

MODELAÇÃO HIDRÁULICA DA EXPLORAÇÃO DE UM SISTEMA ELEVATÓRIO DE ÁGUAS RESIDUAIS Hydraulic Modelling of a Wastewater Pumping System

MARISA FERNANDES ⁽¹⁾ e JOSÉ TENTÚGAL VALENTE ⁽²⁾

⁽¹⁾ Engenheira Civil,
fernandes.marisa@hotmail.com

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, tvalente@fe.up.pt

Resumo

O presente trabalho foi desenvolvido com o objectivo de criar um programa de cálculo que constitua uma ferramenta para auxiliar o desenvolvimento do projecto e da operação de gestão de sistemas elevatórios de águas residuais, com recurso à utilização de bombas centrífugas do tipo submersível. Elaborou-se um algoritmo que define a lei de exploração destes sistemas, tendo em conta uma série de variáveis e de forma a alargar as possibilidades de simulação, com o objectivo de se obter um melhor desempenho técnico, económico e ambiental, recorrendo ao Microsoft® Office Excel e ao Microsoft® Visual Basic for Applications.

Este artigo expõe o modo de funcionamento do algoritmo criado para a avaliação do funcionamento dos sistemas supracitados. É de especial interesse a análise de desempenho efectuada à custa da definição e consideração de indicadores de desempenho. Explica ainda como o programa foi testado com dados referentes a uma estação elevatória em funcionamento e exploração e realiza a análise crítica dos resultados obtidos. Por fim, apresentam-se as conclusões que foi possível retirar do trabalho realizado.

Palavras-chave: Águas residuais, bombas centrífugas, indicadores de desempenho, sistemas elevatórios.

Abstract

This work was carried out with the purpose of creating a software tool to help the development of wastewater pumping systems with submersible centrifugal pumps' project and management operations. An algorithm was developed to define the law of operation of these systems and in order to widen the simulation possibilities, taking into account a number of variables, seeking for the best technical, economical and environmental performance, using Microsoft® Office Excel and Microsoft® Visual Basic for Applications.

This paper explains how the created algorithm works for the design and evaluation of the above mentioned systems. It is particularly interesting the performance analysis based on the definition and consideration of performance indicators. It is shown how the Program was experimented with data from an operating pumping station and a critical assessment of the obtained results is done. Finally, it compiles the many conclusions drawn by this work.

Keywords: Sewage, centrifugal pumps, performance indicators, pumping systems.

1. Introdução

Ao contrário do que sucede com as estações elevatórias dos sistemas de abastecimento de água, as estações elevatórias de águas residuais implicam um dimensionamento mais complexo, devido, especial e particularmente, aos problemas de septicidade que o fluido em causa pode gerar. Assim sendo, considera-se que será importante desenvolver uma ferramenta que auxilie o desenvolvimento do projecto e as operações de gestão deste tipo de infra-estruturas. A finalidade deste trabalho foi a de elaborar um algoritmo que definisse a lei de exploração de um sistema elevatório de águas residuais, que considerasse como variáveis intervenientes as indispensáveis e necessárias, de forma a alargar as possibilidades de simulação da exploração integrada de uma estação elevatória e órgãos a ela associados, no sentido de um melhor desempenho técnico, económico e ambiental.

Para além do desenvolvimento do citado algoritmo, procurou-se demonstrar, na parte final, o interesse deste trabalho através de exemplos de aplicação que simulam o projecto de uma estação elevatória já em operação.

2. Enquadramento

2.1. Sistemas de drenagem urbana

As águas usadas provenientes das instalações prediais podem ser conduzidas até instalações de tratamento privativas ou, através dos ramais domiciliários, seguem directamente para a rede de drenagem de águas residuais urbana. Esta rede é constituída por colectores que transportam as águas residuais habitualmente num escoamento em regime de superfície livre.

Sempre que possível, o transporte nos colectores e emissários deve ser gravítico.

Contudo, nem sempre as circunstâncias topográficas e económicas o recomendam, pelo que se recorre muitas vezes a sistemas elevatórios, em que uma parte da sua exploração constitui o âmbito deste trabalho.

2.2. Sistemas elevatórios de águas residuais

A estrutura e o *layout* do sistema elevatório dependem do tipo de grupos elevatórios instalados. Os mais usados são os Ejectores Pneumáticos, os Parafusos de Arquimedes e as Bombas Centrífugas. O presente trabalho aborda a utilização destes últimos, que é o sistema mais utilizado em estações elevatórias de águas residuais.

Há dois tipos de bombas que se usam geralmente nas estações elevatórias: centrífugas e axiais.

As axiais são bombas mais indicadas quando os desníveis a vencer são pequenos e os caudais relativamente grandes. O seu rendimento é elevado, especialmente para alturas de elevação entre 2,5 e 6 m (Bankston, 2005). A principal vantagem que apresenta em relação às bombas centrífugas é a capacidade de transportar sólidos em suspensão no fluido. As bombas centrífugas, especialmente as de mais alto rendimento, poderão ter problemas de funcionamento se o fluido tiver muito sólidos. Mas, por outro lado, têm a importante vantagem de serem mais eficientes para alturas de elevação maiores.

Os grupos de bombas centrífugas, podem ainda ser classificadas, consoante a localização da bomba e do motor, em submersíveis ou não submersíveis e com motor a seco ou submerso.

2.3. Situação actual – problemas a resolver

Um projecto adequado e eficiente é o principal aspecto a conseguir no sentido de dispor de um bom funcionamento do sistema. Só que, no caso das águas residuais em particular, os dados de que se dispõe para avançar com cálculos nem sempre são suficientes e/ou fiáveis. Além do mais, as características das águas residuais podem variar bastante – não há uma água residual padrão (Jones, 2006).

