

Adoção de tecnologias para reutilização de água tratada – uma avaliação numa ETAR urbana

*Luís Marinheiro^{a, *}, Ruben Jorge^b, Inês Baptista^b, Luísa Lopes^c, João Vilaça^c, Rui Sampaio^a, Stefan Löblich^a*

^a AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda., Rua do Bairro 400, 4485-010 Aveleda, Portugal

^b Wedotech, Lda., Rua do Seixal 108, 4000-521 Porto, Portugal

^c Simdouro, S.A., Rua Alto das Chaquedas, s/n, Canidelo, 4400-356 Vila Nova de Gaia, Portugal

Resumo

Atualmente, a escassez de água potável é um problema transversal que torna necessário explorar fontes alternativas para usos não potáveis, como a reutilização de águas residuais. O presente estudo teve por objetivo investigar e comparar a aplicação de diversas tecnologias, e suas combinações, como tratamento terciário na produção de água para reutilização (ApR), tendo em vista a obtenção de ApR com qualidade diferenciada para servir diferentes usos. Foram conduzidos ensaios à escala piloto e industrial em condições reais numa estação de tratamento de águas residuais (ETAR) urbana, com aplicação de tecnologias de tratamento com diferentes mecanismos de atuação, nomeadamente processos de filtração, separação por membranas, desinfecção e oxidação avançada. Obtiveram-se ApR com qualidade diversificada, com diferentes classes de qualidade para rega e usos em contexto urbano. A aplicação de tecnologias de separação por membrana e ozonização permitiram obter a ApR de qualidade mais elevada. A análise de comparativa de custos operacionais realizada demonstrou, nas condições testadas, que a ultrafiltração foi a tecnologia que apresentou melhor relação entre qualidade ApR e custos operacionais.

Palavras-Chave: Reutilização de água, economia circular, desinfecção, ultrafiltração, osmose inversa, ozonização.

doi: 10.22181/aer.2025.0105

* Autor para correspondência
E-mail: lmarinheiro@ast-ambiente.com

Adoption of water reuse technologies – an evaluation at an urban WWTP

Luís Marinheiro^{a,}, Ruben Jorge^b, Inês Baptista^b, Luísa Lopes^c, João Vilaça^c, Rui Sampaio^a, Stefan Löblich^a*

^a AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda., Rua do Bairro 400, 4485-010 Aveleda, Portugal

^b Wedotech, Lda., Rua do Seixal 108, 4000-521 Porto, Portugal

^c Simdouro, S.A., Rua Alto das Chaquedas, s/n, Canidelo, 4400-356 Vila Nova de Gaia, Portugal

Abstract

Currently, the scarcity of potable water is a worldwide problem that makes it necessary to explore alternative sources for non-potable uses, such as the reuse of treated wastewater. The present study aimed to investigate and compare the application of the combination of several tertiary treatment technologies, and its combinations, in the production of water for reuse (ApR), to obtain ApR with differentiated quality to serve different uses. Pilot and industrial scale tests were carried out under real conditions in an urban wastewater treatment plant (WWTP), with the application of treatment technologies with different mechanisms of action, namely filtration processes, membrane separation, disinfection and advanced oxidation. ApR were obtained with diversified quality, with different classes for irrigation and uses in urban context. The application of membrane separation and ozonation technologies allowed the production of ApR with superior quality for irrigation application. The comparative analysis of operating costs carried out demonstrated, under the tested conditions, that ultrafiltration was the technology that presented the best relationship between ApR quality and operating costs.

Keywords: water reuse, circular economy, disinfection, ultrafiltration, reverse osmosis.

doi: 10.22181/aer.2025.0105

* Corresponding author
E-mail: lmarinheiro@ast-ambiente.com

1 Introdução

Atualmente, os recursos hídricos estão sob pressão crescente, assistindo-se ao aumento da escassez da água e à deterioração da sua qualidade (EC, 2020). Neste contexto, torna-se urgente promover uma utilização mais racional deste recurso, e a exploração de fontes alternativas de água para fins não potáveis. A reutilização de água tratada das Estações de tratamento de águas residuais (ETAR) constitui uma origem alternativa, que promove uma utilização mais sustentável deste recurso, reduzindo as necessidades de captação de água e promovendo uma maior circularidade deste recurso (Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de Agosto).

