

POTENCIALIDADES DA MONITORIZAÇÃO EM LINHA NA MELHORIA DO FUNCIONAMENTO DE ETAR DE PEQUENA DIMENSÃO

Rita RIBEIRO ⁽¹⁾; Carla C. PINHEIRO ⁽²⁾; Helena M. PINHEIRO ⁽³⁾; Maria do Céu ALMEIDA ⁽⁴⁾

RESUMO

As ETAR que servem pequenos aglomerados estão sujeitas a fatores específicos que condicionam o seu desempenho, destacando-se a variação significativa na afluência de águas residuais. Uma medida usualmente adotada na fase de projeto de sistemas de lamas ativadas para lidar com este efeito é a consideração de um volume extra para equalização e homogeneização de caudais. Esta medida leva ao sobredimensionamento da ETAR que conduz ao emprego de cargas orgânicas demasiado baixas para a boa eficiência dos processos biológicos. Em alternativa, a aplicação de sistemas de controlo avançado é uma via promissora para a melhoria da resiliência e da eficiência do tratamento, bem como um melhor uso de recursos.

Neste enquadramento desenvolveu-se uma metodologia para a melhoria da supervisão e controlo em ETAR de pequena dimensão que pretende fornecer às entidades gestoras uma estrutura prática de apoio à análise e decisão para a melhoria dos processos de tratamento. A metodologia DEMOCON consiste num conjunto de procedimentos baseados na aquisição em linha de dados do processo e sua posterior utilização num modelo matemático.

Neste artigo é apresentado o potencial associado à monitorização da afluência de águas residuais tendo em vista a melhoria do desempenho e fiabilidade de ETAR de pequena dimensão. Apresentam-se os resultados do trabalho experimental em protótipo realizado numa ETAR localizada em meio rural.

PALAVRAS-CHAVE: águas residuais urbanas; controlo; desempenho e fiabilidade do tratamento; medição em linha; sistemas de monitorização; ETAR descentralizadas

⁽¹⁾ Investigadora Auxiliar do Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, rribeiro@lnec.pt

⁽²⁾ Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Química, IBB, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, carla.pinheiro@ist.utl.pt

⁽³⁾ Professora Auxiliar do Departamento de Bioengenharia, IBB, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, helena.pinheiro@ist.utl.pt

⁽⁴⁾ Investigadora Principal do Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, mcalmeida@lnec.pt

1 INTRODUÇÃO

A dispersão de aglomerados de pequena dimensão, particularmente nas zonas rurais, tem levado à adoção tecnicamente justificada de sistemas descentralizados de gestão de águas residuais. Em paralelo, têm vindo a aumentar as exigências nos requisitos de qualidade das descargas de efluentes de ETAR, o que conduz à necessidade de uma melhoria no nível de supervisão e controlo nestas unidades. No processo de melhoria do funcionamento de ETAR de pequena dimensão, a simulação dinâmica do sistema de tratamento é uma ferramenta que permite desenvolver estratégias de controlo e analisar o efeito de variações na afluência (associadas a contribuições pluviais, por exemplo), entre outros aspetos.

A utilidade dos resultados da aplicação de um modelo matemático está naturalmente associada aos atributos dos dados utilizados na sua calibração ou como entrada do modelo. Deve ser dada particular atenção à conceção do sistema de monitorização e à realização das campanhas, de modo a assegurar que os dados obtidos têm a qualidade adequada face ao objetivo estabelecido para a modelação do sistema de tratamento (Rieger *et al.*, 2010). A simulação dinâmica requer informação com elevada resolução temporal sobre diferentes componentes das águas residuais. A utilização de monitorização em linha constitui um modo simples de obtenção deste tipo de dados a custos controlados

No presente artigo é feita a apresentação dos resultados da análise do potencial da monitorização em linha da afluência de águas residuais a ETAR. É também apresentada a metodologia DEMOCON, desenvolvida no sentido de fornecer às entidades gestoras de sistemas de águas residuais uma estrutura prática para a melhoria da avaliação e controlo em ETAR de pequena dimensão e, conseqüentemente, do seu desempenho e fiabilidade.

2 AVALIAÇÃO E CONTROLO DA EFICIÊNCIA DE ETAR DE PEQUENA DIMENSÃO

2.1 Condicionantes na operação de sistemas descentralizados

Até recentemente, as principais opções para os sistemas de águas residuais em zonas de povoamento disperso eram a utilização de unidades tratamento de pequena dimensão geridas localmente, ou então a ligação a sistemas integrados de grande cobertura territorial (com recurso a interceptores de grande extensão). O potencial atualmente existente ao nível tecnológico e de gestão de infraestruturas permite reconhecer que a melhor prática pode ficar entre os dois extremos de abordagem, com a gestão centralizada dos sistemas de saneamento em áreas de povoamento disperso. Esta opção beneficia da maior eficácia no domínio técnico, financeiro e de gestão resultante do aumento de escala e especialização das próprias entidades gestoras.