Os sistemas elevatórios exigem um investimento significativo, não só ao nível da sua construção (obras de construção civil, expropriação de terrenos e de equipamentos), mas também na sua operação (consumo de energia eléctrica) e em actividades de manutenção e reparação dos equipamentos electromecânicos. Por tudo isso, o seu projecto deve ser muito bem pensado.

Por vezes, o projecto não conduz a resultados suficientemente preventivos, adoptando-se o resultado (aparentemente) mais económico a que os cálculos conduzem.

Este modo de proceder é insensato, devendo-se sempre experimentar outros resultados (por exemplo, introduzindo variáveis mais específicas e apropriadas ao caso em estudo), iterando-se até se obter um resultado mais seguro, eficiente e que reduza ao mínimo eventuais problemas de manutenção (Tentúgal Valente, 1989). É ainda essencial conceber um projecto bem estruturado e bem organizado, de modo a prevenir a necessidade de fazer alterações mais tarde, arriscando o sucesso da obra.

É certo que muitos problemas derivam do mau uso dos equipamentos ou de uma manutenção insuficiente durante o período de vida da obra, mas esses podem já estar fora do alcance do projectista.

2.4. Delimitação do estudo

No seguimento do que foi dito no subcapítulo anterior, procurou-se criar uma ferramenta que auxiliasse o projectista no dimensionamento de sistemas elevatórios de águas residuais com bombas centrífugas.

A elaboração do algoritmo para efectuar o dimensionamento hidráulico foi feita, essencialmente, com recurso à legislação em vigor (Decreto Regulamentar n.º 23/95, 1995) e a outra bibliografia da especialidade e ainda à experiência existente. Orientou-se o desenvolvimento deste trabalho focando as variáveis mais relevantes, no que concerne às estações elevatórias de águas residuais, nomeadamente:

- o comprimento e o diâmetro da conduta elevatória;
- as velocidades de escoamento;
- as características dos grupos elevatórios;
- a eficiência energética;
- a capacidade do poço de bombagem;
- o posicionamento dos níveis de arranque e paragem dos grupos;
- o tempo de retenção;
- a deterioração biológica;
- a necessidade de arejamento.

O presente estudo é limitado a duas restrições importantes:

- o grupo electrobomba só tem duas posições de funcionamento, ligado ou desligado, não sendo possível explorar as potencialidades de programar o funcionamento de apenas uma parte do grupo elevatório para períodos de menores afluências;
- o grupo electrobomba funciona com velocidade constante, apesar de as bombas de velocidade variável permitirem um melhor rendimento.

Um algoritmo que contemplasse os dois aspectos anteriores seria bastante mais complexo e, por isso, considerou-se numa primeira fase e por enquanto, não explorar outras possibilidades. No entanto, será de grande interesse desenvolver esta opção.

Além do dimensionamento da conduta elevatória (incluindo uma avaliação expedita do fenómeno do choque hidráulico) e da determinação do volume da câmara de aspiração, este programa inclui um diagnóstico do nível de desempenho do sistema através de indicadores.

Procurou-se que a definição destes indicadores fosse a mais abrangente possível. Como é óbvio, quanto mais profunda fosse a análise, mais verosímil seria a previsão feita.

Contudo, o factor tempo voltou a impor-se e, uma vez que esta temática dos indicadores ainda é relativamente recente e é alvo de muitas discussões, definiram-se somente cinco indicadores, dos quais apenas um versa explicitamente aspectos económicos.

Cumulativamente, não foi possível experimentar exaustivamente os resultados desta análise de desempenho com muitos dados reais, o que torna a razoabilidade dos indicadores escolhidos bastante discutível.

O programa foi por fim experimentado com alguns dados provenientes de uma estação elevatória em operação.

3. Descrição do Programa Concebido

O software usado para a modelação foi o Microsoft® Office Excel 2003 (a partir de aqui apenas referido como Excel), associado ao Microsoft® Visual Basic for Applications (designado pela sigla VBA), uma aplicação que permite controlar as actividades no Excel através de linguagem de programação.

3.1. Arquitectura do programa

3.1.1. Introdução

Na Introdução expõem-se os objectivos do programa e as linhas gerais de uso, nomeadamente as opções do Excel que é necessário configurar para permitir o correcto funcionamento do programa. Este programa foi elaborado na versão 2003. No Excel 2007 o funcionamento é ligeiramente diferente e constataram-se incompatibilidades com a execução de algumas macros.

A Introdução inclui a opção de impressão de um relatório de duas páginas que resume os resultados obtidos. O utilizador pode assim manter registos das simulações que fizer e analisá-los de uma forma muito mais prática, já que a informação está condensada num mesmo sítio.

3.1.2. Base de dados

A Base de Dados armazena as informações relativas à Conduta Elevatória - diâmetros e características dos materiais (módulo de elasticidade, E , e rugosidade relativa, k) - e ao Tarifário da Energia Eléctrica.

3.1.3. Conduta elevatória

A secção Conduta Elevatória inclui o seu dimensionamento expedito, envolvendo uma análise simplificada dos efeitos do Choque Hidráulico.

O Programa apresenta a possibilidade de definir o Diagrama de Caudais Afluentes, através do qual vai determinar o caudal de cálculo. Alternativamente, o dimensionamento pode ser feito com base num valor de cálculo do caudal afluente introduzido directamente pelo utilizador.

3.1.4. Câmara de aspiração

O dimensionamento do Volume Útil da Câmara de Aspiração é realizado com recurso ao suplemento Solver, respeitando um conjunto de restrições técnicas que se encontram visivelmente indicadas. Há certas restrições que são essenciais para o bom funcionamento do sistema, mas há outras que podem ser contornadas com recurso a medidas extra. Se a solução encontrada pelo Solver não respeitar alguma destas restrições, surge uma mensagem a descrever as medidas extra que devem ser tomadas.