O Decreto-Lei n.º 119/2019, veio estabelecer o regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como da sua utilização. Em 2021 foram tratados em Portugal mais de 700 milhões de m³ de águas residuais, no entanto apenas 1.2% deste volume de águas foi reutilizado, sendo que 87% desta reutilização foi para uso interno das entidades gestoras de águas residuais e apenas 13 % para outras aplicações (ERSAR, 2022). Em comparação, em Espanha esta percentagem de reutilização situava-se já perto dos 10% em 2016 (Jodar-Abellan et al., 2019).

Para promover a reutilização de águas tratadas (ApR), é necessário que as ETAR estejam equipadas com nível de tratamento que permita a produção de ApR compatível com os níveis de qualidade exigidos para diferentes usos. É também necessária a conjugação da flexibilidade operacional, para acomodar diferentes necessidades de utilização, com a permanente garantia da qualidade da ApR - só possível caso se disponha de tecnologia de tratamento robusta e fiável. Impõe-se assim neste sector a necessidade de se explorarem soluções complementares para o *upgrade* da qualidade e flexibilidade de tratamento nestas instalações. Adicionalmente, os custos operacionais associados a este *upgrade* tecnológico são de elevada importância para viabilizar este mercado de ApR.

Os efluentes secundários contêm contaminantes residuais que geralmente não permitem a sua aplicação direta para reutilização como ApR. Estes podem ser agrupados em 4 grupos (Metcalf e Eddy, 2014): i) partículas em suspensão e coloidais, orgânicas e inorgânica (p.ex. sólidos em suspensão - SST); ii) contaminantes orgânicos dissolvidos (e.g. CBO₅); iii) contaminantes inorgânicos dissolvidos (p.ex. azoto e fósforo); e, iv) contaminantes biológicos (p.ex. bactérias e vírus). Existem várias tecnologias de tratamento terciário com diferentes mecanismos de atuação que permitem atuar sobre esta variedade de contaminantes.

A filtração por leito granular, como filtros de areia (FA), é uma operação unitária que permite a remoção de sólidos e partículas em suspensão. Este processo consiste na passagem da água a tratar através de um meio filtrante, por ação da gravidade ou por pressurização, onde ocorre a retenção de sólidos suspensos que têm maior dimensão que os poros existentes no meio filtrante ao longo da profundidade do leito. Podem ser usados como pré-tratamento para processos de desinfecção ou oxidação avançada. Os processos de membranas permitem a separação de matéria coloidal, partículas, componentes dissolvidos (p.ex. sais, nutrientes, poluentes orgânicos), e também contaminantes biológicos (p.ex. bactérias e vírus). O elemento central destes processos é a membrana que atua como uma barreira física seletiva para os contaminantes presentes na água a tratar, permitindo, em função das suas características, a passagem ou retenção destes vários contaminantes. Com base no tamanho dos poros ou densidade das membranas, estes processos podem ser ainda classificados, por ordem decrescente de porosidade: Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF), Nanofiltração (NF) e Osmose Inversa (OI). Esta tecnologia permite remover desde sólidos em suspensão com MF até à remoção de sais com OI.

A radiação ultravioleta (UV) é a forma mais comum de radiação eletromagnética usada na desinfecção de água. Neste processo, a radiação UV penetra a parede celular dos

microrganismos e provoca danos e alterações nos ácidos nucleicos (ADN e ARN), tanto de bactérias como de vírus, o que inviabiliza os processos de síntese e replicação celular, mas sem destruição das células (Metcalf e Eddy, 2014). É recomendável operar estes sistemas UV com um pré-tratamento do efluente secundário, como filtros de areia, para reduzir partículas em suspensão e maximizar a ação da radiação.

O processo de ozonização consiste na desinfecção da água pela adição de ozono. Neste processo de desinfecção os agentes patogénicos são destruídos pela oxidação dos compostos que formam as membranas celulares e por destruição do ADN (Metcalf e Eddy, 2014). Adicionalmente, a decomposição parcial do ozono na água produz radicais $\text{OH}^\cdot$, que são altamente reativos, e que oxidam contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes na água.

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. O estudo foi desenvolvido numa ETAR urbana, com unidades de tratamento à escala piloto e industrial, todas testadas em condições reais equivalentes e com o mesmo efluente secundário da ETAR. Pretende-se ainda que os resultados obtidos sejam 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.