Quando comparada com sistemas de maior dimensão, a variedade de soluções tecnológicas disponíveis para a depuração de caudais provenientes de habitações isoladas ou pequenos aglomerados populacionais é consideravelmente mais elevada (IOW, 2001). No entanto, verifica-se que o projeto de sistemas de tratamento de pequena dimensão considera um número limitado de possibilidades. O processo de lamas ativadas com arejamento prolongado é utilizado com alguma frequência em Portugal em sistemas com capacidade de tratamento inferior 2 000 equivalentes populacionais, sendo contudo difícil contabilizar o número exato de instalações atualmente em operação.

As ETAR que servem pequenos aglomerados estão sujeitas a fatores específicos que condicionam o desempenho dos sistemas de tratamento, decorrentes em particular das variações bastante pronunciadas de caudal e de concentração na afluência de águas residuais. O fator de variação de carga, correspondente à razão entre os valores máximo e médio, está normalmente compreendido entre 1,5 e 2 nos sistemas de grande dimensão, mas pode chegar a 5 nas pequenas áreas residenciais (Boller, 1997). Podem, ainda, existir oscilações semanais e sazonais na população de comunidades de menor dimensão, associadas, por exemplo, à atividade turística, que intensifiquem estas variações.

Como medida de amortecimento do efeito da variação mais pronunciada na afluência de águas residuais é usual, na fase de projeto de ETAR de lamas ativadas de pequena dimensão, a consideração de um fator de segurança que permita disponibilizar um volume extra de tratamento para a equalização e homogeneização de caudais. Os principais aspetos negativos associados ao consequente sobredimensionamento dos órgãos de tratamento são o aumento do custo de investimento e o emprego de cargas orgânicas demasiado baixas para a boa eficiência dos processos biológicos fora dos períodos de maior afluência. Em alternativa, a aplicação de sistemas de controlo avançado neste tipo de ETAR é uma via promissora para a melhoria da resiliência e da eficiência do tratamento, bem como um melhor uso de recursos (energia, por exemplo).

2.2 Ferramentas para melhoria dos sistemas de tratamento

No domínio dos sistemas de águas residuais, os modelos matemáticos são utilizados frequentemente para dimensionamento e optimização da operação de ETAR, podendo também servir para a análise do funcionamento dos processos de tratamento (Hug *et al.*, 2009). A simulação dinâmica de sistemas de lamas activadas, baseada nas formulações ASM (*Activated Sludge Model*, e.g. ASM1, ASM2, ASM2d e ASM3) da *International Water Association* (Henze *et al.*, 2000), constitui uma ferramenta aceite na investigação que também tem provado a sua utilidade na prática de engenharia.

Passados mais de vinte anos da data da sua publicação, o ASM1 continua a ser considerado como um modelo importante no cálculo da produção de lamas em ETAR de lamas activadas e na estimativa do consumo de aceitadores de eletrões, designadamente o oxigénio e o nitrato. Este modelo está implementado em numerosos pacotes comerciais de *software* de simulação do funcionamento de ETAR municipais.

A simulação do comportamento dinâmico do sistema de tratamento permite proceder à comparação fundamentada entre o cenário-base de operação e outros alternativos para avaliação de oportunidades de melhoria do funcionamento de ETAR. Pretende-se uma identificação clara dos constrangimentos e problemas existentes e das vias disponíveis para a melhoria do sistema de tratamento.

Uma vantagem importante associada à utilização de modelos matemáticos na concepção de sistemas de controlo deriva do facto de serem representações numéricas destes sistemas que permitem simular o comportamento do sistema de tratamento real, obtendo-se informação detalhada dificilmente obtida a partir dos sistemas de medição. Assim, reduz-se o número de medições e de ensaios dispendiosos à escala piloto. Como interesse acrescido, refere-se o facto da avaliação do comportamento de sistemas e de estratégias de controlo poder ser realizada em condições de afluência bastante diversificadas, permitindo definir condições críticas de funcionamento (Ekman, 2005).

De entre as ações de controlo aplicáveis a sistemas de lamas activadas em ETAR de pequena dimensão, salientam-se as seguintes:

- Controlo do tempo de residência de biomassa no sistema, através da manipulação do caudal de extração de lamas.
- Controlo da concentração de oxigénio dissolvido no tanque de arejamento, através da atuação no sistema de arejamento.
- Controlo da altura do manto de lamas no decantador secundário, manipulando o caudal de recirculação de lamas.

A aplicação de um modelo matemático a uma ETAR implica necessariamente a sua calibração baseada em trabalho de monitorização, de modo a que aquele reflita as condições específicas de funcionamento do sistema de tratamento em análise. No Quadro 1 apresentam-se os objetivos básicos estabelecidos para estudos em ETAR de pequena dimensão.

Quadro 1 – Objetivos de monitorização para apoio à modelação matemática

TIPO	OBJECTIVO
Medição de caudal	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação de requisitos de auto-controlo (medição de caudal efluente). • Descrição do comportamento hidrodinâmico da ETAR. • Caracterização da dinâmica dos caudais afluentes à ETAR. • Determinação de parâmetros operacionais: caudais de recirculação e extração de lamas.
Recolha de amostras	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação de requisitos de auto-controlo (caraterização da qualidade do efluente tratado). • Descrição da eficiência do tratamento, com caraterização de amostras colhidas em diferentes pontos do sistema. • Avaliação das características da biomassa ativa, com observação microscópica e realização de ensaios respirométricos. • Avaliação das características de sedimentabilidade do licor misto e das lamas recirculadas.
Medição de variáveis em linha	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterização da dinâmica na composição das águas residuais afluentes (através de espectrofotometria, ou outros tipos de analisadores em linha). • Controlo operacional em tempo real do funcionamento do tratamento biológico (medição de oxigénio dissolvido e temperatura, por exemplo). • Controlo da altura do manto de lamas no decantador secundário (com utilização de turbidímetros, por exemplo).