3.1.5. Análise de desempenho

O Programa termina com uma Análise do Desempenho do Sistema Elevatório baseada em cinco Indicadores.

A cada Indicador é atribuído um Índice de 1 a 5 e o Índice de Desempenho Global resulta de uma média ponderada destes valores, com pesos definidos pelo utilizador. Quanto mais alto for o Índice, melhor será o funcionamento do sistema, em princípio.

3.2. Variáveis do programa

3.2.1. Caudais

A primeira variável a considerar será o caudal afluente, Q_A . Optou-se por prever dois cenários possíveis de inserção deste dado:

- ou o utilizador conhece o diagrama de caudais afluentes diário e define-o, deixando o programa determinar um valor de cálculo a partir daí;
- ou então pode inserir directamente o valor de cálculo a utilizar.

A primeira opção será a mais vantajosa, uma vez que terá um impacto mais realista no final, aquando da Análise do Desempenho do Sistema. Assim, as possibilidades de simulação para o mesmo sistema elevatório serão maiores, observando o grau de sub e sobredimensionamento que uma dada solução pode produzir relativamente aos diagramas mais extremos.

A maior desvantagem desta opção será a de não dar liberdade ao utilizador de escolher o modo de calcular o caudal afluente de cálculo. Não há um consenso sobre a forma de calcular o caudal afluente de projecto. Por isso, começou-se por considerar que este valor corresponderia a uma média aritmética dos valores do diagrama. Contudo, ao efectuar as simulações, constatou-se que esta expressão não seria a mais adequada, levando a frequentes subdimensionamentos, sobretudo nos casos em que os diagramas eram mais irregulares.

Nos casos em que os diagramas eram relativamente constantes ao longo do dia (característico de grandes aglomerados urbanos), a média de todos os valores não diferia significativamente do valor de pico. Deste modo, o valor de dimensionamento era relativamente conservativo, conduzindo a resultados geralmente aceitáveis. Pelo contrário, se os diagramas apresentassem grandes discrepâncias entre valores máximos e mínimos (situação típica de pequenos aglomerados), a média não se iria aproximar dos valores de pico, conduzindo a resultados notoriamente insuficientes.

Assim sendo, houve necessidade de proceder a vários ajustes até que se concluiu que uma razoável forma de calcular o caudal afluente de cálculo seria uma média ponderada de metade dos valores mais altos.

A ponderação desta média atribui um peso de 50% ao valor máximo, sendo os restantes 50% distribuídos equitativamente entre os 6 valores mais altos que se seguirem.

Esta foi a opção seleccionada para este algoritmo. No entanto, é também usual considerar-se o caudal de ponta (solução mais conservativa).

Já o caudal bombado pode ser calculado automaticamente a partir do caudal afluente ou então pode ser livremente definido pelo utilizador.

Em qualquer um dos casos, impõem-se duas restrições: que o caudal bombado seja pelo menos igual ao afluente, $Q_B \geq Q_A$ (para evitar que as descargas de excedentes sejam frequentes, conduzindo a uma ineficácia do sistema), e que seja superior ao mínimo Regulamentar, $Q_B \geq 5,5 l/s$.

De acordo com o recomendado pela bibliografia da especialidade, decidiu-se que o programa calcularia Q_B através do produto de Q_A por um coeficiente entre 1,05 e 1,50.

3.2.2. Conduta elevatória

De acordo com a bibliografia consultada e com as imposições do Decreto Regulamentar n.º 23/95, o melhor desempenho de um sistema elevatório está associado a uma velocidade entre 0,7 m/s e 1,2 m/s. Assim, no sentido de determinar o diâmetro da conduta elevatória, o programa começa por fazer um pré-dimensionamento assumindo uma velocidade de 1 m/s.

O algoritmo está programado para sugerir ao utilizador o menor diâmetro da Base de Dados que verifica este pré-dimensionamento.

A velocidade de escoamento tem de ser no mínimo de 0,7 m/s, de acordo com o Art.º 175º do Decreto Regulamentar n.º 23/95, para garantir a auto-limpeza da conduta elevatória. No entanto, este Regulamento não define nenhum valor máximo.

O Manual de Saneamento Básico considera que a velocidade máxima aceitável é de 1,5 m/s, por factores de ordem económica (Patto, 1990), já que maiores velocidades implicam maiores perdas de carga e, além disso, o transporte de águas residuais é mais susceptível de causar abrasão das tubagens (pelos sólidos em suspensão). Contudo, este limite não é rígido e pode, em circunstâncias excepcionais e bem fundamentadas, ser ultrapassado. Também Galvão (2002) concorda com este limite, alegando que a partir de 1,5 m/s o serviço prestado pelo sistema é já classificado como "inaceitável".

Estipulou-se então que o limite máximo da velocidade de escoamento na conduta elevatória seria de 1,4 m/s. Para um mesmo caudal bombado, diferentes diâmetros seleccionados pelo utilizador conduzem a diferentes velocidades. Por isso, cada vez que este parâmetro ultrapassa o limite mínimo ou o máximo, surge uma mensagem a alertar o utilizador. Independentemente disto, o utilizador é sempre livre de seleccionar o diâmetro que quiser e o prosseguimento do cálculo não é interrompido.

O material escolhido para a conduta elevatória também tem influência no seu dimensionamento. Por isso, é necessário inserir na Base de Dados duas características que o cálculo requer: a rugosidade equivalente, k , e o módulo de elasticidade, E . Conforme o material seleccionado, as respectivas características serão usadas para o cálculo das perdas de carga.