2 Materiais e Métodos

2.1 ETAR modelo

Este estudo foi realizado numa ETAR urbana dimensionada para uma população de 300.000 habitantes, com caudal médio de tratamento de 66.700 m^3/dia . O processo de tratamento baseia-se num sistema de tratamento por lamas ativadas em regime de arejamento convencional. O nível de tratamento da ETAR é secundário, existindo uma etapa de tratamento terciário para produção de água de serviço para uso interno, composta por filtros de areia com coagulação e desinfecção UV.

2.2 Tecnologias testadas

No âmbito deste estudo foram testados os seguintes processos de tratamento: filtros de areia (FA), desinfecção por ultravioleta (UV), microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose inversa (OI) e ozonização (OZ), que foram aplicados de forma individual ou em combinação, conforme se descreve de seguida.

Os FA multicamada, existentes na ETAR, são compostos por duas unidades em série com capacidade unitária de 100 m^3/h . Os meios filtrantes utilizados são compostos por várias camadas de materiais e granulometria, com 1.º estágio de antracite e areia siliciosa com várias granulometrias, e 2.º estágio de areia siliciosa. Esta filtração é combinada com o doseamento de coagulante sulfato de alumínio (FACg). A unidade de desinfecção ultravioleta (UV) existente na ETAR, em série e a jusante dos filtros de areia, é do tipo aberto, com lâmpadas de arco de mercúrio de baixa pressão de disposição horizontal, com capacidade de 100 m^3/h . Esta unidade é composta por um canal com 5 bancos x 8 lâmpadas, com emissão unitária de UV de 26,7 W, e dose de 190 $\text{microWatts}/\text{cm}^2$ a 1 m. Os custos operacionais de FA+UV incluem para energia os consumos com bombagem de efluente, lavagem de filtros (bomba e compressor) e funcionamento das lâmpadas UV; para reagentes o consumo de coagulante; e para consumíveis a substituição de lâmpadas UV.

A unidade de MF à escala piloto (AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda.), tem caudal médio de processamento de 2,5 m^3/h , e está equipada com 2 elementos filtrantes caracterizados por elementos de feixe de fibras com porosidade de 5 μm . Os custos operacionais de MF incluem para energia os consumos com bombagem de efluente e compressor de lavagem de

membranas; para reagentes o consumo de químicos para lavagem de membranas; e para consumíveis a substituição de membranas.

A unidade de UF contentorizada, com escala industrial (AQUASMART – Water and Wastewater Treatment Solutions, Lda.), está equipada com 128 módulos de UF submersos, com superfície total de filtração ativa de 768 m² e caudal médio de processamento de 10 m³/h. As membranas UF são de fibra oca de polietileno de alta densidade com diâmetro externo de 0,4 mm e distribuição média de tamanho de poro de 20 nm, operando no modo de fora para dentro. A desinfecção do permeado UF com hipoclorito de sódio (UF+NaOCl) foi realizada em batch num volume de 20 L com adição NaOCl (solução 5% de cloro residual) ao permeado até perfazer uma concentração de 0,5 mg/L de cloro residual. As amostras foram recolhidas após 30 minutos de tempo de contacto, e após período de armazenamento de 7 dias sem adição suplementar de NaOCl. Os custos operacionais de UF incluem para energia os consumos com bombagem de efluente e lavagem de membranas; para reagentes o consumo de químicos para lavagem de membranas; e para consumíveis a substituição de membranas.

A unidade de NF, à escala piloto (AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda.), é composta por um módulo de membrana do tipo *spiral-wound*, com poros de dimensão 150-300 Dalton, área total ativa de 26,4 m², e caudal médio de processamento de 1,8 m³/h. Os custos operacionais de NF incluem para energia os consumos com bombagem de efluente e lavagem de membranas; para reagentes o consumo de químicos para lavagem de membranas; e para consumíveis a substituição de membranas.

A unidade de OI, à escala piloto (AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Lda.), é composta por 3 módulos de membrana do tipo *spiral-wound*, com área total ativa de membrana de 57 m², e caudal médio de processamento de 2,2 m³/h. Os custos operacionais de OI incluem para energia os consumos com bombagem de efluente e lavagem de membranas; para reagentes o consumo de químicos para lavagem de membranas; e para consumíveis a substituição de membranas.

