

Estratégia para o desenvolvimento da 3.^a geração do sistema de avaliação de desempenho de ETAR

Catarina Silva ^a*, José Saldanha Matos ^b, Maria João Rosa ^a

^aLaboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Engenharia Sanitária, Av. Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

^bInstituto Superior Técnico, DECivil, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

RESUMO

As estações de tratamento de águas residuais (ETAR) são atualmente alvo de esforços de melhoria do seu desempenho técnico, ambiental e económico. Empresas, reguladores e organismos de financiamento têm utilizado sistemas de avaliação de desempenho para apoiar as suas decisões. Neste contexto, o LNEC desenvolveu a 1.^a e a 2.^a geração do sistema de avaliação de desempenho de ETAR baseado em indicadores e índices de desempenho. Os valores de referência são elementos chave para o julgamento do desempenho e precisavam ainda de ser definidos para avaliar e melhorar o desempenho das ETAR em termos de, por exemplo, eficiência energética e gestão de lamas. Esta temática foi desenvolvida no âmbito da tese de doutoramento onde a presente comunicação se enquadra e que teve como objetivo desenvolver a 3.^a geração do PAS com enfoque na eficácia, fiabilidade, desempenho energético e gestão das lamas. A estratégia seguida consistiu em desenvolver ou selecionar a partir da 2.^a geração do sistema de avaliação, subconjuntos de indicadores e índices de acordo com os objetivos pré-estabelecidos, e desenvolver os valores de referência a partir de dados bibliográficos, equações empíricas e/ou estudos de campo. Na presente comunicação apresenta-se resumidamente a estratégia e a abordagem desenvolvida para cada objetivo de avaliação de desempenho.

Palavras Chave – Avaliação de desempenho, ETAR, Indicadores de desempenho, Índices de desempenho, Valores de referência.

doi: 10.22181/aer.2016.0107

* Autor para correspondência

E-mail: csilva@lnec.pt (Doutora C. Silva)

Strategy for the development of the 3rd generation of the performance assessment system of WWTPs

Catarina Silva ^a*, José Saldanha Matos ^b, Maria João Rosa ^a

^aLaboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Engenharia Sanitária, Av. Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

^bInstituto Superior Técnico, DECivil, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

ABSTRACT

Wastewater treatment plants (WWTPs) are currently subject of improvement efforts of their technical, environmental and economic performance. The undertakings, regulators and funding bodies have been using performance assessment systems to support their decisions. In this context, LNEC developed the 1st and the 2nd generation of the performance assessment system (PAS) of WWTPs, which is based on performance indicators and indices. For both metrics, the reference values for judging the performance are key elements but were not yet developed for many aspects. This lack of knowledge was addressed within the scope of a PhD thesis whose overall objective was to develop the 3rd generation of PAS with reference values for judging and improving the WWTP performance in terms of effectiveness, reliability, energy performance and sludge management. The research strategy adopted consisted on developing or selecting, from the 2nd PAS generation, a set of PIs and PXs according to the abovementioned assessment objectives and to develop the reference values based on empirical equations and on literature and field data. This communication presents briefly the strategy and the approach developed for each performance objective.

Keywords – Performance assessment, Performance indicators, Performance indices, Reference values, WWTP.

doi: 10.22181/aer.2016.0107

* *Corresponding author*

E-mail: csilva@lnec.pt (Dr. C. Silva)

1 INTRODUÇÃO

O principal objetivo de uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR) é cumprir os requisitos de qualidade da água residual tratada, de forma a salvaguardar a saúde pública e preservar os meios recetores, com fiabilidade, eficiência e sustentabilidade na utilização dos recursos. Em termos de recursos, o consumo de energia representa um dos custos mais elevados dos serviços de água e águas residuais, e constitui geralmente a segunda maior parcela dos custos de funcionamento de uma ETAR, logo após os custos com pessoal (PG&E 2003, WERF 2010, Rodriguez-Garcia *et al.* 2011, Silva *et al.* 2012).

Em tempo chuvoso, é comum a ocorrência de descargas a montante das ETAR. Estas descargas têm frequentemente cargas poluentes significativas, e têm portanto um impacto negativo nos meios hídricos recetores (Ferreira e Matos 2012). As ETAR municipais são também frequentemente chamadas a tratar efluentes industriais. A par disto, muitas ETAR urbanas estão em subutilização, em termos volúmicos e/ou mássicos (Silva *et al.* 2012, ERSAR 2012). Ou seja, pode existir alguma capacidade de encaixe de afluências pluviais ou industriais nas ETAR, mas não existem ferramentas credíveis e generalizadas de apoio à gestão sustentada dessas afluências, sendo imperativo estudar o efeito das variações de caudal e concentração no funcionamento dos órgãos das ETAR.

Empresas, reguladores e organismos de financiamento têm utilizado sistemas de avaliação de desempenho para apoiar as suas decisões. No entanto, a maioria dos sistemas aplicam-se à empresa como um todo e/ou focam as redes de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais e questões de financiamento (Stahre & Adamsson 2001, Alegre *et al.* 2006, Matos *et al.* 2003, Ofwat 2004, World Bank 2006). Apenas alguns (por exemplo, DWA 2008, Yang *et al.* 2010, Balmer & Hellström 2012) abordam os sistemas de água e tratamento de águas residuais. Para ultrapassar esta lacuna no conhecimento e em ferramentas práticas, o LNEC tem vindo a desenvolver o sistema de avaliação de desempenho (PAS) de ETAR concebido para medir e melhorar a eficácia e a fiabilidade, ou seja, o cumprimento, ao longo do tempo, dos requisitos de qualidade da água tratada, e a sua eficiência (em termos de utilização de recursos) e sustentabilidade (económica e ambiental), através de indicadores e índices de desempenho. A 1.^a geração do PAS foi desenvolvida no âmbito de duas teses de doutoramento e testada em quatro ETA (Vieira *et al.* 2008, 2010) e duas ETAR (Quadros *et al.* 2010a,b). A 2.^a geração surgiu no âmbito do projeto PAST21, envolvendo 18 instituições, 17 ETAR e 10 ETA (Rosa *et al.* 2010, Silva *et al.* 2012). Os indicadores e os índices são ferramentas de avaliação e melhoria do desempenho, mas ambos requerem o estabelecimento de valores de referência. Apesar de serem elementos cruciais, os valores de referência precisavam de ser definidos para avaliar e melhorar aspetos fundamentais do desempenho, como a eficiência energética.