Como é óbvio, tratando-se de uma estação elevatória, é indispensável conhecer o desnível geométrico, Δz , e a extensão, L . Há igualmente uma série de características da água residual que são necessárias para o cálculo das perdas de carga e dos efeitos do fenómeno do choque hidráulico: o coeficiente de viscosidade cinemática, ν , o módulo de elasticidade do fluido, ϵ , e a massa volúmica, ρ .

Além disso, a análise do choque hidráulico, requer também que se indique a inclinação da conduta, i , e que se traduzam as condições de ancoragem da conduta através do coeficiente C_1 .

Este coeficiente pode ser introduzido directamente pelo utilizador, mas existe também a possibilidade de calcular o seu valor através das condições de assentamento da conduta e do coeficiente de Poisson do material de que ela é feita.

No caso de se pretender contabilizar as perdas de carga localizadas, o programa apresenta duas hipóteses: ou se indica o coeficiente global, ΣK_{Loc} , ou se indica logo um valor absoluto de perdas localizadas totais, ΔH_{Loc} .

3.2.3. Câmara de Aspiração

Este é um órgão muito importante do sistema. O seu dimensionamento (determinação do volume útil) deve ser adequado, de forma a minimizar as probabilidades de ocorrência de problemas no futuro. Os parâmetros base para este dimensionamento são (Tentúgal Valente, 1989):

- os caudais afluentes;
- o tempo de retenção de caudais na câmara de aspiração e na conduta elevatória;
- o caudal de elevação.

Há portanto uma série de parâmetros importantes a ter em conta, que são (Tentúgal Valente, 1989):

- o tempo de enchimento da câmara de aspiração, t_1 :

$$t_1 = \frac{V}{Q_A} \quad [1]$$

- o tempo de funcionamento da bomba, t_2 :

$$t_2 = \frac{V}{Q_B - Q_A} = Q_A \cdot \frac{t_1}{Q_B - Q_A} \quad [2]$$

- o número de arranques, por unidade de tempo, Z :

$$Z = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{Q_A \cdot Q_B - Q_A^2}{Q_B \cdot V} \quad [3]$$

- o tempo que a partícula se encontra parada na conduta, t_3 :

$$t_3 = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4 \cdot Q_B} \quad [4]$$

- o número de ciclos, ω :

$$\omega = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{L}{Q_B \cdot t_2} \quad [5]$$

- o tempo que a partícula se encontra parada na conduta, t_4 :

$$t_4 = [1 + \text{Int}(\omega)] \cdot t_1 \quad [6]$$

- o tempo de retenção na conduta, t_c :

$$t_c = t_3 + t_4 \quad [7]$$

Estimou-se um volume da câmara de aspiração tal que permitisse que se cumprissem os seguintes critérios:

- tempo máximo de retenção do esgoto, $t_3 + t_4 + t_1$ de 2 horas;
- tempo de funcionamento da bomba, t_2 , superior a 1 minuto.
- tempo de repouso dos grupos, t_2 , superior a 3 minutos.

Apesar destas restrições, quem projecta tem de ter sempre sensibilidade para admitir valores razoáveis noutras variáveis, como o tempo de enchimento da câmara (que não deve ser demasiado breve) ou o número de arranques da bomba por hora.

Para a determinação do volume útil mínimo da câmara de aspiração, o programa recorre ao suplemento Solver do Excel, procurando otimizar as restrições acima mencionadas.

Nem sempre o Solver consegue chegar a uma solução que satisfaça todas as restrições. No entanto, o incumprimento de algumas restrições pode ser compensado por medidas alternativas, que vão sendo sugeridas conforme as restrições que não se cumprem:

- Se a duração do ciclo da bomba, t_2 , é inferior a 1 minuto, sugere-se que seja alterado o caudal bombeado (ou o próprio grupo electrobomba);
- Se o tempo de retenção do esgoto, t_4 , é superior a 3 minutos, prevêem-se problemas de septicidade. Sendo assim, sugere-se que se tomem medidas para mitigar os problemas de septicidade, como seja a adição de químicos, ou a diminuição da extensão da conduta elevatória, com recurso a estações intermédias.

3.3. Análise de desempenho

Foi desenvolvida uma metodologia de Análise de Desempenho que constitui uma ferramenta que pretende auxiliar o utilizador a aquilatar o funcionamento do sistema em função de 5 parâmetros, os Indicadores de Desempenho (ID).

3.3.1. Estado da arte

A necessidade crescente de garantir um desenvolvimento sustentável leva a que a gestão dos recursos naturais seja actualmente muito debatida, sendo a água, como recurso indispensável à vida humana, um dos temas mais intensamente estudados. Discutem-se hoje e cada vez mais quais as melhores medidas a tomar para reduzir os desperdícios de água, por um lado, e, por outro, quais as melhores formas de restituir as águas usadas ao seu meio natural, mitigando problemas relacionados com a poluição.

Nesse sentido, uma boa gestão dos sistemas de drenagem revela-se muito importante. Documentos como o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais (PEAASAR) foram criados para alcançar esse objectivo. Tal como o nome indica, trata-se de um documento estratégico de planeamento no domínio das infra-estruturas urbanas de abastecimento de água e saneamento de águas residuais, que estipula uma série de objectivos a atingir até 2013.

No que concerne os sistemas públicos de drenagem e tratamento de águas residuais urbanas, estes deverão servir pelo menos 90% da população portuguesa (PEAASAR II, MAOT, 2007-2013). Para cumprir tal objectivo é necessário construir, ampliar e reabilitar sistemas de drenagem. Mas sem uma boa organização e gestão, não é possível obter resultados produtivos. Nesse sentido, é vantajoso recorrer a linhas orientadoras que avaliem a eficiência de um sistema de diferentes perspectivas (económica, ambiental, social, etc.).