A unidade piloto de OZ (De Nora), é composta por um gerador de ozono, a partir do ar ambiente, e um reator de coluna de bolhas onde se efetua a mistura do ozono com o efluente a tratar (dose 88 gO₃/m³ e tempo de contacto de 2 minutos). O caudal médio de processamento é de 1,2 m³/h. O ozono foi aplicado no efluente secundário tratado na unidade filtros de areia descrita. Os custos operacionais com OZ incluem para energia os consumos com bombagem de efluente e gerador de ozono; e para reagentes o consumo de coagulante quando combinado em FAcg+OZ.

2.3 Amostragem e análises

Foram recolhidas amostras pontuais e simultâneas de água antes e após tratamento com as tecnologias, ou combinações, testadas. Foram recolhidas 6 amostras para cada esquema de tratamento, em diferentes dias, com a exceção de UF+NaOCl com 3 amostras recolhidas. As análises físico-químicas foram realizadas por laboratório acreditado de acordo com as metodologias do *Standard Methods* para análises de águas residuais (APHA, 2017). Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados foram os incluídos nas normas de qualidade constantes no Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de Agosto, para reutilização para rega, usos urbanos e usos industriais, que incluem pH, carência bioquímica de oxigénio (CBO₅), turvação, sólidos suspensos totais (SST), azoto total (NT), azoto amoniacal, fósforo total (PT), e *Escherichia coli* (*E. coli*).

2.4 Análise de resultados

Os resultados apresentados para cada configuração testada correspondem à média $\pm$ desvio padrão de pelo menos 3 amostragens ($n \geq 3$) realizadas em dias diferentes, com operação contínua das tecnologias. A análise estatística para apuramento da média e desvio padrão dos resultados foi realizada com recurso a Excel (versão 2406, Microsoft). Para a avaliação de custos energéticos, foi considerado para eletricidade o custo unitário de 0,12 €/kWh. Os resultados dos

custos operacionais apurados para cada esquema de tratamento testado foram normalizados pelos caudais de ApR produzidos, respetivamente, e apresentados em € por m³ de ApR produzida.

3 Resultados e Discussão

3.1 Estudo comparativo para produção de ApR

Foram conduzidos ensaios à escala piloto e industrial numa ETAR urbana, em condições reais, com aplicação de tecnologias de tratamento terciário para produção de ApR a partir de efluente secundário. Foram selecionadas para este estudo tecnologias terciárias com diferentes mecanismos de atuação, nomeadamente processos de filtração, separação por membranas, desinfecção e oxidação avançada, que foram aplicadas individualmente ou em combinação. A Figura 1 apresenta uma seleção das tecnologias testadas no âmbito deste estudo para produção de ApR.



Figura 1. Imagens das tecnologias terciárias testadas na ETAR para produção de ApR.

São apresentados no Quadro 1 alguns resultados selecionados da caracterização físico-química e microbiológica das ApR obtidas para as diferentes tecnologias e combinações testadas, incluindo o efluente secundário sem tratamento para comparação de qualidade.

Todas as ApR produzidas aqui reportadas apresentavam um nível de carência bioquímica de oxigénio (CBO₅) inferior ao limite estabelecido para usos urbanos de rega ($\leq 10 \text{ mgO}_2/\text{L}$), com a exceção da microfiltração. Em relação aos sólidos suspensos totais (SST), obtiveram-se ApR com qualidade superior ao limite mais restrito para irrigação ($\leq 10 \text{ mg/L}$) para todas as configurações testadas. Assim como para o parâmetro turvação ($\leq 5 \text{ NTU}$), com a exceção dos filtros de areia com coagulação. Em relação aos parâmetros azoto total (NT) e amoniacal, todas as ApR obtidas com as diferentes combinações testadas ultrapassaram os limiares recomendados para aplicação em rega (NT $\leq 10 \text{ mg/L}$), com exceção da aplicação da osmose inversa. Este resultado para o azoto é justificado pela elevada concentração de azoto presente no efluente secundário, e pela baixa capacidade de remoção deste parâmetro para as

tecnologias testadas. A redução do azoto a montante do tratamento terciário, por melhoria da nitrificação nos tanques de arejamento do tratamento biológico, seria a melhor estratégia para reduzir o teor de azoto nas ApR produzidas. Para irrigação, este é um parâmetro facultativo.

