

II-1481 - ESTUDO COMPARATIVO: ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA TRATADA – UMA AVALIAÇÃO NUMA ETAR URBANA

Luís Marinheiro^(1*), Ruben Jorge⁽²⁾, Inês Baptista⁽²⁾, Célia Manaia⁽³⁾, Stefan Löblich⁽¹⁾

(1*) Mestre em Engenharia Biológica pela Universidade do Minho, Portugal. Engenheiro do Ambiente pela Universidade de Aveiro, Portugal. *Global Market Director* na AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda. Consultor Sênior em Engenharia do Ambiente.

Endereço: (1): AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda., Rua do Bairro 400, 4485-010 Aveleda, Portugal; e-mail: lmarinheiro@ast-ambiente.com

(2): Wedotech, Lda., Rua do Seixal n.º 108, 4000-521 Porto, Portugal.

(3): Universidade Católica Portuguesa, CBQF - Centro de Biotecnologia e Química Fina – Laboratório Associado, Escola Superior de Biotecnologia, Rua de Diogo Botelho 1327, 4169-005 Porto, Portugal

RESUMO

A escassez de água potável é um problema transversal que torna urgente explorar fontes alternativas para usos não potáveis. As águas residuais tratadas são, neste contexto, uma fonte alternativa de água muito relevante, podendo ser reutilizadas para diversos usos. O presente estudo teve por objetivo investigar e comparar a aplicação de diversas tecnologias de tratamento terciário, e suas combinações, para produção de água para reuso (ApR) com qualidade diferenciada. Foram conduzidos ensaios à escala piloto e industrial em condições reais numa ETE urbana, com aplicação de tecnologias de tratamento com diferentes mecanismos de atuação, nomeadamente processos de filtração, separação por membranas, desinfecção e oxidação avançada. Foi também explorado o potencial de aplicação de uma nova tecnologia de oxidação avançada por Plasma Não-Térmico (PNT). Obtiveram-se ApR com qualidade diversificada, com diferentes classes de qualidade para rega e usos em contexto urbano, segundo as normas de qualidade portuguesas, e com diferentes custos.

PALAVRAS-CHAVE: Efluentes Sanitários e Industriais: caracterização, coleta, tratamento, disposição, reuso, lodo e biossólidos.

INTRODUÇÃO

A escassez de água potável é um problema transversal que torna necessário explorar fontes alternativas para usos não nobres, como a reutilização de águas residuais tratadas. Embora o Brasil seja considerado um país rico em água, há um grande desequilíbrio com zonas secas, como o Nordeste, e outras com limitações hídricas de grande concentração de população, como no Sudeste [1]. Em 2018, a estimativa de reuso de águas no Brasil era de 2 m³/s, mas com potencial para aumentar entre 10-15 m³/s em 2030 e no longo prazo até 175 m³/s [2]. Vários desafios se apresentam neste caminho, desde a regulação até à gestão tecnológica desta prática [2]. Embora já existam alguns exemplos de sucesso de produção de ApR no Brasil, como o projeto Aquapolo [3], as ETE convencionais não estão atualmente equipadas para produzir ApR de qualidade compatível com os mais rigorosos padrões de reutilização [4]. O setor do tratamento de águas residuais precisa assim de soluções de tratamento complementares e econômicas para melhorar a qualidade e poder produzir ApR para fazer face às necessidades hídricas não-potáveis.

Recentemente, a aplicação de plasma não térmico (PNT) tem ganho visibilidade devido ao seu potencial de formar um amplo espectro de fenômenos físicos e químicos de espécies oxidantes, o que permite uma ação mais diversificada e eficaz sobre os diversos contaminantes a ser tratado [5;6]. Esta tecnologia opera com ar ambiente e sem consumo de reagentes, o que é vantajoso face a outras tecnologias terciárias. Apesar destas vantagens, as aplicações de PNT em ambiente real para desinfecção de águas residuais são ainda muito limitadas, embora estudos à escala laboratorial tenham demonstrado potencial na remoção de *E. coli*, com águas artificiais [7; 8].