Esta temática foi desenvolvida no âmbito da tese de doutoramento onde a presente comunicação se enquadra. O principal objetivo da tese consistiu no desenvolvimento da terceira geração de indicadores e índices para *benchmarking* de ETAR, ou seja, para avaliação e melhoria do seu desempenho, focando os principais objetivos da ETAR, ou seja, garantir a sustentabilidade técnica, económica e ambiental dessas infraestruturas, assegurando um tratamento eficaz e fiável com um consumo otimizado de energia, reagentes e produção de lamas. Os principais desenvolvimentos da

terceira geração foram a proposta de valores de referência que, sempre que aplicável, incorporam o efeito de parâmetros chave que quantificam o efeito das variações de caudal e concentração.

Na presente comunicação apresenta-se resumidamente a estratégia e a abordagem desenvolvida para cada objetivo de avaliação de desempenho: eficácia, eficiência e fiabilidade, energia e gestão de lamas. As métricas (indicadores e índices) e os valores de referência são apresentados detalhadamente na tese (Silva 2016) e nas publicações associadas (Silva *et al.* 2014a, b, Silva e Rosa 2015).

2 ESTRATÉGIA DE INVESTIGAÇÃO

A estratégia de investigação adotada na tese de doutoramento visou fornecer um sistema de avaliação de desempenho para *benchmarking* de ETAR, focando a eficácia e a fiabilidade da estação, o desempenho energético e a gestão de lamas. Para o efeito, o sistema de avaliação assenta em duas componentes principais (Silva *et al.* 2012), a Avaliação de desempenho global e a Avaliação de desempenho operacional (Figura 1). A primeira baseia-se em indicadores de desempenho (PI) que avaliam a instalação como um todo, numa base anual. A segunda baseia-se em índices de desempenho (PX) concebidos para avaliar e melhorar o desempenho diário de cada etapa de tratamento em termos de qualidade da água residual tratada, eficiência de remoção e funcionamento dos órgãos. Estas métricas (PI e PX) estão definidas na Figura 1.

Enquanto os PI não emitem juízo em termos do maior ou menor desempenho, sendo necessária a comparação com os valores de referência, nos PX os valores de referência são intrínsecos às funções de desempenho que convertem as variáveis de estado (concentrações à saída, eficiências de remoção e condições de operação) em índices na escala 0-300: 300 corresponde a desempenho "excelente"; valores entre 300 e 200 traduzem desempenhos "bons"; valores entre 200 e 100 "aceitáveis"; o valor 100 corresponde ao desempenho "mínimo aceitável"; valores inferiores a 100 traduzem um desempenho "insatisfatório" e um índice zero significa que há "ausência" ou interrupção da função. As funções de desempenho (**Figura 1**) são definidas pelos valores de referência de cada nível de desempenho, ou seja, R_0 , R_{100} (para o desempenho mínimo aceitável), R_{200} (bom desempenho) e R_{300} (desempenho excelente).

Para ambas as métricas (PI e PX), os valores de referência são os principais elementos para julgar o desempenho e foram desenvolvidos para definir um gráfico de desempenho intuitivo e com facilidade de leitura, em modo "semáforo", onde o verde (●) representa desempenho bom, o amarelo (●) representa desempenho aceitável e o vermelho (●) representa desempenho insatisfatório (Figura 1).

A estratégia seguida consistiu em desenvolver ou selecionar, a partir da segunda geração do PAS, subconjuntos de PI e PX de acordo com os objetivos de avaliação, e derivar os seus valores de referência com base em dados da literatura, equações empíricas e/ou estudos de campo. Os dados recolhidos no âmbito do PAST21 (Silva *et al.* 2012) para 17 ETAR, num período de 5 anos, foram processados de acordo com estes objetivos. Para cada objetivo, os indicadores e índices foram agrupados em dois níveis: os PI e PX chave que visam responder aos objetivos, e um segundo nível de indicadores e índices, que fornecem informação complementar. Subconjuntos

de PI e PX foram então aplicados a 8 ETAR para verificar a sua adequação e aplicabilidade para diferentes objetivos de desempenho. Finalmente, o sistema como um todo foi validado para uma ETAR, no período 2013-2015.