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

Parâmetro	Efluente	FAcg + UV	MF	UF	UF + NF	UF+ NaOCl	FAcg + OZ	UF+OI
pH	7,6±0,1	7,4±0,1	7,4±0,1	7,6±0,2	7,5±0,3	7,4±0,1	7,4±0,1	6,9±0,2
CBO ₅ [mgO ₂ /L]	13,6±5,4	6,0±4,0	10,6±1,8	5,6±3,2	3,7±2,3	4,3±0,9	5,8±1,3	3,2±0,4
SST [mg/L]	20,4±4,8	9,0±1,0	7,7±3,2	3,4±1,8	1,9±1,5	3,3±2,1	3,3±1,1	2,7±1,4
Turvação [NTU]	9,5±2,5	6,7±2,0	4,4±1,7	1,0±1,0	0,5±0,3	0,28±0,0	1,1±0,1	0,3±0,1
NH ₄ ⁺ [mg/L]	50,7±9,0	59,4±0,7	53,9±5,0	49,6±10	32,1±8,0	52,6±2,1	52,1±7,0	2,1±0,9
NT [mg/L]	55,7±8,2	61,5±0,5	58,3±6,3	55,3±10	32,1±8,8	53,7±1,7	54,2±5,9	2,9±1,1
PT [mg/L]	2,7±0,8	3,0±0,5	2,2±0,4	2,0±0,9	0,7±0,6	2,9±0,7	0,6±0,2	<0,5±0
<i>E. coli</i> [logCFU/100 mL]	5,4±0,5	5,3±0,2	5,7±0,3	0,8±0,8	0,68±0,8	0,0±0,0	0,6±0,4	0,1±0,2

Legenda: CBO₅ – carência bioquímica de oxigénio; SST – sólidos suspensos totais; NT – azoto total; PT – fósforo total.

Relativamente à qualidade microbiológica das ApR obtidas, avaliada em função da concentração de *E. coli*, a aplicação das tecnologias de membranas a partir da ultrafiltração e a ozonização permitiu obter ApR com qualidade microbiológica superior (≤ 10 CFU/100mL), compatível com a utilização de água para rega de classe A. O atual sistema de tratamento terciário existente na ETAR, com filtros de areia com coagulação, não foi eficaz para reduzir a carga microbiológica de *E. coli* e permitir a utilização da ApR diretamente para rega. Este resultado deve-se à baixa transmitância do efluente secundário, mesmo após filtração com coagulação, e possível subdimensionamento do sistema de desinfecção UV instalado.

A adição de NaOCl permitiu reduzir ainda mais a concentração de *E. coli* no permeado da UF, e manter esta qualidade durante 7 dias de armazenamento desta ApR. A adição de NaOCl poderá ser explorada como complemento para reduzir e controlar a carga microbiana noutras ApR produzidas, quando necessário para certas utilizações ou armazenamento. No âmbito da reabilitação do tratamento terciário existente da ETAR em estudo, está prevista iniciar-se esta adição.

A classificação das ApR produzidas de acordo com as normas de qualidade definidas para diferentes aplicações no Decreto-Lei n.º 119/2019, é apresentada no Quadro 2. Neste exercício de classificação das ApR obtidas verificou-se que o parâmetro azoto, total e amoniacal, assim como o parâmetro microbiológico *E. coli*, são os que mais condicionam as aplicações possíveis para as ApR. As unidades de tratamento por ozonização e osmose inversa, foram as que permitiram produzir ApR com melhor qualidade para irrigação e para todos os usos urbanos e industriais previstos.

Quadro 2. Classificação das ApR produzidas de acordo com as normas de qualidade apresentadas no Decreto-Lei n.º 119/2019.