Os estudos práticos e comparáveis de diferentes tecnologias para produção de ApR, a partir de águas residuais, e conduzidos à escala industrial/piloto são escassos, e a qualidade do efluente à entrada destas tecnologias é diferente entre estudos, o que condiciona comparações. Este trabalho propôs-se a fazer uma avaliação comparativa entre várias tecnologias terciárias com diferentes tipos de ação (membranas, filtração, e oxidação avançada), aplicadas no mesmo efluente de uma ETE, incluindo a investigação de uma tecnologia inovadora e emergente no tratamento de água - o PNT.

O presente estudo teve como objetivo investigar e comparar a aplicação de diferentes tecnologias de tratamento terciário para a produção de ApR, com avaliação de qualidade obtida e custos operacionais. Este estudo foi desenvolvido *in loco* numa ETE, com unidades de tratamento à escala piloto e industrial, todas testadas em condições reais equivalentes com efluente secundário da ETE. Estes incluíram ozônio, ultrafiltração e osmose reversa. O tratamento terciário já existente na ETE selecionada, com filtração de areia com coagulação e desinfecção UV, foi também incluído neste estudo comparativo. Adicionalmente, a aplicação da tecnologia inovadora de plasma não-térmico (PNT) foi também investigada à escala piloto para produção de ApR. Os resultados obtidos para a qualidade da ApR foram avaliados em função dos requisitos da legislação portuguesa publicada em 2019 para reutilização de água [9].

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado numa ETE urbana em Portugal servindo 300.000 habitantes, com caudal médio de 70.000 m³/dia, com tratamento secundário por lodos ativados.

As tecnologias testadas foram as seguintes:

- Filtros de areia (FA) multicamada compostos por duas unidades em série com capacidade unitária de 100 m³/h, combinado com o doseamento de coagulante (sulfato de alumínio). Unidade de desinfecção por ultravioleta (UV) do tipo aberto, com lâmpadas de arco de mercúrio de baixa pressão de disposição horizontal, com capacidade de 100 m³/h, dose de 190 microWatts/cm² a 1 m.
- Microfiltração (MF) à escala piloto (AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda.), com caudal médio de processamento de 2,5 m³/h, e equipada com 2 elementos filtrantes caracterizados por elementos de feixe de fibras com porosidade de 5 µm.
- Ultrafiltração (UF) contentorizada, com escala industrial (AQUASMART – Water and Wastewater Treatment Solutions, Lda.), equipada com 128 módulos de UF submersos, com superfície total de filtração ativa de 768 m² e caudal médio de 10 m³/h. As membranas de fibra oca operam no modo de fora para dentro.
- Nanofiltração (NF), à escala piloto, composta por membranas do tipo espiral, com poros de dimensão 150-300 Dalton, área total ativa de 26,4 m², e caudal médio de 1,8 m³/h.
- Osmose inversa (OI), à escala piloto (AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda.), é composta por membranas do tipo espiral, com área total ativa de 57 m², e caudal médio de processamento de 2,2 m³/h.
- Ozonização (De Nora), composta por um gerador de ozônio, a partir do ar ambiente, e um reator de coluna de bolhas onde se efetua a mistura gás-efluente. O caudal médio é de 1,2 m³/h.
- Plasma não-térmico (PNT) na forma de um reator com um gerador de plasma (modelo IXS-500-KISS, SFC) alimentado por um compressor de ar ambiente. O plasma gerado na fase gasosa é distribuído num tanque com 50 L de capacidade para o efluente, através de uma mangueira difusora instalada no fundo do tanque. Todos os testes com PNT foram realizados em modo *batch*, e utilizando um pré-tratamento do efluente por filtros de areia com coagulação.

Foram recolhidas amostras pontuais e simultâneas de água antes e após tratamento com as tecnologias, ou combinações, testadas. As análises físico-químicas foram realizadas por laboratório acreditado de acordo com as metodologias do *Standard Methods*.

Os resultados apresentados para cada configuração testada correspondem à média ± desvio padrão de pelo menos 3 amostragens ($n \geq 3$) realizadas em dias diferentes. Os resultados obtidos das ApR produzidas foram comparados com as normas de qualidade constantes no Decreto-Lei Português n.º 119/2019, de 21 de Agosto, para reutilização para rega, usos urbanos e usos industriais [9]. O custo base de energia elétrica considerado na análise de custos energético foi de 0,66 R\$/kWh.