Uma avaliação através de Indicadores de Desempenho (ID) revela-se assim uma mais-valia para alcançar os objectivos do PEAASAR, uma vez que “tornam directa e transparente a comparação entre objectivos de gestão e resultados obtidos, simplificando uma situação que de outro modo seria complexa” - Matos *et al.* (2004).

Os ID são parâmetros de avaliação geralmente expressos através de rácios entre variáveis. Se não forem adimensionais, devem expressar intensidade e não extensão (Matos *et al.*, 2004): por exemplo, €/m³ e não €.

Cada ID deve ser único, claramente definido e com interpretação exclusiva e consisa. A sua aplicação não deve estar restrita a especialistas, pelo que tem de ser autoexplicativo e facilmente compreendido e auditável. Deve ser aplicável a entidades de diferentes dimensões e reportando sempre a áreas e períodos de tempo bem definidos (Matos *et al.*, 2004).

Nalguns países existem já sistemas de avaliação de desempenho através de indicadores. Mas noutros, como Portugal, esta temática ainda é relativamente incipiente (Galvão, 2002), apesar de começarem já a surgir estudos sobre esta matéria - nomeadamente a proposta de um Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (SIDS) para aplicação em Portugal da Direcção Geral do Ambiente (DGA).

A International Water Association (IWA) tem promovido a criação de um conjunto de regras de avaliação uniforme e globalmente aceite. Alguns documentos da IWA têm sido desenvolvidos com o apoio do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e do Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), designadamente “Indicadores de Desempenho para Serviços de Águas Residuais”, Matos *et al.* (2004).

A Global Reporting Initiative (GRI), como entidade que desenvolve directrizes de sustentabilidade à escala mundial, também se tem debruçado sobre o desenvolvimento sustentável, contribuindo com propostas para regular a definição de ID.

A International Organization for Standardization (ISO) tem publicado normas no sentido de uniformizar os critérios de avaliação do desempenho de sistemas de saneamento. Uma delas é a ISO 24511:2007 (Guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of wastewater services). Como exemplos de ID, a ISO cita alguns dos convencionados pela IWA, donde se conclui que esta entidade será uma boa referência.

A interpretação dos índices está condicionada pelo contexto em que a análise de desempenho se efectua - é necessário ter em conta (Matos *et al.*, 2004):

- o perfil da entidade gestora (características do negócio em que a organização opera);
- o perfil dos sistemas geridos (volumes de águas residuais, infra-estruturas físicas, meios tecnológicos e aspectos demográficos dos clientes);
- o perfil da região (geográfico, económico e demográfico).

3.3.2. Indicadores de desempenho do programa

Verifica-se que os ID definidos na literatura da especialidade se podem agrupar genericamente, em dois grupos (Galvão, 2002):

- Indicadores Globais, que “procuram traduzir o comportamento do sistema de uma forma global, cobrindo diversas áreas (...), calculados de forma a serem independentes de algumas características do sistema (...), de modo a permitir comparações entre diferentes sistemas”;
- Indicadores Técnicos, mais “vocacionados para a avaliação do comportamento do sistema do ponto de vista técnico, essencialmente através da análise de critérios hidráulicos ou sanitários”.

Uma análise através de Indicadores Globais está por isso mais sujeita a interpretações subjectivas.

O algoritmo desenvolvido neste trabalho é muito elementar, pelo que não seria possível incorporar uma Análise de Desempenho baseada em Indicadores que exigem caracterizações minuciosas dos projectos. O maior grau de subjectividade que lhes é inerente exige um algoritmo suficientemente flexível para incorporar as diversas variáveis que os caracterizam – o que, por enquanto, não está ao alcance deste programa.

Assim, procurou-se centrar este trabalho somente em ID Técnicos, mas sempre ligados a aspectos financeiros, já que estes acabam por ter um impacto demasiado significativo na escolha da solução final para serem negligenciados. Procuraram-se ID que fossem utilizados essencialmente pela entidade gestora, para monitorização e ajuste das políticas de gestão.

Além disso, os ID seleccionados devem ser mutuamente influenciados uns pelos outros, para evitar situações em que melhorias numa área provoquem agravamentos noutra (Matos *et al.*, 2004).

Assim, os ID escolhidos foram:

- Energia eléctrica gasta com o funcionamento do grupo electrobomba;
- Volume de esgoto na câmara de aspiração;
- Número de arranques do grupo electrobomba, por hora;
- Tempo de retenção do esgoto;
- Velocidade de escoamento na conduta elevatória;

O utilizador é livre de atribuir a cada um destes Indicadores a ponderação que bem entender, mas a soma de todas as ponderações nunca deverá ser diferente de 100%.

Para consolidar a análise, o algoritmo calcula o volume de água residual de esgoto na câmara de aspiração em cada minuto do dia e, cumulativamente, determina os tempos de bombagem e o número de arranques por horas, durante o dia inteiro.

É possível ver o diagrama que mostra a variação de volume de água residual na câmara e o utilizador pode imprimi-lo.

Se porventura ocorrer o transbordo do esgoto (i.e., se o volume no poço for, num instante, superior ao volume útil da câmara) com duração superior a 10 minutos, no final do cálculo surge uma mensagem sob o Índice de Desempenho Global, a alertar o utilizador.

Energia Eléctrica

Este indicador pretende traduzir as vantagens e desvantagens de um determinado padrão de bombagem diário, sujeito a um Tarifário da Energia Eléctrica definido na Base de Dados.

O algoritmo começa por calcular a despesa com energia decorrente do tarifário actual. Supondo que o tempo de bombagem se concentrava prioritariamente nas horas em que o custo do kW h fosse menor, teríamos uma situação dita “ideal”. No outro extremo temos a situação “pior”, aquela em que o tempo de bombagem se concentraria prioritariamente nas horas em que o custo do kW h é maior. Com estes valores, definiu-se um coeficiente que traduz a proximidade da distribuição real da ideal.

