurações do sistema elevatório**

Equipamento	Un.	Q ( L/s)	H man (mca)	EER (%)	Custo Energético (€/dia)
ME 220/4 - A	1	60,5	23,6	32	16,2
ME 185/4 - 1	1	55,3	21,4	38	14,6
ME 160/4 - 2	2	50,3/59,4	19,4/23,1	45	13,2
ME 140/4-2B	2	44,9/54,0	17,5/20,7	55	12,8
ME 110/4 - 3	3	42,8/51,7/55,1	15,8/18,9/20,3	58	11,6

**Quadro 2 – Resultados da análise dos custos de ciclo de vida das diferentes configurações**

Equipamento	Custo de aquisição e instalação (€)	Custo de energia (€)	Redução Custo energia (%)	Custo total (€)	Redução Custo total (%)
ME 220/4 - A	10 428	89 243	-	101 687	-
ME 185/4 - 1	8 688	80 045	10	90 747	11
ME 160/4 - 2	17 520	71 942	19	91 475	10
ME 140/4-2B	16 320	70 025	22	88 358	13
ME 110/4 - 3	24 732	65 974	26	92 718	9

Dos resultados obtidos (Quadro 1) verifica-se que, dentro de uma mesma gama de bombas, a redução do diâmetro do impulsor, conjugada com o escalonamento em paralelo, permite variações no custo de energia diário, maximizando o EER. Por outro lado a solução mais vantajosa segundo o custo total no ciclo de vida do sistema, corresponde a dois grupos electrobomba com o impulsor ME 140/4 (Quadro 2), com uma redução no custo global de cerca de 13%.

## 5.2 Bombas de pequena capacidade ou *Pony Pumps*

Como referido anteriormente, uma solução especialmente indicada para a optimização do comportamento energético de sistemas elevatórios já existentes, consiste na introdução de uma *Pony Pump*, aumentando a eficiência do sistema global quando sujeito a afluências reduzidas.

Para esta análise foi considerado o caso teórico base, admitindo, como grupo electrobomba instalado de raiz, o equipamento ABS AFP 1543 ME220/4 A. Partindo do ponto de funcionamento base desse equipamento (62 L/s; 23,35 mca), o cenário alternativo consistiu em acoplar o equipamento ABS AFP 1032 ME90/4 – A, compatível com os períodos de menores afluências. Dessa forma é possível obter os

resultados apresentados no Quadro 3. Por sua vez, tratando-se de um novo investimento num equipamento já existente, foi efectuada uma análise económica do mesmo, de acordo com o descrito no ponto 3.2, calculando o índice de rendibilidade do mesmo (IRP), indicado no Quadro 4.

**Quadro 3 – Resultados da análise do funcionamento da solução**

Equipamento	EER (%)	Custo Energético (€/dia)
1543 ME 220/4 - A	32	16,2
1543 ME 220/4 – A + 1032 ME 90/4 – A	68	9,9

**Quadro 4 – Resultados da análise de rendibilidade do investimento**

Equipamento	Custo de investimento (€)	Custo de energia (€)	Redução Custo energia (%)	Índice Rendibilidade (IRP)
1543 ME 220/4 - A	-	89 243	-	
1543 ME 220/4 – A + 1032 ME 90/4 – A	4730	54 038	39	601

Uma vez que o investimento inicial, de 4730€, implica uma redução no custo total de energia de 39%, corresponde a um período de amortização de apenas 2 anos, proporcionando um IRP de 600%. Assim, verifica-se que esta poderá ser uma boa solução, principalmente para sistemas que já estejam em funcionamento, implicando um baixo investimento inicial, sem necessidade de reformulação do sistema existente e proporcionando uma excelente rendibilidade, atendendo à redução dos encargos de energia conseguidos.

## CONCLUSÕES

O comportamento energético de um sistema elevatório de águas residuais depende de inúmeras variáveis, que devem ser devidamente analisadas e testadas, logo no processo de dimensionamento.

Não havendo critérios rígidos e genéricos na optimização energética destes sistemas, pois dependerá da situação em causa, a ordem de grandeza da redução de custos totais, passível de ser conseguida, justifica um estudo mais aprofundado dos mesmos, inclusive de sistemas já existentes.

A análise dos casos de estudo permite comprovar a oportunidade de optimização energética em sistemas elevatórios de águas residuais. A metodologia de avaliação e optimização aplicada constitui um exemplo de como se poderá traduzir o comportamento do sistema segundo um parâmetro de eficiência energética e a correspondente quantificação dos custos diários de energia, seja no processo de dimensionamento ou na reavaliação/ reformulação de sistemas já existentes. Não obstante, é fundamental a utilização de ferramentas de simulação especificamente desenvolvidas para este fim, como a apresentada neste trabalho, de forma a aprofundar o conhecimento do modo de funcionamento dos sistemas, face a diversas solicitações.

Por outro lado, atendendo aos resultados dos indicadores de avaliação da utilização de recursos energéticos das entidades gestoras do sector, justifica-se uma avaliação mais aprofundada de sistemas cujas características potenciam essa optimização, nomeadamente os integrados em zonas

com variações sazonais de caudais afluente, redes unitárias e/ou orlas marítimas e ainda os sistemas sobredimensionados face à população realmente servida.

## BIBLIOGRAFIA

Abelin, S., Pritchard, M., Sanks, R. (2006), *Chapter 29 – Costs*, Capítulo editado em livro Jones, G, Bosserman, B., Sanks, R., Tchobanoglous, G. (eds), *Pumping Station Design – Third Edition*, Elsevier, EUA, 2006, ISBN 978-0-7506-7544-4.

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.

DOE, HI, Europump (2004), *Variable Speed Pumping – A guide to Successful Applications - Executive Summary*, US Department of Energy's Industrial Technologies Program (ITP), Hydraulic Institute (HI)

DOE, HI (2006), *Improving Pumping System Performance – A Sourcebook for Industry*, 2ª edição, US Department of Energy's Industrial Technologies Program, Hydraulic Institute (HI)

ERSAR (2009), *Relatório Anual do Sector das Águas e Resíduos em Portugal (RASARP) 2008 – Volume 03 – Avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores*, Entidade Reguladora de Sistemas de Águas e Resíduos, I.P., Dezembro de 2009, ISBN 978-989-8360-00-7

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.

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

Gomes Mota, A., Custódio, C. (2006), *Finanças da Empresa – Manual de informação, análise e decisão financeira para Executivos*, Booknomics, 2006, ISBN 989-8020-05-9.

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

IRAR, LNEC (2004a), *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.

IRAR, LNEC (2009), *Guia técnico 12: Sistema de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores – 1ª Geração do sistema de indicadores de qualidade do serviço*, Instituto Regulador de Águas e Resíduos (actual Entidade Reguladora de Sistemas de Águas e Resíduos) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Setembro de 2009, ISBN 978-989-95392-8-0.

Tentúgal Valente, J. (1983), *Reflexões sobre o cálculo da capacidade de reservatórios em sistemas de distribuição de água*, Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.