ESTUDO COMPARATIVO: RESULTADOS DA CAPACIDADE DE TRATAMENTO

Foram conduzidos ensaios à escala piloto e industrial em condições reais numa ETE urbana, para produção de ApR a partir do efluente secundário da ETE. Foram usadas tecnologias de tratamento terciário com diferentes mecanismos de atuação, nomeadamente processos de filtração, separação por membranas, desinfecção e oxidação avançada.

Na Tabela 1 são apresentados alguns resultados selecionados da caracterização físico-química e microbiológica para as diferentes tecnologias e combinações testadas, incluindo o efluente secundário sem tratamento para comparação de qualidade.

Os resultados obtidos foram comparados com os critérios estabelecidos em Portugal para a produção e utilização de ApR em ETE (Decreto-Lei n.º 119/2019). Todas as ApR produzidas aqui reportadas tinham uma demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅) inferior ao limite estabelecido para usos urbanos de rega (≤ 10 mg O₂/L), com a exceção da microfiltração. Em relação aos sólidos suspensos totais (SST), obtiveram-se ApR com qualidade superior ao limite mais restrito (≤ 10 mg/L) para todas as configurações testadas. Assim como para o parâmetro turvação (≤ 5 NTU), com a exceção dos filtros de areia com coagulação. Em relação aos parâmetros nitrogênio total (NT) e amoniacal, todas as ApR obtidas com as diferentes combinações testadas ultrapassaram os limiares recomendados para aplicação em rega (NT ≤ 10 mg/L), com exceção da aplicação da OI, embora este seja um parâmetro facultativa e não impeditivo da utilização. Este resultado para o nitrogênio é justificado pela elevada concentração de nitrogênio no efluente secundário, e pela baixa capacidade de remoção deste parâmetro para as tecnologias testadas. A redução do nitrogênio a montante do tratamento terciário, por melhoria da nitrificação nos tanques de arejamento, seria a melhor estratégia para reduzir o teor de nitrogênio nas ApR produzidas.

Tabela 1: Resultados selecionados da caracterização físico-química e microbiológica das ApR produzidas.

Parâmetro	Efluente	FA+UV	MF	UF	FA + OZ	UF+OI	FA+PNT
pH	7,6±0,1	7,4±0,1	7,4±0,1	7,6±0,2	7,4±0,1	6,9±0,2	7,1 ±0,3
DBO ₅ [mgO ₂ /L]	13,6±5,4	6,0±4,0	10,6±1,8	5,6±3,2	5,8±1,3	3,2±0,4	8,3±4,0
SST [mg/L]	20,4±4,8	9,0±1,0	7,7±3,2	3,4±1,8	3,3±1,1	2,7±1,4	3,3±1,2
Turvação [NTU]	9,5±2,5	6,7±2,0	4,4±1,7	1,0±1,0	1,1±0,1	0,3±0,1	1,3±0,0
NH ₄ ⁺ [mg/L]	50,7±9,0	59,4±0,7	53,9±5,0	49,6±10	52,1±7,0	2,1±0,9	38,0±0,9
NT [mg/L]	55,7±8,2	61,5±0,5	58,3±6,3	55,3±10	54,2±5,9	2,9±1,1	38,0±0,8
PT [mg/L]	2,7±0,8	3,0±0,5	2,2±0,4	2,0±0,9	0,6±0,2	<0,5±0	0,6±0,0
<i>E. coli</i> [logUFC/100mL]	5,4±0,5	5,3±0,2	5,7±0,3	0,8±0,8	0,6±0,4	0,1±0,2	1,9±0,0

Legenda: DBO₅ – demanda bioquímica de oxigênio; SST – sólidos suspensos totais; NT – nitrogênio total; PT – fósforo total.

Resultou deste estudo que a aplicação das tecnologias de membranas a partir da ultrafiltração e a ozonização permitiram obter uma ApR com qualidade microbiológica superior, compatível com a utilização de água para rega de classe A. O atual sistema de tratamento terciário existente na ETE, com filtros de areia com coagulação e UV (FA+UV), não foi eficaz para reduzir a carga microbiológica de *E. coli* e permitir a utilização da ApR diretamente para rega, indicando a necessidade de um *upgrade* tecnológico. Este resultado pode ter origem no mau dimensionamento deste equipamento à escala industrial, e/ou baixa transmitância do efluente, mesmo com pré-tratamento com filtros e coagulação. A combinação dos filtros de areia com a ozonização (FA+OZ) permitiu uma redução mais eficaz.