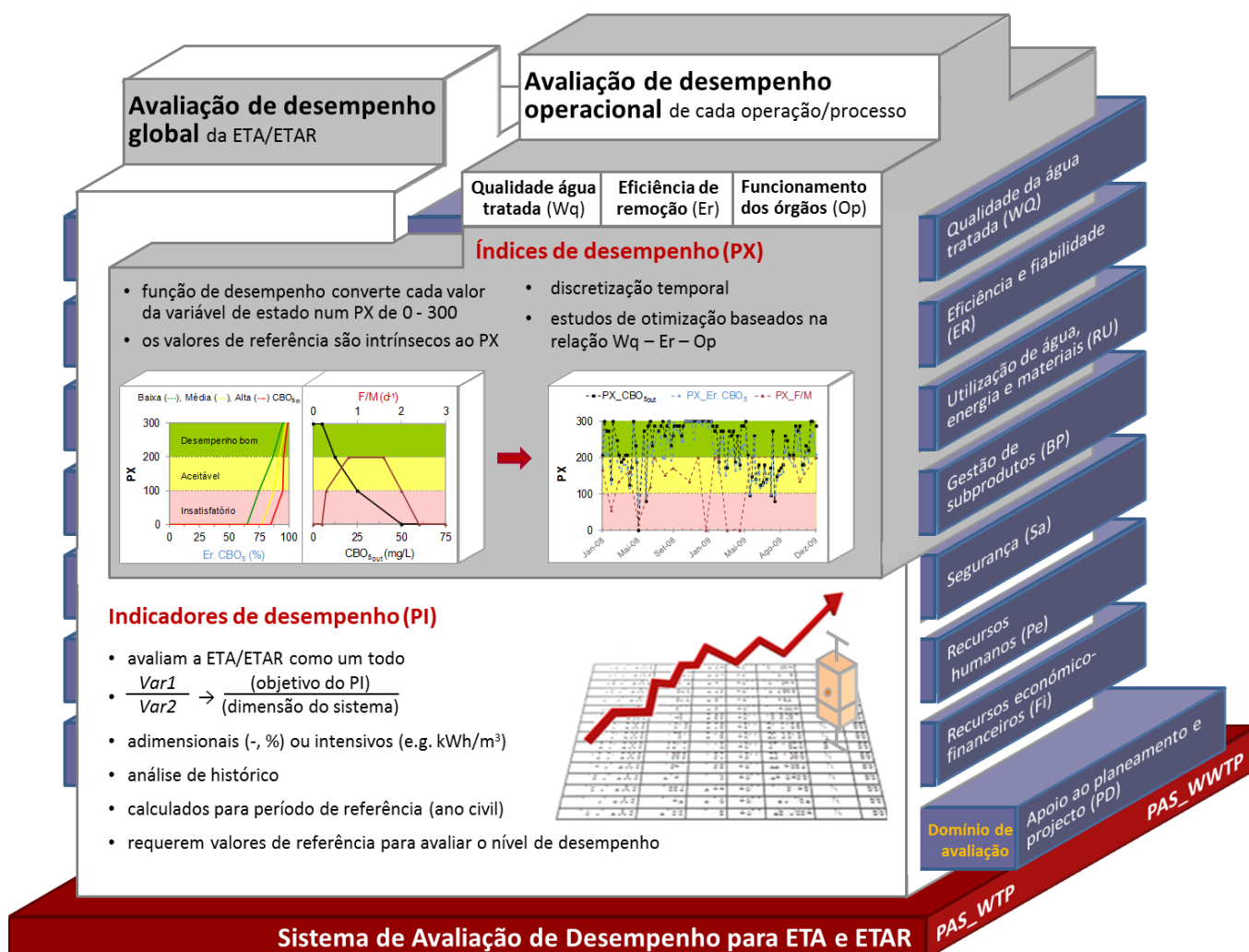


Figura 1. Estrutura do Sistema de Avaliação de Desempenho (PAS) e características principais dos indicadores e dos índices de desempenho

3 OBJETIVOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

3.1 Eficácia

Para a eficácia da ETAR foi desenvolvida uma ferramenta que avalia a qualidade da água residual tratada e foram propostos os valores de referência dos PI e PX com base na legislação da União Europeia (Figura 2, Silva et al. 2014a).

Os índices de qualidade da água tratada complementam a informação dada pelos indicadores deste domínio de avaliação. Enquanto os indicadores (Figura 2b) avaliam a eficácia do tratamento no período de referência expressando a conformidade da água tratada com os critérios estabelecidos, os índices de desempenho (Figura 2c) permitem avaliar e melhorar a eficácia da ETAR ao longo do tempo (fiabilidade) e comparar facilmente o desempenho de diferentes parâmetros (Figura 2d) em diferentes anos (Figura

2e) e identificar quando e quão perto ou longe cada valor de concentração (Figura 2a) ficou do valor objetivo, com a discretização temporal das variáveis de estado. Para os índices de qualidade de água tratada, as variáveis de estado correspondem aos valores de concentração dos parâmetros de qualidade físico-química (Figura 2a) ou microbiológica da água tratada e os valores de referência baseiam-se no valor-limite (VL) para o parâmetro à saída da ETAR (exemplo da função de desempenho de CBO₅ na Figura 1).