ApR	A) REGA	B) USOS URBANOS	C) USOS INDUSTRIAIS
Efluente	S/ Aplicação	Lavagem de ruas sem pressão, não manual	S/ Aplicação
MF	S/ Aplicação	Lavagem de ruas sem pressão, não manual	S/ Aplicação
UF	Classe A*	Lavagem ruas e veículos, águas combate incêndio	Todos os usos previstos
UF + NF	Classe A*	Lavagem ruas e veículos, águas combate incêndio	Todos os usos previstos
UF + NaOCl	Classe A*	Lavagem ruas e veículos, águas combate incêndio	Todos os usos previstos
FAcg + UV	S/ Aplicação	Lavagem de ruas sem pressão, não manual	S/ Aplicação
FAcg + OZ	Classe A	Todos os usos previstos	Todos os usos previstos
UF + OI	Classe A	Todos os usos previstos	Todos os usos previstos

*Apenas aplicável quando não se verificarem restrições ao parâmetro azoto nos projetos de rega.

3.2 Estudo comparativo para avaliação 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. Esta análise foi desenvolvida com base nas condições operacionais de cada tecnologia testada à escala aplicada, piloto ou industrial, e os resultados são apresentados na Figura 2.

Verifica-se que o ozono foi a tecnologia testada com maior consumo energético (FA+OZ), nas condições testadas, com um custo operacional global de 0,41 €/m³ ApR. As tecnologias de membranas apresentam custos energéticos inferiores, mais elevados ao nível de consumíveis (novas membranas) e reagentes químicos (para lavagens). Embora apresentem custos operacionais superiores, estas tecnologias de membranas, nomeadamente nanofiltração e osmose inversa, poderão ter relevância em aplicações mais nobres de ApR para fins não potáveis, por permitirem complementarmente a remoção eficaz de poluentes emergentes (Baptista et al., 2023). A tecnologia de filtros de areia combinada com desinfecção UV (FAcg+UV) foi a que apresentou custo operacional global menor, mas como demonstram os resultados da qualidade da ApR (Quadro 1), esta solução não é eficaz na desinfecção do efluente, e a ApR obtida tem muitas restrições de utilização.

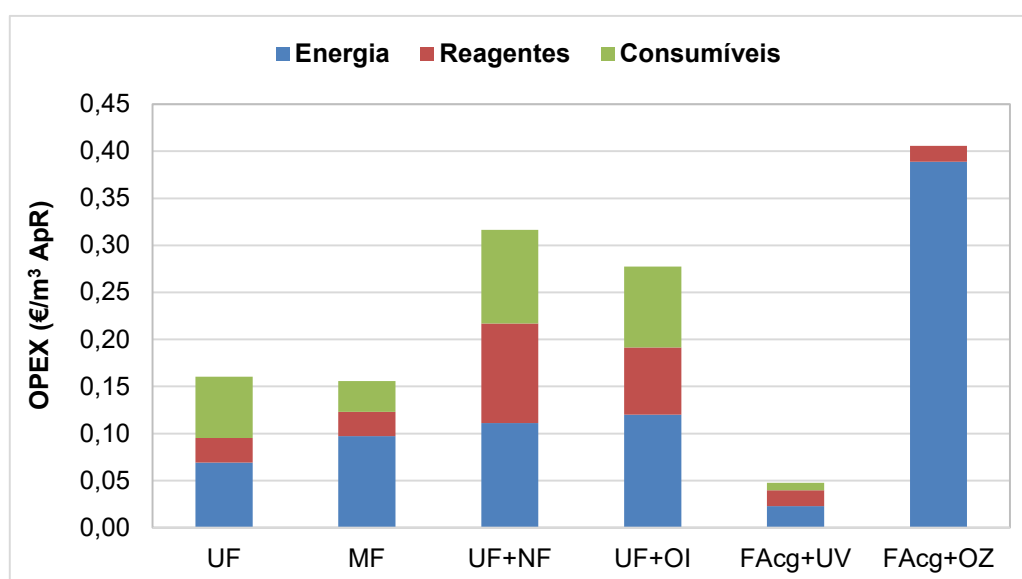


Figura 2. Custos operacionais (OPEX) associados à produção ApR nas tecnologias testadas.

Apresenta-se na Figura 3 uma relação entre a concentração de *E. coli* nas ApR produzidas e custos operacionais para as tecnologias testadas. Destacam-se nesta representação claramente dois grupos: um primeiro com filtros de areia + desinfecção UV e microfiltração, com baixa qualidade microbiológica, e um segundo grupo com as restantes tecnologias com contaminação microbiológica inferior. No conjunto das tecnologias testadas, a ultrafiltração (UF) apresenta-se como uma solução com relação entre qualidade ApR e custo operacional equilibrada, produzindo uma ApR de elevada qualidade para diferentes usos admissíveis, com um custo operacional global reduzido, face a outras alternativas testadas para atingir nível de qualidade equivalente. Nas condições testadas, o custo de produção de ApR por ultrafiltração foi de 0,18 €/m³ ApR.