2.3 Monitorização da afluência de águas residuais

A variação na afluência de águas residuais constitui a principal perturbação que ameaça a estabilidade do funcionamento de uma ETAR de pequena dimensão. A simulação dinâmica requer informação com elevada resolução temporal sobre o caudal e os valores de parâmetros de qualidade das águas residuais afluentes. A utilização de monitorização em linha constitui um modo exequível de obtenção deste tipo informação a custos controlados. Apresentam-se, seguidamente, alguns aspetos relativos à medição de caudal e da concentração em matéria orgânica em sistemas descentralizados.

Nas ETAR de pequena dimensão, a medição do caudal de águas residuais afluentes apresenta dificuldades devido aos baixos valores verificados, designadamente durante o período noturno. Também é frequente observarem-se maiores dificuldades na instalação dos dispositivos de medição (impostas pelas dimensões do canal de entrada, por exemplo). A avaliação da incerteza assume assim particular importância. Apresentam-se, a título exemplificativo, os valores de incerteza na medição de caudal estabelecidos por entidades com responsabilidades no licenciamento de descargas de águas residuais em países estrangeiros:

- Nos Estados Unidos da América é aceite um valor de incerteza até $\pm 10\%$ na medição de caudal realizada em ações de inspeção no âmbito do *National Pollutant Discharge Elimination System* (USEPA, 2004).
- No Reino Unido é aceite uma incerteza até $\pm 8\%$ do valor de volume diário da descarga, com um nível de confiança de 95%, no âmbito do *Monitoring Certification Scheme* (EA, 2008).

Nas ETAR de pequena dimensão, a monitorização em contínuo do caudal pode ser feita através da medição de nível utilizando sensores ultrassónicos. O estabelecimento de condições de escoamento em superfície livre adequadas à medição pode ser conseguido através da instalação de caleiras Venturi prefabricadas. A utilização da equação de vazão hidráulica específica da caleira permite o cálculo do caudal a partir do valor da altura de escoamento medida a jusante da restrição ao escoamento, de acordo com as instruções do fabricante. Em Ribeiro *et al.* (2008) é apresentada uma síntese das condições necessárias a uma correta instalação de equipamento de medição de caudal em ETAR de pequena dimensão.

A monitorização em contínuo da composição das águas residuais pode ser efetuada através da aplicação da espectroscopia de ultravioleta/visível (UV-Vis), ou espectrofotometria. Este método baseia-se na determinação da atenuação da luz devido à absorção pelo meio, na zona espectral de 200 a 780 nm em comprimento de onda (Lourenço *et al.*, 2012). A eficácia da aplicação de espectrofotometria UV-Vis na monitorização das águas residuais depende da calibração das medições inferenciais, baseada no desenvolvimento de um modelo de correlação específico. A estimativa de valores de parâmetros de qualidade é feita com o processamento matemático da informação obtida através dos espectros de absorção, sendo normalmente utilizadas ferramentas de estatística multi-variada.

O balanço de massa para a matéria orgânica nos modelos matemáticos ASM é feito em termos da carência química em oxigénio (CQO) que lhe está associada. A caracterização espectrofotométrica da composição das águas residuais permite inferir valores de “CQO equivalente” para estas. Inicialmente, a absorvência a 254 nm foi correlacionada com a CQO de águas residuais urbanas. O principal inconveniente associado à utilização de um único comprimento de onda, mesmo que corrigido para a turvação (valor de absorvência a 350 nm), é o facto de ser necessária a realização de calibrações frequentes para garantir bons resultados na aplicação deste método de monitorização (Sarraguça *et al.*, 2009). O desenvolvimento tecnológico registado nas últimas décadas a nível da instrumentação espectrofotométrica e dos sistemas computacionais tornou possível a utilização corrente da informação do espectro completo adquirido em cada medição e, assim, obter-se uma maior exatidão na estimativa de valores da CQO.

A garantia de condições adequadas na instalação do sistema de espectrofotometria UV-Vis é essencial para que a qualidade das medições seja suficiente. Como exemplo de aspetos a considerar na instalação em linha de um espectrofotómetro salientam-se os seguintes:

- A localização do espectrofotómetro deve ser feita em pontos onde o escoamento seja representativo, para além de ser favorável à medição (e.g. turbulência reduzida).
- A colocação do espectrofotómetro no ponto de medição não deve causar estrangimentos ao escoamento, isto é, as águas residuais e todos os seus constituintes devem ser capazes de fluir livremente à volta da sonda.
- O local de instalação do espectrofotómetro deve ser de fácil acesso, para facilitar a verificação regular da limpeza das janelas de medição.