No âmbito deste estudo comparativo foi investigada a aplicação de uma tecnologia inovadora de PNT em batch, em combinação com filtros de areia (FA+PNT), que foi eficaz na redução de *E. coli* permitindo atingir ApR de classe B para irrigação. Este resultado foi alcançado no tratamento de uma matriz complexa como um efluente secundário, demonstrando o potencial do PNT como tratamento terciário para desinfecção de efluentes e produção de ApR. Destaca-se que atualmente na literatura apenas têm sido principalmente apresentados

resultados em aplicações à escala laboratorial e com águas sintéticas, o que enfatiza a inovação preconizada neste trabalho [7; 8].

ESTUDO COMPARATIVO: RESULTADOS DE CUSTOS OPERACIONAIS

No âmbito deste estudo, foi também realizada uma análise de custos de operação de cada tecnologia testada, incluindo consumo de energia, reagentes e consumíveis. Este estudo foi desenvolvido com base nas condições operacionais de cada tecnologia testada à escala aplicada, piloto ou industrial, e os custos foram normalizados por m³ de ApR produzida. Os resultados são apresentados na Figura 1.

Verifica-se que o ozônio foi a tecnologia testada com maior consumo energético (FA+OZ), seguida do PNT (FA+PNT). Contudo, verificou-se que as tecnologias de membranas apresentam custos mais elevados ao nível de consumíveis (novas membranas) e reagentes químicos (para lavagens). A tecnologia de filtros de areia combinada com desinfecção UV (FA+UV) foi a que apresentou custo operacional global menor, mas como indicado nos resultados da Tabela 1, esta solução não é eficaz na desinfecção do efluente, e não permite a sua utilização de acordo com os requisitos legais para ApR. Neste mix de tecnologias testadas, a ultrafiltração (UF) apresenta-se como uma solução com relação custo-benefício equilibrada, produzindo uma ApR com a melhor classificação de qualidade a um custo operacional reduzido, face a outras alternativas para atingir qualidade equivalente.

Nas condições testadas, o custo operacional do PNT (FA+PNT) para produção de ApR foi de 1,67 R\$/m³ de efluente. Este custo para PNT é menor do que o apresentado por Singh *et al.* [7] de 23,40 R\$/m³, para remoção de 3 log de *E. coli* [7]. Esta é ainda uma tecnologia em desenvolvimento, e poderá haver ainda espaço para otimização de operação e custos.