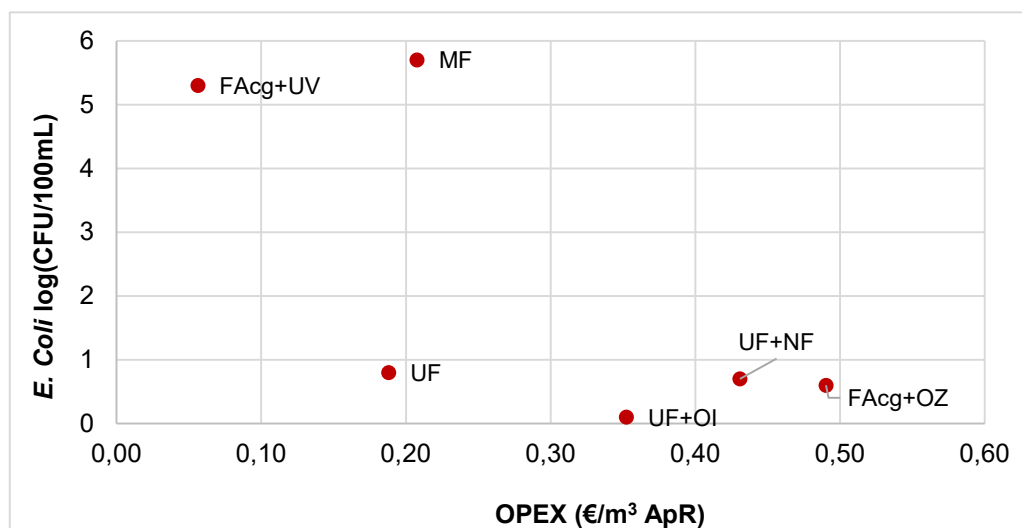


Figura 3. Relação entre concentração de *E. coli* nas ApR produzidas e custos operacionais para as tecnologias testadas.

4 Conclusões

Neste estudo, a aplicação de diferentes tecnologias terciárias no tratamento do efluente secundário, à escala piloto e industrial, permitiu obter ApR com qualidade diferenciada, adequada para diferentes usos previstos.

A qualidade microbiana das várias ApR obtidas foi o fator decisivo para a classificação das ApR, e definição dos usos possíveis. As tecnologias de membranas, incluindo aplicações de ultrafiltração e suas combinações, e ozono, produziram ApR com a melhor qualidade para irrigação e outros usos de contexto urbano. A desinfecção UV, aplicada à escala industrial, não foi eficaz na redução da carga microbiana do efluente.

A análise de custos operacionais desenvolvida neste estudo identificou diferentes custos de tratamento, desde 0,18 €/m³ ApR para a ultrafiltração até 0,41 €/m³ ApR para a ozonização.

A decisão da seleção da tecnologia terciária para produção de ApR deve ser realizada tendo em consideração a qualidade de ApR necessária para os usos previstos e o custo de tratamento.

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

- APHA (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, 23rd Edition.
- Baptista, I., Marinheiro, L., Carviçais, I., Delerue-Matos, C., Löblich, S. (2023). Aplicação inovadora de plasma não-térmico para tratamento de fármacos em águas residuais tratadas. *In proceedings* do 32º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, Brasil.
- Decreto-Lei 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>
- EC (2020). REGULAMENTO (UE) 2020/741 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 25 de maio de 2020 relativo aos requisitos mínimos para a reutilização da água. Comissão Europeia. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32020R0741&from=PT> acedido a 13 de Abril de 2023.
- Jodar-Abellan, A., López-Ortiz, M. I., Melgarejo-Moreno, J. (2019) Wastewater treatment and water reuse in Spain. Current situation and perspectives. *Water*, 11(8), 1551. <https://doi.org/10.3390/w11081551>.
- Metcalf e Eddy, (2014). Wastewater Engineering – Treatment and Resource Recovery. MacGraw Hill Education, 5th edition.