2.4 Metodologia DEMOCON

Desenvolveu-se uma metodologia que pretende fornecer às entidades gestoras de sistemas de águas residuais uma estrutura prática para a melhoria da supervisão e controlo em ETAR de pequena dimensão (Ribeiro, 2011). A metodologia DEMOCON (*DE*centralized *MO*nitoring and *CON*trol) pode definir-se como um conjunto de procedimentos baseados na aquisição em linha de dados do processo e sua posterior utilização num modelo matemático, para sustentação da tomada de decisões operacionais.

A DEMOCON encontra-se organizada em três etapas, nomeadamente, monitorização, diagnóstico operacional e controlo que devem ser realizadas de modo sequencial, após uma etapa prévia de caracterização do sistema (Figura 1).

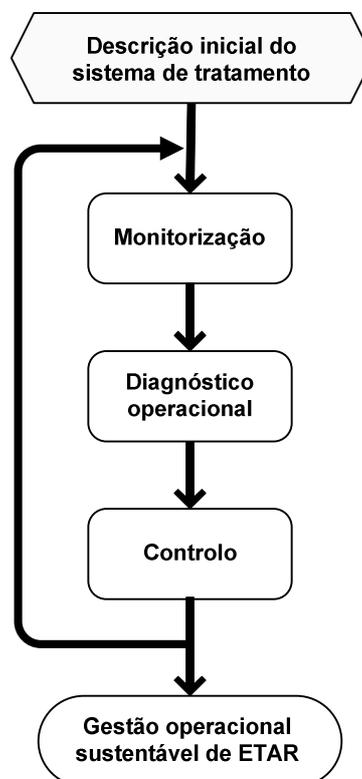


Figura 1. Metodologia DEMOCON

Um elemento chave no processo de melhoria do funcionamento de uma ETAR é a condução de um trabalho de monitorização de seguimento, que permita documentar o sucesso das medidas identificadas na fase de controlo e posteriormente implementadas. Este procedimento é essencial para suportar iniciativas futuras no domínio da optimização operacional no funcionamento da ETAR e para apoiar a identificação de novas intervenções (NRC, 2003).

A simulação do comportamento dinâmico do sistema de tratamento com recurso a um modelo matemático constitui uma parte essencial da metodologia DEMOCON. Neste sentido, foi desenvolvido um modelo matemático constituído por três módulos. O módulo do comportamento hidrodinâmico baseia-se no princípio da continuidade e considera as características de vazão dos descarregadores ou canais de ligação entre as unidades de tratamento, integrando a simulação dos fluxos internos com impacto ao nível do caudal de efluente tratado. O módulo de tratamento biológico consiste numa versão simplificada do ASM1, integrando apenas os processos biológicos relacionados com a degradação de substrato orgânico no tanque de arejamento. O módulo de separação de sólidos é constituído por uma função que traduz a eficiência de remoção de material particulado no decantador secundário. Esta metodologia pode no entanto recorrer a outros modelos matemáticos, caso adequado.

Foi feita a aplicação da metodologia DEMOCON numa ETAR de pequena dimensão situada no interior de Portugal numa região de características marcadamente rurais. O aglomerado populacional servido tem cerca de 850 habitantes. O processo de tratamento utilizado é o sistema de lamas activadas com arejamento prolongado. A instalação é constituída por uma obra de entrada com tamisação de limpeza automática, um tanque de arejamento, um decantador secundário e um conjunto de leitos de secagem para as lamas extraídas.

O trabalho de monitorização realizado integrou a medição, em contínuo, dos caudais de águas residuais afluentes e de efluentes tratados durante um ano. Foram efetuadas diversas medições pontuais de caudal, por método manual, em pontos intermédios da ETAR, para obtenção de dados sobre fluxos internos. Realizaram-se seis campanhas de monitorização para caracterização do funcionamento do sistema de tratamento. Para além do trabalho de campo, foram efetuados ensaios laboratoriais para obtenção de informação de suporte à modelação do tratamento biológico.

Na monitorização em linha do sistema de tratamento, foram empregues diversos tipos de sensores, designadamente: três sensores de nível em diversos pontos da ETAR; um espectrofotómetro submersível para aquisição em contínuo de espectros de absorção na gama ultravioleta-visível das águas residuais afluentes; três sensores de oxigénio dissolvido no tanque de arejamento. A instalação deste sistema avançado de monitorização obrigou à construção, de raiz, de uma obra de entrada e de um canal de saída, de modo a garantirem-se condições adequadas para as medições na ETAR. Foi feita também a recolha de amostras, por via automática e manual, em diversos pontos do sistema de tratamento e que serviram para a realização de determinações analíticas, de observações microscópicas e de ensaios respirométricos em laboratório. Em Ribeiro (2011) apresenta-se informação mais detalhada sobre o trabalho de monitorização realizado.