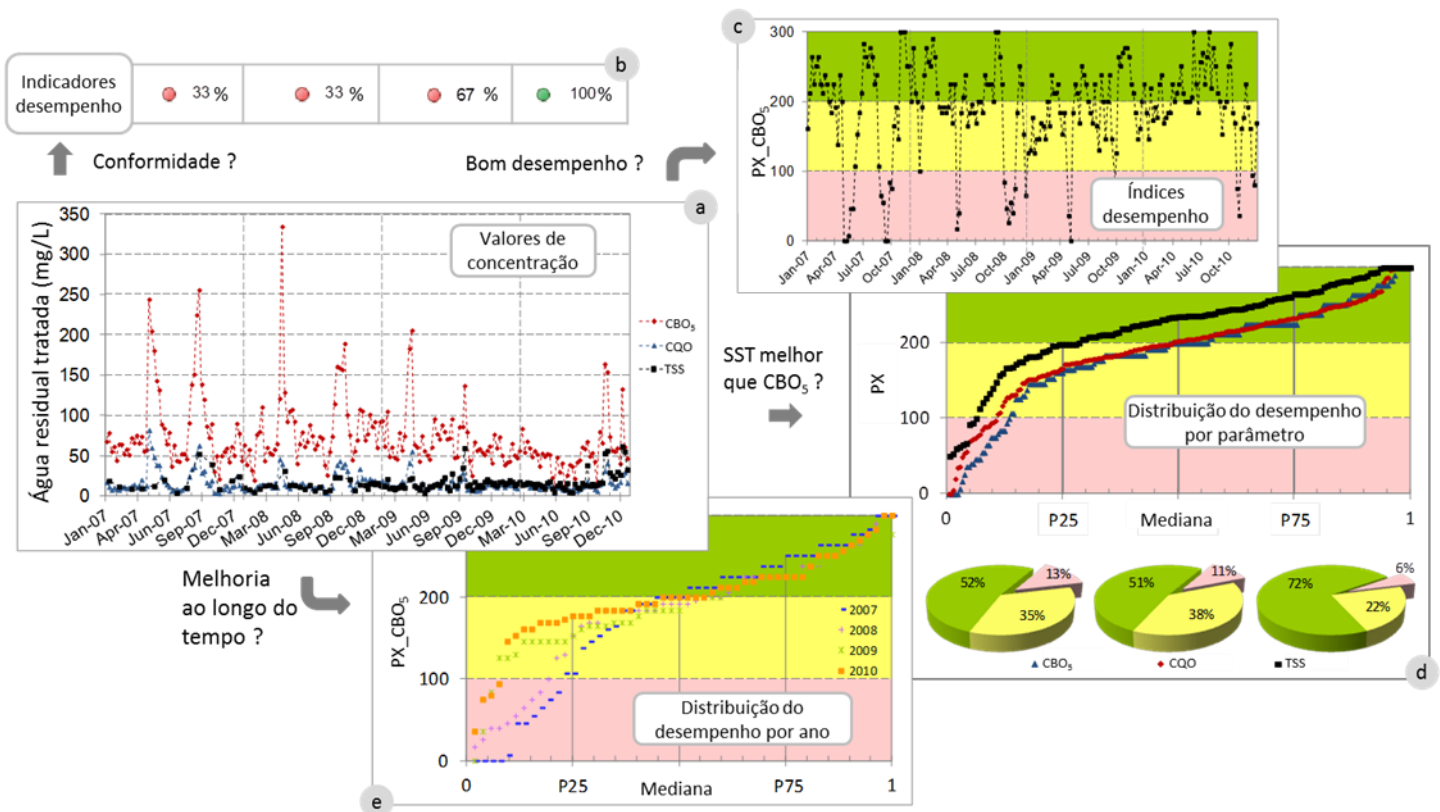


Figura 2. Indicadores e índices de qualidade da água tratada (adaptado de Silva *et al.* 2014a)

Foi também desenvolvida uma análise estatística (de percentis) dos PX para avaliar a fiabilidade da ETAR, análise que também pode fornecer dados para avaliação do risco (Silva *et al.* 2014a). A Figura 2 mostra a distribuição de percentis dos PX de CBO₅ em cada ano (Distribuição do desempenho por ano) e para cada parâmetro (CBO₅, CQO e SST), num período de 4 anos (distribuição do desempenho por parâmetro). Quanto menor o declive, ou seja, quanto mais próximos estão os percentis 25 (P25) e 75 (P75) da mediana, melhor é a fiabilidade da ETAR. Se a mediana corresponde a um desempenho aceitável, [100; 200[, um perfil horizontal indica um tratamento eficaz e fiável. Estes perfis podem ainda indicar oportunidades de melhoria do desempenho técnico e económico da ETAR. Tecnicamente, o desempenho melhora diminuindo o declive do perfil (Distribuição do desempenho por ano); economicamente, melhora, por exemplo, através da redução do nível de desempenho, dentro do desempenho aceitável (gama amarela), resultando assim numa poupança de gastos.

A percentagem de PX em cada nível de desempenho (gráfico circular, Figura 2) é também uma informação valiosa e mostra diretamente a percentagem

dos valores de concentração que excederam o PV – informações complementares à análise de conformidade feita pelos indicadores.

3.2 Eficiência e fiabilidade

Em relação à eficiência e fiabilidade do tratamento, foram desenvolvidos índices de eficiências de remoção de cada unidade ou etapa de tratamento da ETAR encarada como um sistema de barreiras múltiplas. Dados reais revelaram que a concentração afluente à etapa de tratamento é um dos parâmetros que influencia a eficiência de remoção, sendo a relação habitualmente descrita por equações do tipo $y = x/(a+bx)$. Em consequência, desenvolveu-se uma metodologia para obtenção de uma função de desempenho para cada valor de concentração. Assim, os valores de referência definidos são específicos para cada parâmetro e etapa de tratamento e têm em consideração: i) a concentração afluente (C_{in}) e os valores limite (LV); ii) dados reais de Er vs. C_{in} (que geram curvas modelo) e o limite inferior de gama típica $Er-C_{in}$. Por analogia com os índices de qualidade da água, ao R_{100} está normalmente associada a curva- Er que garante o VL à saída da etapa de tratamento, ao R_{300} associa-se a curva- Er que garante 0,2 VL e ao R_{200} a curva- Er média dos dados reais. Os valores de referência dos PI de eficiências de remoção de cada parâmetro baseiam-se em valores empíricos e na Diretiva 91/271/CEE (Silva *et al.* 2014b).

A Figura 3 exemplifica a metodologia para obtenção de uma função de desempenho para cada valor de concentração. O procedimento inicia-se com as curvas modelo Er e gama típica $Er-C_{in}$ (Figura 3a), que são então utilizadas para definir os valores de referência (R_0 a R_{300} , Figura 3b) para o desenvolvimento da função de desempenho para cada concentração afluente (Figura 3c). Dependendo da concentração afluente, uma eficiência de 80% pode corresponder a um desempenho bom, satisfatório ou insatisfatório (Figura 3d). Assim como para os índices de qualidade da água residual tratada, a distribuição de percentis dos índices de eficiências de remoção (Figura 3e) também permite analisar a fiabilidade da ETAR e de cada etapa de tratamento.