Definiu-se a pontuação a atribuir a este indicador com base nas simulações efectuadas (Figura 1). Verificou-se, com as experiências, que era muito difícil fugir de valores entre 0,60-0,70. Por outro lado, valores acima dos 0,80 surgiam apenas em casos mais graves.

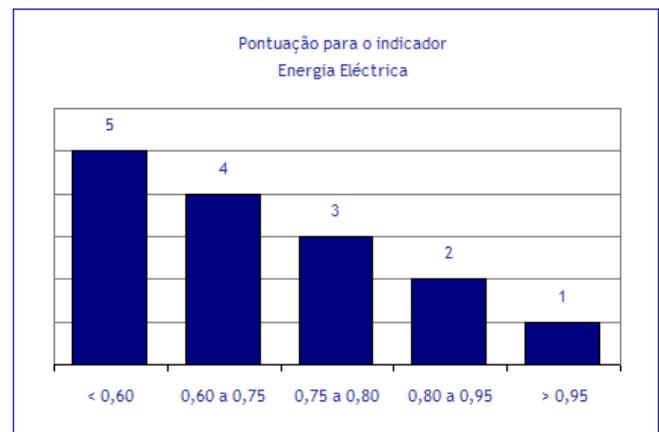


Figura 1. Índice de Desempenho atribuído ao Indicador “Energia Eléctrica”.

Volume na Câmara de Aspiração

Este indicador tem em conta o volume de águas residuais transbordado (se ocorrer transbordo), durante um dia. Como se deve deixar sempre uma distância entre o nível máximo do esgoto na câmara e a geratriz inferior do colector afluente, a pontuação deste indicador para níveis que não ultrapassem essa geratriz é intermédia (4 a 2), já que essa distância existe precisamente porque se prevê a possibilidade de, pontualmente, o nível subir ligeiramente acima do máximo.

O índice é calculado comparando a diferença entre o volume no poço em cada minuto e o volume máximo permitido. Enquanto essa diferença for negativa, o índice é zero, o que corresponde à pontuação máxima, 5. Quando o nível de água residual já se encontra na margem de segurança (que se admite ser uma altura de 20 cm), a pontuação começa a decrescer, conforme a percentagem do volume da margem de segurança ocupado.

Quando este coeficiente é maior que 1, duas pontuações podem ser atribuídas:

- Se é maior, mas inferior ou igual a 1,10, ainda se atribui a pontuação mais baixa, 1;
- Se é maior e superior a 1,10, a pontuação é nula.

O índice deste indicador é uma média da pontuação atribuída em todos os minutos, conforme o critério descrito. Se o transbordo persistir durante mais de 10 minutos, mesmo que dentro do volume de tolerância, o índice é penalizado com a subtração de um valor, até um mínimo de zero, Figura 2.

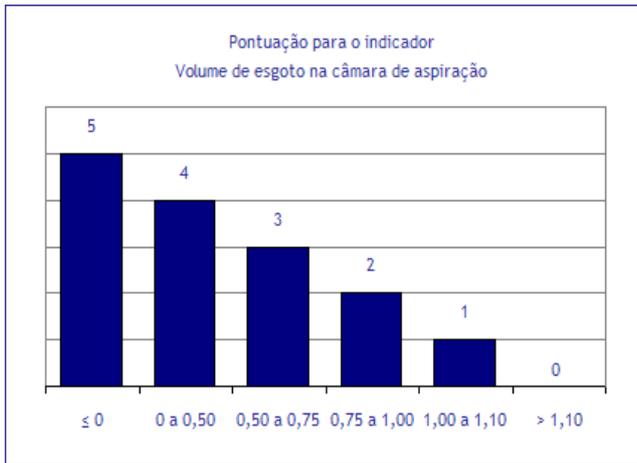


Figura 2. Índice de Desempenho atribuído ao Indicador “Volume na Câmara de Aspiração”.

Número de Arranques da Bomba por hora

Seguindo as indicações da bibliografia consultada (Patto, 1990; Tentúgal Valente, 1989; Grundfos, 2005), sugere-se a distribuição de pontuações apresentada no gráfico da Figura 3, independentemente da potência do grupo.

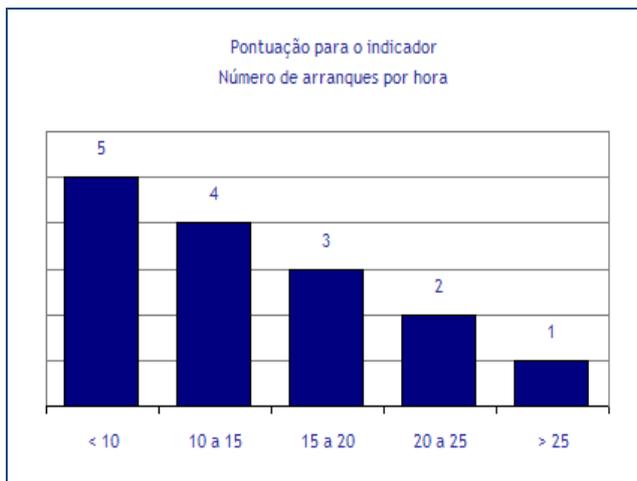


Figura 3. Índice de Desempenho atribuído ao Indicador “Número de Arranques por hora”.

Tempo de Retenção do Esgoto

Seguindo as indicações da bibliografia consultada (Patto, 1990; Tentúgal Valente, 1989 e Grundfos, 2005), sugere-se a distribuição de pontuações apresentada no gráfico da Figura 4.