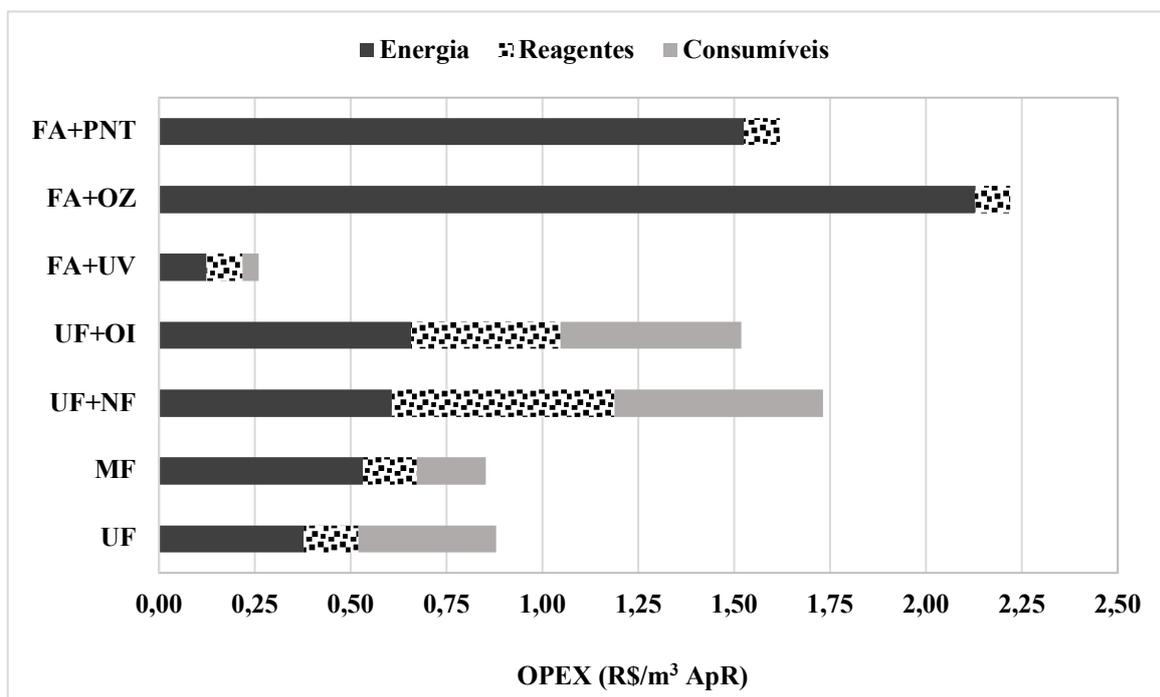


Figura 1: Comparação de custos operacionais (OPEX) para as tecnologias testadas.

CONCLUSÕES

Neste estudo comparativo, várias tecnologias terciárias foram aplicadas à escala piloto e industrial para produzir ApR com qualidade diferenciada, de acordo com as normas de qualidade portuguesas para reutilização de águas residuais, destacando-se a aplicação do PNT como uma tecnologia inovadora para desinfecção de efluentes.

A qualidade microbiana das várias ApR obtida foi o fator decisivo para a classificação das ApR, e definição dos usos possíveis. As tecnologias de membranas, incluindo aplicações de UF e UF+RO, e ozônio, produziram ApR com a melhor qualidade para irrigação, seguidas pelo PNT. A desinfecção UV falhou em reduzir a carga microbiana do efluente. A aplicação do PNT nas melhores condições operacionais otimizadas, permitiu uma redução de 3,2 log de *E.coli* presente no efluente secundário. Os resultados obtidos à escala piloto com o PNT demonstraram que a tecnologia tem potencial para produção de ApR e pode ser competitiva com outras tecnologias de tratamento terciário. São muito limitados os estudos realizados com PNT nesta escala, e com efluentes reais, e este estudo demonstrou o seu potencial nestas condições, contribuindo para um melhor conhecimento desta tecnologia.

Este estudo e os resultados obtidos são um contributo para o setor do tratamento de águas residuais, e para a promoção da adoção de tecnologias de tratamento terciário para a produção de ApR.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto ApR-TEC (NORTE-01-0247-FEDER-047207) financiado pelo NORTE 2020 e FEDER, ao abrigo do Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico do Portugal 2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cunha, A. H., Oliveira, T. H., Ferreira, R., Milharden, A. L., & Silva, S. (2011). O reúso de água no Brasil: a importância da reutilização de água no país. *Enciclopédia Biosfera*, 7(13).
2. Mejia, M., Carvalho de Melo, M., Santos, A.S. (2020). Reuso - Instrumento de um novo modelo de gestão de águas. *Águas do Brasil*.
3. Machado, A., 2019. SP: Projeto Aquapolo, projeto de produção de água de reúso, transforma esgoto tratado em água industrial. *EcoDebate*.
4. Silva, R., Silva P. D. S., & Silva, V. (2012). Avaliação da qualidade do efluente gerado pelas ETE do Estado de Pernambuco em relação aos contaminantes emergentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19., 2012, Búzios. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Química, 2012.
5. Vanraes V., Nikiforov, A., Leys C., (2016). Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. In *Plasma Science and Technology - Progress in Physical States and Chemical Reactions*, capítulo 16. InTech, p. 457-506.
6. Jiang, B., Zheng, J., Qiu, S., Wu, M., Zhang, Q., Yan, Z., & Xue, Q. (2014). Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*, 236, 348-368.
7. Singh, R. K., Philip, L., & Ramanujam, S. (2019). Continuous flow pulse corona discharge reactor for the tertiary treatment of drinking water: Insights on disinfection and emerging contaminants removal. *Chemical Engineering Journal*, 355, 269-278.
8. Murugesan, P., Moses, J. A., & Anandharamkrishnan, C. (2020). Performance of an atmospheric plasma discharge reactor for inactivation of *Enterococcus faecalis* and *Escherichia coli* in aqueous media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103891.
9. Decreto-Lei Português n.º 119/2019. Estabelece o regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como da sua utilização. <https://files.dre.pt/1s/2019/08/15900/0002100044.pdf>