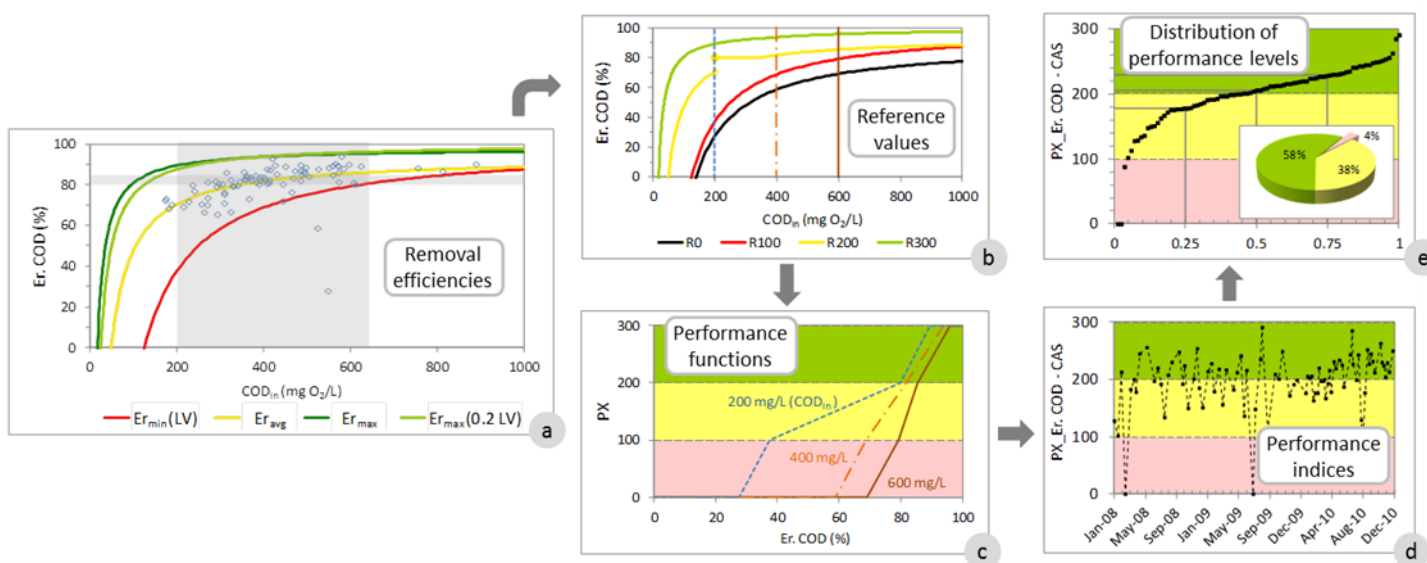
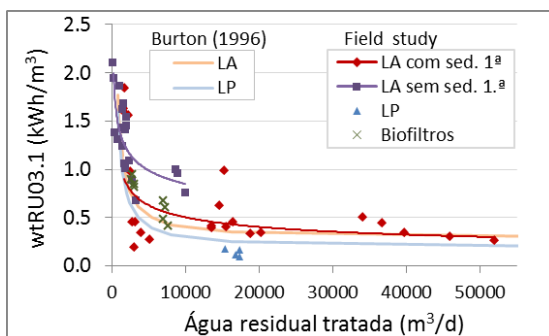


Figura 3. Eficiências de remoção para índices de desempenho (adaptado de Silva *et al.* 2014b)

3.3 Energia

Como a energia representa um dos custos mais elevados das ETAR, foi dada especial atenção ao desempenho energético, e isso refletiu-se na proposta de valores de referência que incorporam o efeito de parâmetros chave que caracterizam as variações de caudal e concentração. Os indicadores e o seu julgamento permitem identificar alertas no consumo de energia na ETAR como um todo e, em seguida, os índices permitem avaliar cada aspeto da ETAR e identificar oportunidades de melhoria. Os valores de referência propostos para o indicador de consumo específico de energia refletem a relação inversa observada entre o consumo específico de energia e o volume de água residual tratada (Figura 4) e são específicos para os sistemas de lamas ativadas (LA; convencional, com coagulação/filtração e com nitrificação) e de leitos percoladores (LP) (Silva e Rosa 2015, Silva *et al.* 2015). Os valores de referência para a produção de energia elétrica foram derivados com base no potencial de geração de metano e em dados bibliográficos.



wtRU03.1 – Consumo de energia [kWh/m³]

Leitos percoladores (LP)

Lamas ativadas (LA)

●	$\leq 0.185 + 1127/TW$	$\leq 0.280 + 1192/TW$
●	$]0.185 + 1127/TW;$ $0.231 + 1409/TW[$	$]0.280 + 1192/TW;$ $0.350 + 1490/TW[$
●	$\geq 0.231 + 1409/TW$	$\geq 0.350 + 1490/TW$

Figura 4. Consumo de energia vs. volume de água residual tratada e tipo de tratamento (esquerda) e valores de referência para LP e LA (direita) (adaptado de Silva e Rosa 2015)

Em relação aos índices de consumo de energia em cada uso na ETAR, os valores de referência propostos dependem, naturalmente, dos valores de dimensionamento e do projeto da ETAR (volumes dos órgãos, alturas de elevação) e das flutuações diárias de caudal e concentração. Os usos relacionados com o bombeamento, ou seja, o bombeamento principal, a extração de lamas na decantação primária, a recirculação no tratamento biológico e a extração de lamas em excesso, dependem da altura de elevação da bomba. A extração de lamas dos reatores de lamas ativadas também depende do tempo de retenção hidráulico. A recirculação nos leitos percoladores também depende da concentração afluyente e da concentração-objetivo à saída, da carga orgânica ou da carga hidráulica. Os valores de referência para a mistura em zonas arejadas, anóxicas e anaeróbias e em bacias de igualização dependem do tempo de retenção hidráulico, enquanto para a mistura rápida e floculação dependem do tempo de retenção e da temperatura. Em relação ao arejamento no tratamento biológico por lamas ativadas (Figura 5), os valores de referência são função da concentração de CBO₅ afluyente (CBO₅), da produção de lamas e da transferência de oxigénio (N), que varia com o tipo de arejador (N₀), da temperatura, do oxigénio dissolvido e da altitude. A produção de lamas varia com os sólidos suspensos no licor misto (X), a idade das lamas (θ_c) e o tempo de retenção hidráulico (θ). A Figura 5 apresenta os valores de referência do consumo de energia no arejamento e exemplifica a sua variação com a concentração afluyente de

CBO₅. Por exemplo, para uma concentração afluyente de 100 mg/L o consumo de energia de 100 Wh/m³ representa um desempenho insatisfatório, enquanto o mesmo consumo de energia com uma concentração afluyente de 200 mg/L corresponde a um desempenho bom. Esta avaliação permite identificar oportunidades de melhoria na operação diária das infraestruturas, ou ineficiências de equipamentos, permitindo apoiar a sua seleção e dimensionamento (Silva 2016).