Na secção seguinte, apresentam-se alguns resultados obtidos no estudo de avaliação da eficiência de tratamento da ETAR monitorizada. No sentido de exemplificar o potencial associado à utilização de monitorização em linha numa ETAR de pequena dimensão, será desenvolvida uma análise às características das águas residuais afluentes e, seguidamente,

são apresentados resultados da simulação dinâmica do funcionamento do sistema de tratamento no âmbito da melhoria da sequência de arejamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da afluência de águas residuais

A variação na afluência de águas residuais a uma ETAR constitui a principal perturbação externa no seu funcionamento e pode ser devida a:

- Variação do caudal e das concentrações dos constituintes das águas residuais relacionada com comportamentos na utilização doméstica da água.
- Variações associadas à afluência de caudais pluviais ou de infiltrações de águas subterrâneas.
- Afluências atípicas, tais como produtos tóxicos para o processo de tratamento e cargas orgânicas muito elevadas.

A produção de águas residuais num aglomerado populacional apresenta um padrão diário e semanal normal associado às rejeições das águas residuais domésticas. O padrão depende da quantidade e tipo de ligações e do tipo de sistema de drenagem (separativo doméstico ou unitário).

As flutuações associadas aos usos domésticos de água podem ser alteradas por outras afluências aos sistemas de colectores como as pluviais. O aumento de caudal resultante, para além de diminuir o tempo de retenção hidráulica no sistema de tratamento, pode levar ao arrastamento de biomassa activa por descarga das lamas sedimentadas no decantador secundário. A infiltração é outro tipo de afluência considerada indesejada e é entendida como a entrada de água subterrânea nas redes de drenagem, através de anomalias estruturais nos colectores e nas câmaras de visita, por exemplo. As descargas indevidas de águas residuais não domésticas podem inibir os processos biológicos de tratamento ou, ainda, resultar em obstruções na rede de drenagem.

Apresentam-se, na Figura 2, os valores de caudal (Q_{af}) e de CQO equivalente ($CQO_{t,af}$) das águas residuais afluentes à ETAR estudada entre os dias 11 e 16 de Fevereiro de 2009. Este período, em que se registou tempo seco, seguiu-se a cerca de um mês com elevada precipitação neste local. Refere-se, ainda, que os valores apresentados resultam da aplicação de um filtro (média móvel de 5 pontos) aos registos obtidos.

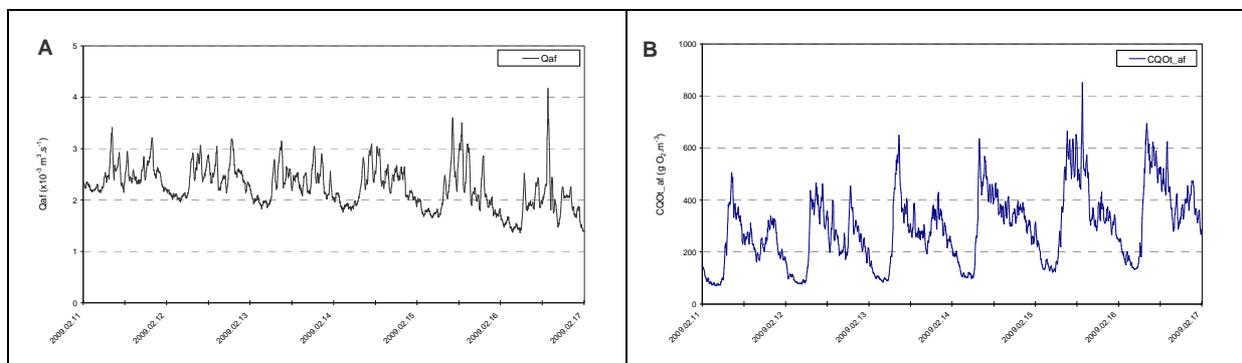


Figura 2. Afluência de águas residuais à ETAR

Analisando os gráficos da figura anterior considera-se que o padrão de variação das águas residuais afluentes à ETAR estudada aponta para uma matriz essencialmente doméstica, uma vez que é possível detetar um padrão diário consentâneo com os usos domésticos.

A análise ao hidrograma (gráfico A), conjugada com o conhecimento sobre o funcionamento da ETAR adquirido durante o trabalho experimental, permite desenvolver hipóteses explicativas sobre o padrão de variação observado no caudal afluente.

Um primeiro aspecto a analisar é a configuração de base do hidrograma. Observa-se um valor relativamente elevado (próximo dos $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) face os valores máximos observados nos primeiros quatro dias (cerca de $3,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). De acordo com Dee e Sivil (2001), a verificação de valores inferiores a 2:1 neste rácio é indicativa da ocorrência provável de taxas de infiltração elevadas em sistemas que servem aglomerados de pequena dimensão. É interessante verificar também a diminuição progressiva do valor de base do hidrograma, tendência que pode ser explicada por um eventual abaixamento nos níveis freáticos durante o período em análise.

O dia 15 de Fevereiro de 2009 foi um domingo. Este facto poderá ser a razão explicativa para a prevalência de uma maior produção de águas residuais perto da hora de almoço num aglomerado com características marcadamente rurais.

O aumento súbito de caudal, registado no dia 16 de Fevereiro, poderá ser devido a uma descarga indevida no sistema público de drenagem, uma vez que se verifica uma variação brusca simultânea na concentração em CQO das águas residuais afluentes.