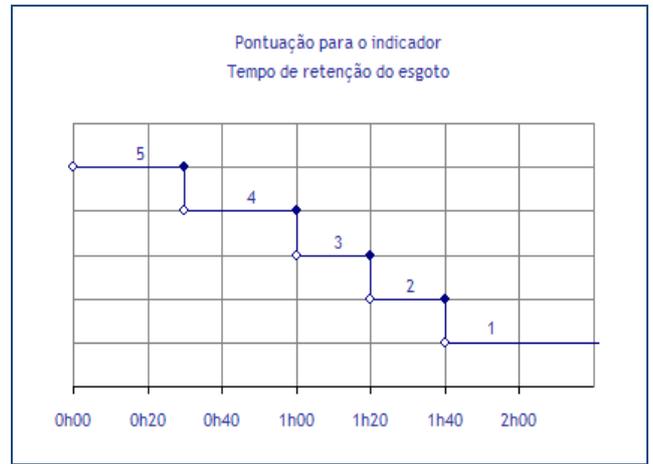


Figura 4. Índice de Desempenho atribuído ao Indicador “Tempo de Retenção do Esgoto”.

Velocidade de Escoamento na Conduta Elevatória

A velocidade na conduta elevatória tem de ser pelo menos 0,70 m/s, por isso, considera-se que qualquer velocidade abaixo deste valor terá pontuação nula, como medida penalizadora excepcional.

Por outro lado, segundo Galvão (2002), uma velocidade até 1,20 m/s trará um melhor desempenho do sistema. Por isso, decidiu-se atribuir às velocidades situadas neste intervalo as duas pontuações mais elevadas, 5 e 4. A distribuição das velocidades pelos intervalos de pontuações não é equitativa porque se entendeu que, se assim fosse, se estaria a penalizar imprudentemente velocidades ditas “boas”.

Escolheu-se 1,50 m/s para limite máximo da velocidade, fazendo a pontuação decrescer em intervalos equitativos. Acima deste valor, atribui-se novamente uma penalização com pontuação nula.

O gráfico da Figura 5 traduz a atribuição das pontuações descritas. Esta penalização de pontuações nulas poderia ser discutível, especialmente porque os limites superior e inferior podem ser alargados dependendo das circunstâncias de cada caso em particular (além de que o superior nem sequer é regulamentar).

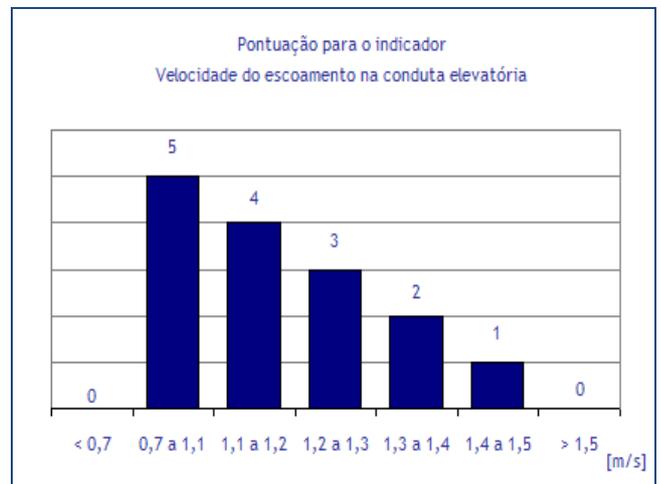


Figura 5. Índice de Desempenho atribuído ao Indicador “Velocidade do Escoamento na Conduta Elevatória”.

Contudo, se o utilizador decidir manter uma velocidade acima deste limite convicto de que é o melhor para o sistema, pode sempre diminuir (ou até anular) o peso deste indicador e avaliar o desempenho baseado apenas nos outros indicadores.

4. Aplicação a um Caso Concreto

Para testar o programa desenvolvido, recorreu-se a registos de caudais afluentes medidos numa estação elevatória já operacional há cerca de 10 anos. Trata-se da Estação Elevatória de Águas Residuais de Afife, no concelho de Viana do Castelo e que a partir deste ponto se designará abreviadamente por EE de Afife.

A Águas do Minho e Lima, S.A. (AdML) é a empresa actualmente responsável pela gestão, operação e manutenção dos sistemas de abastecimento, drenagem e tratamento de água da região do Minho-Lima e, portanto, da EE de Afife, que se inclui no Subsistema de Saneamento da Gelfa.

Foram gentilmente cedidos pela AdML registos de dados que pudessem servir para testar o Programa desenvolvido, nomeadamente registos de caudais afluentes à EE de Afife. Analisando-os, verifica-se que, nas semanas de maior precipitação, os caudais foram significativamente superiores. Isto acontece porque, apesar de se tratar de um sistema separativo, na prática as ligações clandestinas e as infiltrações fazem com que tenha todos os inconvenientes de um sistema unitário: está mais sujeito a variações de caudal, em função do clima, e recebe maiores quantidades de areias (especialmente porque está perto da praia).

4.1. Teste do programa

Considerando os valores médios dos caudais afluentes, foram feitas simulações para avaliar o desempenho da EE de Afife. Cada simulação obrigou ainda a um ajuste das ponderações dos indicadores para a Análise de Desempenho.

Por exemplo, como em nenhum dos casos o volume de água residual ultrapassava o volume útil, decidiu-se que seria desnecessário considerar esse Indicador. Assim, a análise concentrou-se nos parâmetros que efectivamente sofriam variações.

A estação tem duas bombas pelo que, quando, no cálculo, se verificava que uma bomba sozinha não era suficiente para dar resposta ao caudal afluente, o valor de Q_B introduzido era a soma dos caudais das duas bombas.

4.2. Interpretação dos resultados

Foi importante ajustar as ponderações às diferentes simulações, para confrontar situações semelhantes e para avaliar apenas os aspectos que efectivamente influenciavam o funcionamento do sistema.