Consumo de energia no arejamento (LA) [Wh/m³]

Arejadores mecânicos

- $\frac{CBO_5}{0.68 N} - 1.42 \frac{X\theta}{\theta_c N}$
- 1.5 R₂₀₀ ou 30 θ (o maior)
- 2 R₂₀₀ ou 40 θ (o maior)

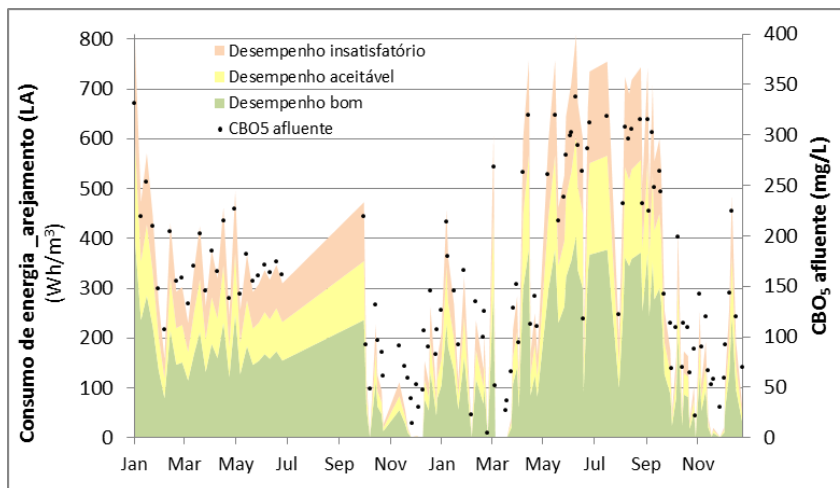


Figura 5. Valores de referência de consumo de energia no arejamento e exemplo da sua variação com a concentração afluyente de CBO₅ (adaptado de Silva 2016)

3.4 Gestão de lamas

A gestão das lamas é complexa e tem um custo significativo associado à deposição das lamas e ao consumo de energia e de floculante no tratamento das lamas. Os PI chave propostos cobrem a produção de lamas (wtBP01.1 em kg/m³ e wtBP02.2 em kg/kg CBO₅) e concentração em matéria seca (wtBO08 em % MS), o destino final e valorização, a conformidade da qualidade para uso agrícola e os gastos. Os PI complementares caracterizam a fiabilidade e o consumo de reagentes. Desenvolveu-se outro PI chave para avaliar a recuperação de fósforo, através da valorização das lamas e da água reutilizada na agricultura. Os resultados do estudo com as 17 ETAR foram usados para derivar os valores de referência dos PI em que estes valores não são inerentes à formulação do PI nem se baseiam na literatura. Foram analisados *clusters* por tipo de lama (primária, lama ativada, de leito percolador e mista), tipo de digestão e de desidratação e foram propostos os valores de referência para a produção de lamas e para o teor em matéria seca para dois *clusters*: ETAR com decantação primária, LA ou biofiltros, digestão anaeróbia de lamas e desidratação centrífuga; ETAR com sistemas LA, sem decantação primária, sem digestão anaeróbia e com desidratação centrífuga (Figura 6) (Silva et al. 2016a).

Os PX chave correspondem à % MS após cada unidade de processamento e os PX complementares ao consumo de energia e às condições de operação que determinam estas concentrações (expressas em % MS). Os valores de referência são específicos para o método de tratamento e baseados na literatura. O sistema de PI e PX foi aplicado a uma ETAR e os resultados demonstraram que este diagnostica a situação e indica oportunidades e medidas de melhoria do desempenho da produção de lamas (Silva et al. 2016a).

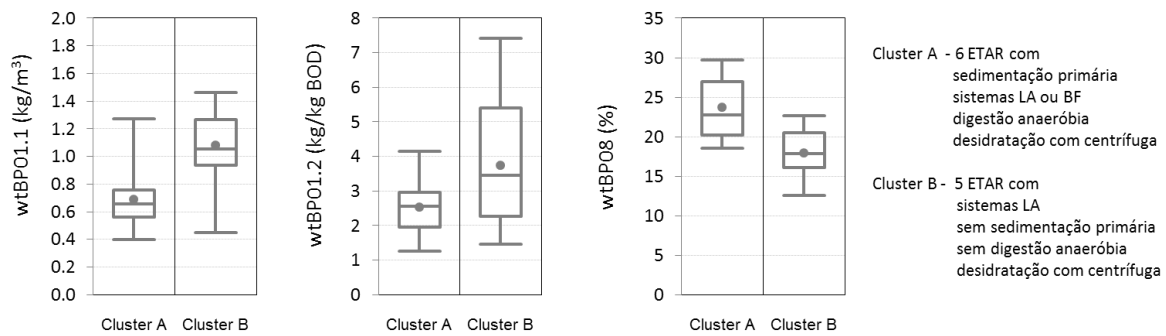


Figura 6. Valores de referência de consumo de energia no arejamento e exemplo da sua variação com a concentração afluente de CBO_5 (adaptado de Silva *et al.* 2016a)

4 APLICAÇÃO

Uma vez desenvolvida e calibrada a 3.^a geração do PAS para ETAR, validou-se a sua aplicabilidade e flexibilidade em 8 ETAR que operam em diferentes contextos climáticos, capacidades e sequências de tratamento. Foram definidos cinco objetivos: i) avaliar a eficácia e fiabilidade da ETAR, o seu desempenho energético e a produção de lamas; ii) avaliar o desempenho operacional da sedimentação primária convencional e avançada; iii) comparar, para o mesmo afluente, os sistemas de lamas ativadas e leitos percoladores em termos de eficácia, desempenho energético e produção de lamas; iv) avaliar o desempenho energético global da ETAR e v) contribuir para melhorar o balanço de carbono em ETAR. De acordo com os objetivos, foram selecionados os conjuntos adequados de PI e PX (Silva 2016, Silva *et al.* 2016b).

Finalmente aplicou-se todo o sistema de avaliação de desempenho ilustrando a abordagem passo a passo proposta para diagnóstico de oportunidades de melhoria contínua do desempenho de uma ETAR, utilizando os PI e PX em ciclos PDCA ("plan-do-check-act", Figura 7).