Relativamente ao polutograma (gráfico B), destaca-se que o padrão diário de concentração em CQO é mais evidente do que o registado com o padrão de variação de caudal. Neste caso, os picos matinal e do final de dia (hora de jantar) são mais evidentes, com a excepção dos dias 14 e 15 de Fevereiro (fim de semana).

Observa-se uma tendência para aumento dos valores de $\text{CQO}_{t_{af}}$ durante o período noturno e nos picos. Este incremento de concentração das águas residuais afluentes vai ao encontro da hipótese apresentada atrás no que se refere à eventual diminuição da contribuição relativa a infiltração de águas subterrâneas no caudal afluente à ETAR.

3.2 Análise de opções de controlo operativo

A simulação de cenários operacionais permite avaliar o efeito de estratégias operacionais em diferentes condições dinâmicas de funcionamento e de afluência, ao estabelecer-se uma base de comparação entre os resultados obtidos. Pretende-se uma identificação clara dos constrangimentos existentes e de vias para a melhoria do sistema de tratamento.

O modelo matemático desenvolvido no âmbito da metodologia DEMOCON tem por objectivo a descrição dos processos biológicos directamente relacionados com a degradação aeróbia do substrato orgânico no tanque de arejamento, integrando a simulação dos fluxos internos com impacto no caudal efluente e da eficiência de separação de sólidos suspensos no decantador. Os critérios utilizados na calibração foram a minimização dos desvios entre valores simulados e medidos de caudal efluente tratado (módulo de comportamento hidrodinâmico) e entre os valores simulados e medidos de concentração em CQO total no efluente tratado (módulo de tratamento biológico).

A calibração do modelo de tratamento biológico foi completada por uma etapa de validação para cada uma das campanhas. Optou-se pela técnica de validação cruzada, tendo sido

criados cinco conjuntos de dados constituídos, cada um, por quatro campanhas de calibração e uma de validação. Realizou-se por cinco vezes a calibração do modelo de tratamento biológico, tendo em vista a sua validação com cada uma das cinco campanhas de monitorização. Os resultados de CQO do efluente tratado ($CQO_{t,ef}$) apresentados na Figura 3 foram obtidos na calibração e validação do modelo matemático para a campanha 5 (24 horas, dias 28 e 29 de Outubro de 2008). Os dados desta campanha foram os utilizados na simulação dinâmica de cenários operacionais.

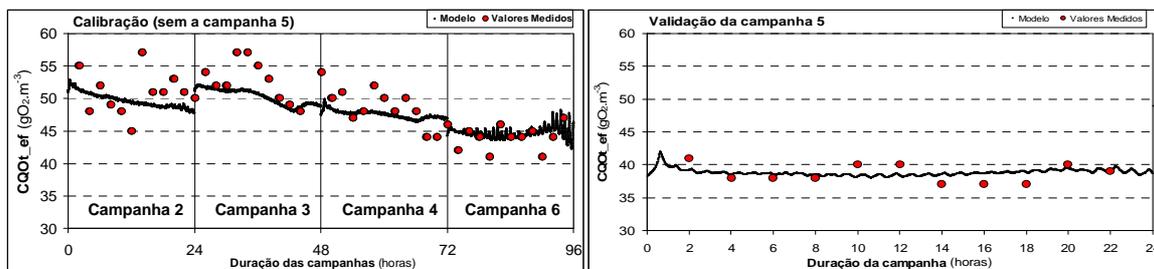


Figura 3. Calibração e validação do modelo para a campanha 5

Da análise aos gráficos apresentados na Figura 3, apresentam-se as seguintes considerações sobre a resposta do modelo desenvolvido na simulação da concentração em CQO total do efluente tratado, designadamente:

- O modelo matemático acompanha razoavelmente as condições médias de funcionamento do sistema de tratamento estudado, uma vez que os valores simulados de CQO total no efluente tratado estão próximos dos valores medidos.
- A simulação dinâmica do funcionamento da ETAR incorpora medições em linha da composição das águas residuais afluentes, através da aquisição de espectros de absorção UV-vis. Esta informação é introduzida no modelo matemático após a conversão dos dados espectrofotométricos em dados de CQO, através da utilização de uma função de calibração integrada no *software* de suporte ao espectrofotómetro. Apesar da incerteza associada à estimativa da concentração de CQO nas águas residuais afluentes, a aplicação do modelo matemático desenvolvido resultou na simulação de valores de CQO total no efluente tratado bastante próximos dos medidos através de determinações analíticas nas amostras colhidas nas campanhas de monitorização.
- Constata-se a existência de um padrão oscilante na variação dos valores simulados de $CQO_{t,ef}$. Atribui-se como causa possível deste comportamento, o efeito do funcionamento intermitente do sistema de arejamento, uma vez que o modelo considera a ocorrência de consumo de substrato rapidamente biodegradável (S_S) apenas em condições aeróbias. Esta variação estará, em princípio, associada ao facto de ser atribuído um tempo de retenção e um grau de mistura nulos ao decantador secundário. O efeito expectável destes dois fatores seria a homogeneização da composição no decantador e, conseqüentemente, do efluente tratado.