Por exemplo, como em nenhum dos casos houve problemas relacionados com o volume de água residual na câmara (nunca excedia o volume útil), decidiu-se anular o peso deste indicador para focar as atenções nos restantes.

5. Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho permitiu a criação de uma ferramenta com interesse e utilidade para o dimensionamento hidráulico-sanitário de sistemas elevatórios de águas residuais e para a sua gestão operacional. Como habitualmente, o dimensionamento hidráulico por si só é simples de ser traduzido em números, mas a gestão das infra-estruturas orienta-se por valores de variáveis muito mais difíceis de quantificar. É preciso primeiro medir, comparar, avaliar a evolução do sistema e só depois diagnosticar a avaliação de desempenho, a partir das quais se decide que aspectos precisam de ser alterados, melhorados, eliminados, etc.

Os Indicadores de Desempenho propostos pela IWA e pelo GRI são muito abrangentes e sobretudo vocacionados para aspectos de gestão de topo, exigindo por isso uma caracterização bastante minuciosa de diferentes áreas. Todavia, crê-se que os indicadores para avaliação de sistemas elevatórios, em particular os agora propostos, são uma contribuição para o avanço do conhecimento deste tema tão recente, apesar de relativamente simples e de requerer ainda muito mais desenvolvimento, monitorização, análise crítica e, também, alguma maturação ou experiência. Quanto ao Programa de Cálculo em si, procurou-se que a interface com o utilizador fosse “*user friendly*” e intuitiva. Tem-se a convicção que este objectivo foi atingido, apesar de se crer que a criação de uma barra de menus e ferramentas mais abrangente que a actual e presente em todas as páginas facilitaria significativamente a navegação.

Constitui sempre um objectivo, tornar as opções de cálculo práticas e versáteis, de forma a flexibilizar as diferentes possibilidades de simulação. Neste aspecto, entende-se também que este objectivo foi atingido com sucesso, tendo em conta o tempo disponível. Aliás, certas limitações do Programa podem ser contornadas com medidas inventivas: por exemplo, o facto de só funcionar com uma bomba de cada vez pode deixar de ser um problema se se proceder como no exemplo da aplicação prática desenvolvida.

Recolhendo muitos dados e agrupando os dias mais parecidos, podem-se criar diferentes dias tipos, em que nuns uma bomba é suficiente e noutros serão precisas duas bombas. Se se fizerem as simulações em separado, é possível analisar o funcionamento do sistema nas duas situações. Mas, como acontece com qualquer aplicação que se desenvolva, há sempre aspectos que podem ser melhorados e o tempo disponível é a única restrição. Algumas melhorias a implementar serão:

- adaptar o modelo para incluir bombas em paralelo, funcionando em simultâneo ou não, de acordo com o caudal afluente;
- alterar a plataforma do programa, uma vez que o novo Excel 2007 tornará, eventualmente, o Excel 2003 obsoleto;
- associar uma série de diâmetros a cada material da Base de Dados o que evitaria ao utilizador reescrever os diâmetros sempre que ocorra a mudança de material;

- aumentar o número de diagramas de caudais afluentes que o programa pode comportar;
- possibilitar ao utilizador a definição das restrições impostas na determinação do volume da câmara de aspiração (uma vez que não há normas regulamentares sobre o assunto);
- permitir ao utilizador alterar não só as ponderações dos indicadores mas também os limites de atribuição das pontuações;
- aprofundar a análise do fenómeno do choque hidráulico, permitindo ao utilizador a possibilidade de traçar o perfil da conduta elevatória e implementar métodos mais evoluídos e exactos como o Método das Características.

O investimento exigido pelas melhorias acima referidas seria largamente recompensado pelas vantagens que a utilização de uma ferramenta como estas representa.

Agradecimentos

À Águas do Minho e Lima, S.A., que forneceu informação importante para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- ADML (17 de Janeiro de 2008). *Águas do Minho e Lima*. Obtido em 31 de Janeiro de 2008, de Águas do Minho e Lima, S.A.: <http://www.aguasdominhoelima.pt>
- Bankston, J. D. (2005). Pumping Stations, In *Water Encyclopaedia*. John Wiley & Sons.
- Decreto Regulamentar n.º 23/95. (23 de Agosto de 1995). *Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais*, pp. 5284-5319. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações: Diário da República n.º 194/95 SÉRIE I-B.

- DGA - Direcção de Serviços de Informação e Creditação. (Dezembro de 2000). Proposta para um Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável. *Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (ENDS 2002)*. Lisboa: Direcção Geral do Ambiente.
- Galvão, A. F. (2002). *Contribuição para o Desenvolvimento de Indicadores de Desempenho de Sistemas de Águas Residuais*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão da Tecnologia, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Grundfos. (2005). *Estações Elevatórias - Águas Residuais. Manual de Engenharia*.
- ISO/DIS 24511. (2006). Guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of wastewater services. *Service activities relating to drinking water and wastewater*. International Organization for Standardization.
- Jones, G. M. (2006). System Design for Wastewater Pumping, In G. M. Jones, *Pumping Station Design* (3ª Edição ed.), Elsevier.
- MAOT. (2007-2013). PEAASAR II. *Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais*. Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território.
- Matos, R., Cardoso, A., Ashley, R., Duarte, P., Molinari, A. E Schulz, A. (2004). *Indicadores de Desempenho para Serviços de Águas Residuais*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil & Instituto Regulador de Águas e Resíduos.
- Patto, J. V. (1990). Estações e Condutas Elevatórias de Água Residual. In *Manual de Saneamento Básico* (Vol. 2). Ministério do Ambiente e dos Recursos Naturais - Direcção Geral dos Recursos Naturais.
- Tentúgal Valente, J. (1989). *Apontamentos sobre Estações Elevatórias de Águas Residuais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Porto.