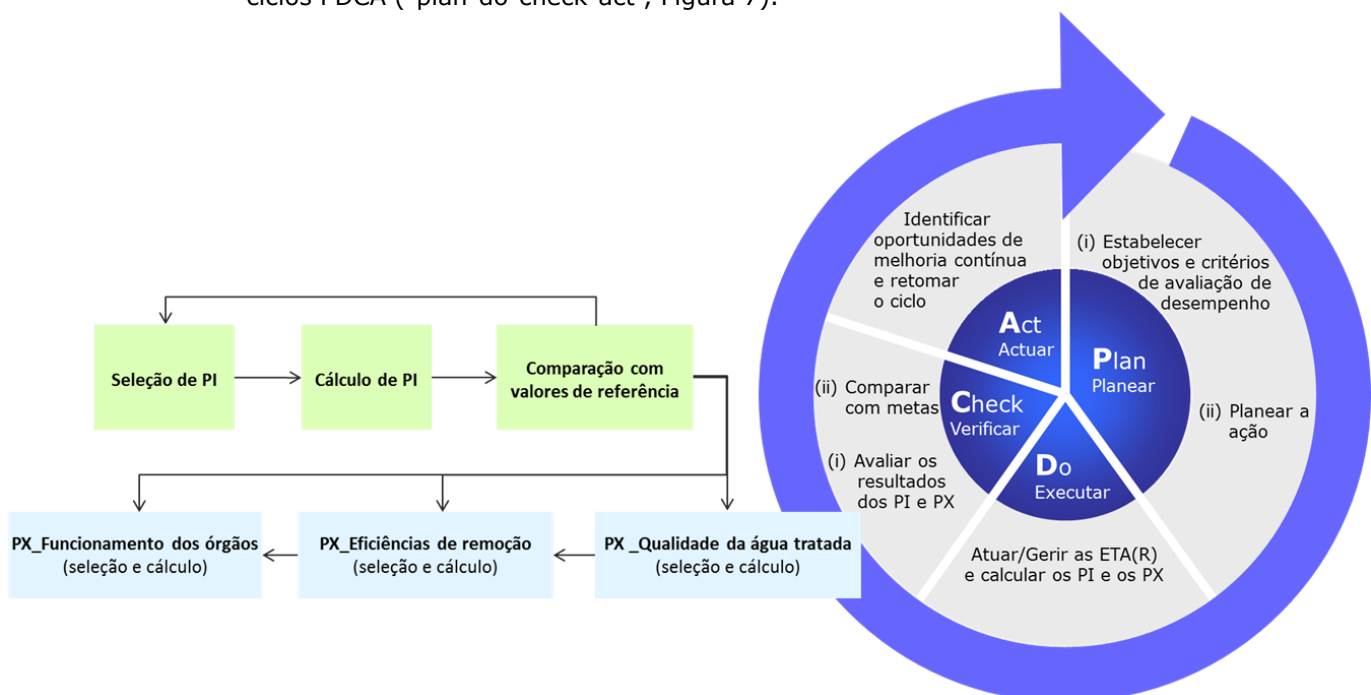


Figura 7. Ciclo PDCA (Plan-Do-Check-act) adaptado para *benchmarking* de ETA (à direita) e a metodologia de aplicação do PAS (à esquerda) (adaptado de Silva 2016)

Os resultados do desempenho global para cada objetivo estão apresentados em gráficos de "donut" (Figura 8). Cada parte do "donut" representa um indicador chave, onde a fatia verde significa "bom" desempenho, amarelo desempenho "aceitável" e vermelho desempenho "insatisfatório".

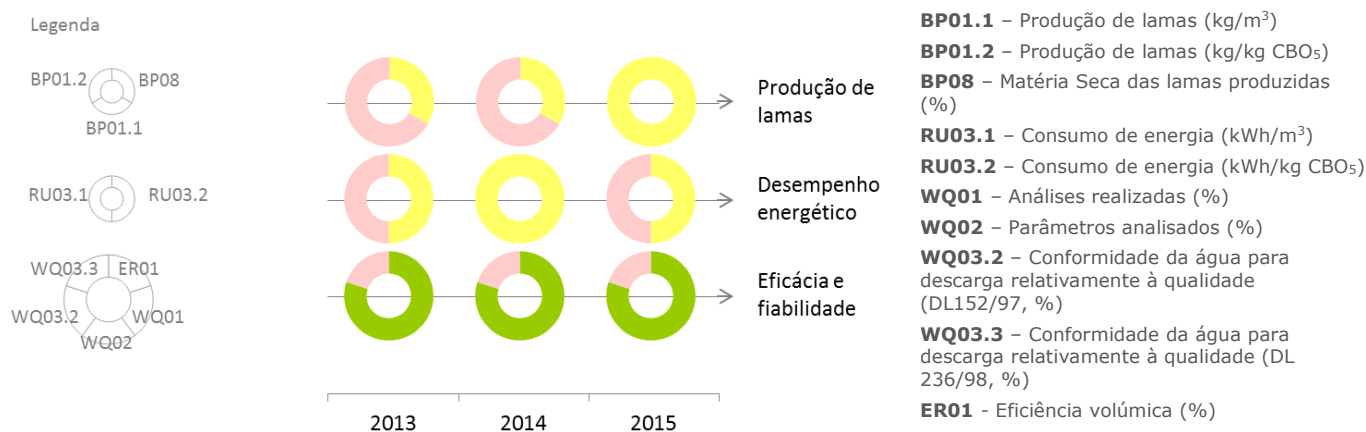


Figura 8. Vista geral do desempenho da ETAR em cada objetivo (adaptado de Silva 2016)

5 CONCLUSÃO

Na presente comunicação apresentou-se resumidamente a estratégia e a abordagem desenvolvida para cada objetivo de avaliação de desempenho de ETAR: eficácia, eficiência e fiabilidade, energia e gestão de lamas. A estratégia seguida consistiu em desenvolver ou selecionar a partir da segunda geração do PAS subconjuntos de indicadores e índices de desempenho de acordo com os objetivos, e demonstrar a flexibilidade do sistema de avaliação para diferentes objetivos, numa abordagem de diagnóstico de oportunidades de melhoria do desempenho, utilizando os PI e PX em ciclos PDCA (plan-do-check-act). A terceira geração do PAS permite estudar o efeito das variações de caudal e concentração poluente na operação de ETAR e no seu desempenho. Ajuda, assim, a suportar a tomada de decisão na gestão de aflúncias pluviais ou industriais, e na reabilitação das ETAR, em capacidade hidráulica e nível de tratamento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (Bolsa de Doutoramento, SFRH/BD/80295/2011) e pelo programa LIFE+ da União Europeia ao abrigo do acordo LIFE14 ENV/PT/000739 (LIFE IMPETUS). Os autores agradecem ainda ao consórcio do projeto PAST21 pelo fornecimento de dados das 17 ETAR cujos resultados foram analisados.