A gestão do fornecimento de oxigénio é fundamental para a operação sustentada do funcionamento de uma ETAR. Isto deve-se ao facto da concentração de oxigénio no reator biológico condicionar diretamente a qualidade do efluente tratado, para além do custo relativo ao sistema de arejamento representar parte importante do custo de tratamento nos

sistemas de lamas ativadas. O fornecimento de oxigénio pode ser feito de modo contínuo ou intermitente, sendo a última opção mais vulgar nos sistemas com arejamento prolongado.

Um perfil de arejamento é composto por ciclos de arejamento, os quais são constituídos por um período de funcionamento seguido de um período de paragem do sistema de arejamento mecânico (Chachuat, 2001). Nas simulações realizadas, a definição dos ciclos de arejamento teve por base as características técnicas do temporizador que controla o funcionamento do arejador mecânico na ETAR estudada. Por esta razão, os intervalos de tempo considerados são iguais ou múltiplos de 12 minutos. Mantendo um período de arejamento de 12 minutos, foram definidos os seguintes cenários de operação:

- Simulação A – período de paragem de 36 minutos (reprodução da programação aplicada no caso estudado).
- Simulação B – período de paragem de 48 minutos.
- Simulação C – período de paragem de 72 minutos.

O modelo descritivo do funcionamento da ETAR estudada foi implementado na aplicação MATLAB®, versão 7.7.0 (r2008b), tendo sido utilizada a interface gráfica Simulink® versão 7.2 (r2008b) para as simulações dinâmicas.

As simulações dos cenários operacionais incorporam, entre outro tipo de informação, os valores medidos em linha de caudal e composição (através da aquisição de espectros de absorção UV-Vis) das águas residuais afluentes durante a campanha 5. Apresentam-se na Figura 4 os resultados das simulações relativos à estimativa da composição em $CQO_{t_{ef}}$.

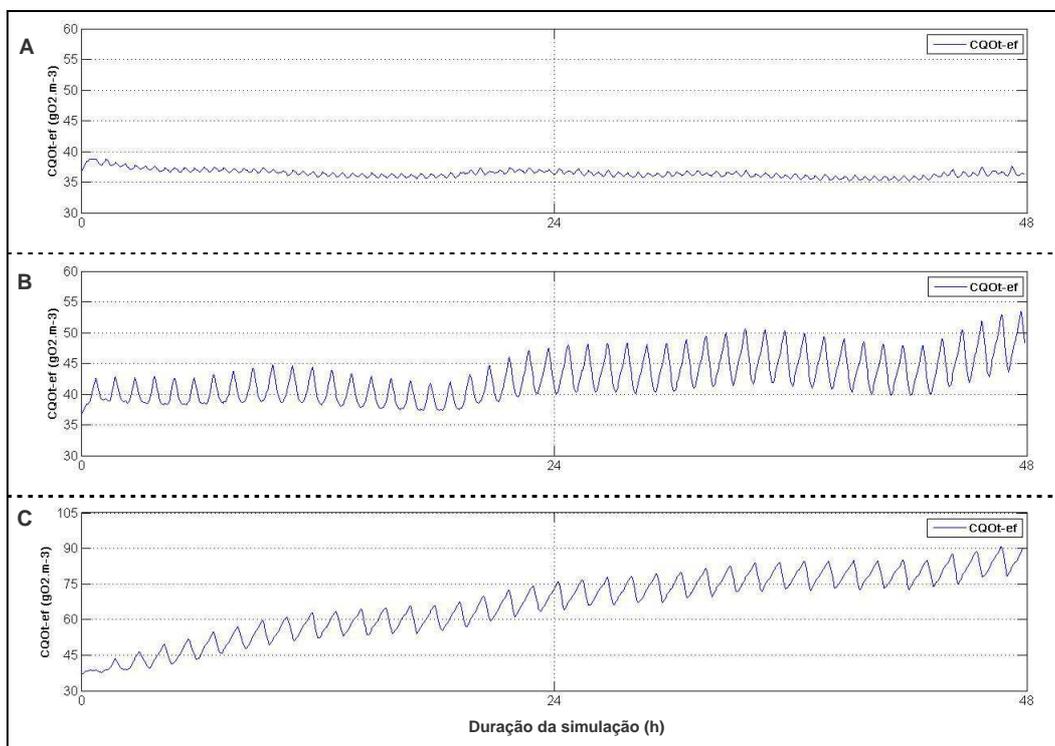


Figura 4. Simulação da composição do efluente tratado em três cenários (A a C) de regime de arejamento.

De acordo com os resultados obtidos com estas simulações, conclui-se que é possível aumentar o período de paragem do arejador mecânico (de 36 para 48 minutos em cada ciclo) sem que a eficiência de tratamento seja afectada substancialmente. Por seu lado, uma paragem de 72 minutos terá como reflexo uma redução clara na qualidade do efluente tratado, não sendo recomendável esta opção de operação do sistema de tratamento da ETAR analisada.

Os resultados obtidos na simulação B (paragem de 48 minutos) apontam, no entanto, para uma tendência de deterioração da qualidade do efluente tratado, se bem que bastante mais ligeira que a registada na simulação C. Para acautelar esta situação, e caso se opte pela manutenção do período de paragem próximo dos 30 minutos, seria possível aumentar a flexibilidade da variável de controlo Taxa de Arejamento, através da substituição do temporizador existente por um outro programável para períodos de tempo mais curtos. É expectável que um investimento deste tipo seja facilmente amortizado na redução dos custos em energia associados ao funcionamento do arejador mecânico.

4 CONCLUSÕES

A principal força motriz na utilização de desenvolvimentos recentes em instrumentação de monitorização em ETAR reside na crescente exigência em termos do nível de qualidade nas descargas de efluentes tratados, tendência que provavelmente se manterá. As variações significativas na qualidade e quantidade das aflúncias a uma ETAR têm efeitos negativos no desempenho do sistema de tratamento, podendo comprometer o cumprimento dos objetivos. A melhoria do nível de avaliação e controlo é assim essencial.

A utilização de instrumentação de monitorização em ETAR de pequena dimensão constituiu, no caso estudado, um modo simples de obtenção em tempo real da informação necessária à previsão da eficiência do tratamento, permitindo um controlo operativo eficaz.

A indústria da água em Portugal passou por numa fase de transição no que se refere à gestão dos sistemas de águas residuais, que resultou no reconhecimento do interesse da aplicação de modelos de integração regional em áreas menos densamente povoadas. A metodologia DEMOCON pretende evidenciar o interesse da adoção de novos conceitos de gestão operacional em ETAR de pequena dimensão. Esta abordagem está enquadrada nas disposições da Diretiva Quadro da Água de 2000 e na crescente necessidade de otimização no uso de recursos.

A simulação do comportamento dinâmico do sistema de tratamento com recurso a um modelo matemático constitui uma parte essencial da metodologia DEMOCON. O modelo matemático desenvolvido, de estrutura simples, demonstrou ser adequado à previsão do desempenho da ETAR estudada.

O êxito da aplicação de uma metodologia como a DEMOCON passa necessariamente pela disponibilidade, por parte da entidade gestora, de meios operacionais (designadamente, em instrumentação) e de recursos humanos adequados a uma gestão operacional efetiva das ETAR de pequena dimensão. Este último aspeto está relacionado com a criação de competências e de capacidade técnica que permitam tirar proveito do novo tipo de informação produzida e recolhida.

AGRADECIMENTOS

O trabalho desenvolvido contou com apoio financeiro das empresas Águas da Serra, S.A., e AGS, S.A., e da Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto SPSSA (PPCDT/AMB/60582/2004). As autoras agradecem a colaboração valiosa dos elementos da Águas da Serra e AGS na preparação e realização do trabalho experimental.

BIBLIOGRAFIA

- Boller M. (1997). Small wastewater treatment plants - A challenge to wastewater engineers. *Water Science and Technology*, 35(6), 1-12.
- Chachuat B. (2001). *Méthodologie d'optimisation dynamique et de commande optimale des petites stations d'épuration à boues activées*. Dissertação de doutoramento, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- Dee T., Sivil D. (2001). *Selecting package wastewater treatment works*. Report n. 72, CIRIA, UK.
- EA (2008). *Minimum requirements for the self-monitoring of effluent flow, Version 3.2*. Environment Agency, London, United Kingdom, pp. 32.
- Ekman M. (2005). *Modeling and Control of Bilinear Systems - Applications to the activated sludge process*. Dissertação de doutoramento, Uppsala University, Sweden.
- Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht, M.C.M (2000). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report No. 9*, IWA Publishing, London, UK.
- Hug T., Benedetti L., Hall E., Johnson B., Morgenroth E., Nopens I., Rieger L., Shaw A., Vanrolleghem P. (2009). Wastewater treatment models in teaching and training: the mismatch between education and requirements for jobs. *Water Science and Technology* 59(4), 745-753.
- IOW (2001). *Guide extensive wastewater treatment processes adapted to small and medium sized communities*, Luxembourg.
- NRC (2003). *Wastewater Treatment Plant Optimization - a best practice by the national guide to sustainable municipal infrastructure*. Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, Canada.
- Lourenço N.D, Lopes J.A., Almeida C.F., Sarraguça M.C., Pinheiro H.M. (2012). Bioreactor monitoring with spectroscopy and chemometrics: a review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 404, 1211–1237.
- Ribeiro R. (2011). *Avaliação e controlo da eficiência do tratamento e águas residuais – Aplicação a sistemas de pequena dimensão*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa (publicação disponível no LNEC como TPI 70).
- Ribeiro R., Almeida M.C., Ilharco O., Pais A.R. (2008). Avaliação da eficiência de tratamento em ETAR de pequena dimensão: aspectos de instrumentação. In *Anais do 13.º ENASB*, Covilhã, pp. 14.
- Rieger, L., Takács, I., Siegrist, H., Lessard, P., Vanrolleghem, P., Comeau, Y. (2010). Data reconciliation for wastewater treatment simulation studies – Planning for high-quality data and typical sources of errors. *Water Environment Research* 82(5), 426-433.

Sarraguça M., Paulo A., Alves M.M., Dias A.M., Lopes J.A, Ferreira, E.C. (2000). Quantitative monitoring of an activated sludge reactor using on-line UV-visible and near-infrared spectroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 395, 1159–1166.

USEPA (2004). *NPDES compliance inspection manual*. United States Environmental Protection Agency, USA.