REFERÊNCIAS

Alegre H., Melo Baptista J., Cabrera Jr E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W. & Parena R. (2006). *Performance Indicators for Water Supply Services*, 2nd edition. Manual of Best Practices Series. IWA Publishing, London, UK

- Balmer P., Hellström D. (2012). Performance indicators for wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 65(7) 1304-1310. doi: 10.2166/wst.2012.014
- David L., Matos J. S., Matos R. S. (2006). Avaliação do efeito de medidas de controlo de descargas de tempestade. In *Anais do 10.º ENaSB*. Cascais, Outubro
- DWA (2008). *Corporate Benchmarking – Metric Benchmarking as Component of the Modernisation Strategy – Performance Indicators and Evaluation Principles*. DWA German Association for Water, Wastewater and Waste (A. Schulz as Spokesperson of the working group), Germany
- ERSAR (2012). *RASARP – Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal. Volume 3 – Avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, Lisboa
- Ferreira F., Matos J. S. (2012). Caracterização da qualidade de águas pluviais na cidade de Lisboa. In *Anais do 15.º ENaSB*, Évora, Outubro
- Matos R., Cardoso A., Ashley R., Duarte P., Molinari A. & Schulz A. (2003). *Performance Indicators for Wastewater Services*. Manual of Best Practices Series. IWA Publishing, London, UK
- Ofwat (2004). *Updating the Overall Performance Assessment (OPA) – Conclusions and Methodology for 2004–05 Onwards*. UK Office of Water Services, Birmingham, UK
- PG&E (2003). *Municipal Wastewater Treatment Plant Energy Baseline Study*. Pacific Gas and Electric Company (PG&E), San Francisco, CA, USA
- Quadros S., Rosa M.J., Alegre H., Silva C. (2010a). A performance indicators system for urban wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 62(10) 2398-2407. doi: 10.2166/wst.2010.526
- Quadros S., Rosa M. J., Alegre H., Silva C., Ramalho P. (2010b). Avaliação de desempenho operacional de ETAR urbanas. In *Anais do 14.º ENaSB/14.º SILUBESA*. Porto, Outubro
- Rodriguez-Garcia G., Molinos-Senante M., Hospido A., Hernández-Sancho F., Moreira M. T., Feijoo G. (2011). Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research* 45(18) 5997-6010. doi: 10.1016/j.watres.2011.08.053
- Rosa M. J., Ramalho P., Silva C., Vieira P., Quadros S., Alegre H. (2010). PAST21 – Iniciativa Nacional de Avaliação de Desempenho de ETA e ETAR Urbanas. In *Anais do 10.º Congresso de Água*. Alvor (Algarve), Março
- Silva C., Ramalho P., Quadros S., Alegre H., Rosa M. J. (2012). Results of 'PAST21' - the Portuguese initiative for performance assessment of water and wastewater treatment plants. *Water Science and Technology - Water Supply* 12(3) 372-386. doi: 10.2166/ws.2012.004
- Silva C., Quadros S., Ramalho P., Rosa M. J. (2014a). A tool for assessing treated wastewater quality in urban WWTPs. *Journal of Environmental Management* 146, 400-406. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.03.028
- Silva C., Quadros S., Ramalho P., Alegre H., Rosa M. J. (2014b). Translating removal efficiencies into operational performance indices of wastewater treatment plants. *Water Research* 57, 202-214. doi: 10.1016/j.watres.2014.03.025
- Silva C., Rosa M. J. (2015). Energy performance indicators of wastewater treatment - a field study with 17 Portuguese plants. *Water Science and Technology* 72(4) 510-519. doi: 10.2166/wst.2015.189

- Silva C., Alegre H., Rosa M. J. (2015). Chapter 3. Introduction to energy management in wastewater treatment plants. In *Sewage Treatment Plants: Economic Evaluation of Innovative Technologies for Energy Efficiency*. Eds. K.P. Tsagarakis and K. Stamatelatou. IWA Publishing, London, UK
- Silva C. (2016). *Assessing and improving wastewater treatment performance. A contribution to the 3rd generation of the assessment system*. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente. Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa
- Silva C., Saldanha Matos J., Rosa M. J. (2016a). Performance indicators and indices of sludge management in wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management* (submetido)
- Silva C., Saldanha Matos J., Rosa M. J. (2016b). A comprehensive approach for diagnosing opportunities for improving the performance of a WWTP. *Water Science and Technology* (in press)
- Stahre P., Adamsson J. (2001). Performance benchmarking: A powerful management instrument for water and wastewater utilities. *Water Technology* 12, 47-77
- Vieira P., Alegre H., Rosa M. J., Lucas H. (2008). Drinking water treatment plants assessment through performance indicators. *Water Science and Technology - Water Supply* 8(3), 245-253. doi: 10.2166/ws.2008.068
- Vieira P., Rosa M. J., Alegre H., Lucas H. (2010). Assessing the operational performance of water treatment plants – focus on water quality and treatment efficiency. In *Proceedings of IWA World Water Congress*. Montréal. September
- WERF (2010). *Overview of State Energy Reduction Programs and Guidelines for the Wastewater Sector*. Water Environment Research Foundation. Co-published by IWA Publishing, Alexandria, VA, USA
- World Bank (2006). *IBNET indicator definitions*. World Bank, Washington DC, USA
- Yang L., Zeng S., Chen J., He M., Yang W. (2010). Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 62(6) 1361-1370. doi: 10.2166/wst.2010.394