

## DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS PARA INSTALAÇÕES DE RECUPERAÇÃO DE RECURSOS - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO CIRCULAR COM MODELO 4R

Carlos RODRIGUES<sup>1</sup>; Tiago A. E. MARTINS<sup>2</sup>; Leonor AMARAL<sup>3</sup>

### RESUMO

O crescimento populacional, económico e as alterações nos padrões de consumo têm provocado impactos significativos na gestão de recursos naturais, com especial destaque para a água exigindo uma abordagem integrada e sustentável.

A transição de um modelo linear para um modelo de economia circular no setor do saneamento é essencial para acelerar a recuperação de recursos no ciclo urbano da água. Neste contexto, torna-se imperativo transformar as Estações de Tratamento de Águas Residuais em Estações de Recuperação de Recursos, através da adoção de práticas mais eficientes e sustentáveis.

A gestão e operação destas infraestruturas requerem uma matriz de avaliação capaz de caracterizar o estado atual, identificar vulnerabilidades e avaliar estratégias. A análise de modelos de avaliação existentes evidenciou limitações na aplicação prática e na integração da visão holística da EC.

Com base na metodologia PRISMA, foram identificados 386 indicadores-chave de desempenho, associados às estratégias R (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar). Como resultado desta investigação, está em desenvolvimento um quadro conceptual multidimensional que integra componentes técnicas, económicas, ambientais e sociais. Tendo por base o modelo 4R para avaliação da circularidade em sistemas de tratamento, promove-se a transição efetiva para ERR, em alinhamento com os princípios legais, da EC e da sustentabilidade.

**Palavras-Chave:** Economia Circular, Sustentabilidade, Tratamento de Águas Residuais, Modelo de Avaliação de Circularidade, Recuperação de Recursos

1 - Licenciado em Química Industrial, Diretor Executivo, CTGA, Lda., [Hugo.China@ctga.pt](mailto:Hugo.China@ctga.pt)

2 - Engenheiro do Ambiente, Diretor de Engenharia e DBO, CTGA, Lda., [Hugo.Sabino@ctga.pt](mailto:Hugo.Sabino@ctga.pt)

3 - Engenheira Civil, Departamento de Engenharia, CTGA, Lda., [juliana.carvalho@ctga.pt](mailto:juliana.carvalho@ctga.pt)

4 - Engenheira Civil, Departamento de Engenharia, CTGA, Lda., [bruno.rodrigues@ctga.pt](mailto:bruno.rodrigues@ctga.pt)

5 - Engenheira do Ambiente, Departamento de Engenharia, CTGA, Lda., [Joana.Dias@ctga.pt](mailto:Joana.Dias@ctga.pt)

## 1. INTRODUÇÃO

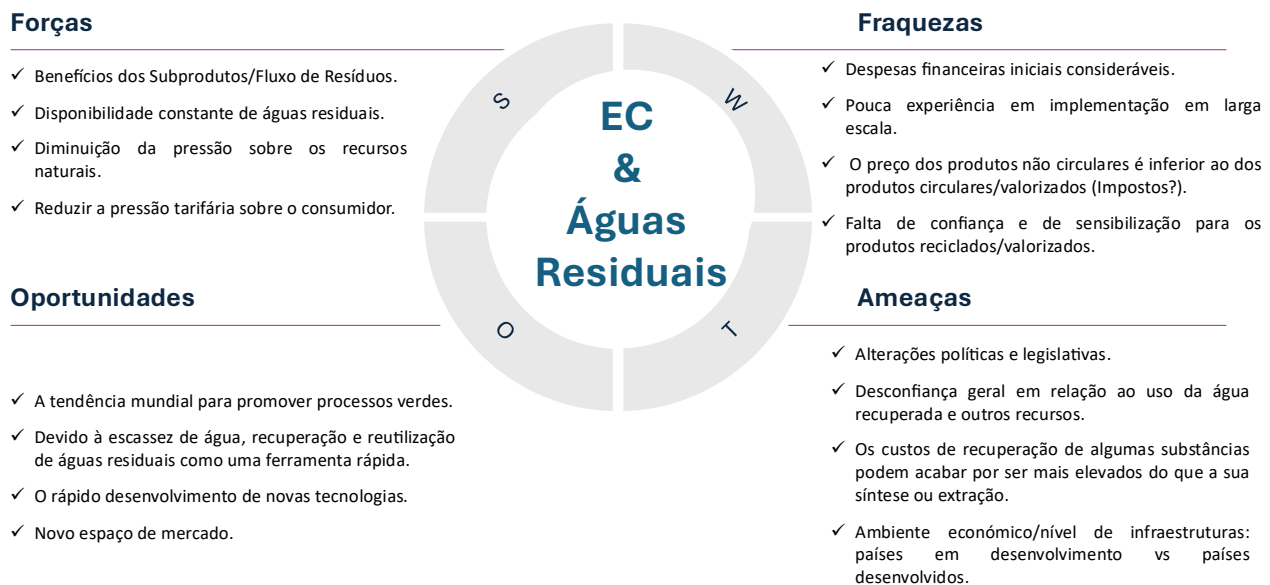
A transição para emissões zero até 2050, alinhada com o objetivo de limitar o aquecimento global a 1,5°C estabelecido no Acordo de Paris (Economy, 2025), exige uma transformação profunda nos comportamentos e hábitos da sociedade. As cidades, epicentros do consumo de recursos naturais (cerca de 75%) e da produção de resíduos (50% dos resíduos globais e 60-80% das emissões de gases com efeito de estufa), são palco privilegiado desta mudança (Foundation, 2019). O modelo económico linear de “extrair, produzir, eliminar” está “esgotado”, e os relatórios internacionais, como o *Emissions Gap Report* e as conclusões da *COP28* (UNEP, 2023; UNFCCC, 2023), alertam para o facto de estarmos a divergir dos objetivos climáticos, prevendo-se um aumento da temperatura entre 2,5°C e 2,9°C, muito acima dos limites do Acordo de Paris (UNEP, 2023a). Neste contexto, a economia circular (EC) surge como estratégia fundamental para reduzir o consumo de materiais, e a pegada de carbono, transformando profundamente a forma como produzimos, utilizamos e gerimos produtos e recursos (Foundation, 2019). No entanto, a implementação da EC encontra obstáculos práticos e teóricos, desde a sua aplicação em larga escala até à ausência de métodos de avaliação robustos (Marinelli et al., 2021; Velenturf & Purnell, 2021).

Desde a Revolução Industrial, prevaleceu um modelo linear de produção, assente na ideia de recursos infinitos e com pouca preocupação com o seu desaparecimento. Atualmente, cresce o reconhecimento da necessidade de valorizar a eficiência de recursos, de separar eficiência técnica, eficiência económica e redução de custos, e de maximizar o funcionamento dos ecossistemas (Hartley et al., 2020). A EC propõe a redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais, minimizando a extração de recursos e a produção de resíduos, e promovendo valores ambientais, sociais e económicos. A União Europeia, consciente da sua dependência de recursos externos e dos riscos do modelo linear, adotou o Plano de Ação para a Economia Circular (CEAP), revisto em 2020 (Commission, 2020), reforçando o compromisso com modelos circulares em todos os setores, incluindo o da água. O crescimento populacional – projeta-se que a população mundial chegue aos 10 mil milhões em 2050 – irá pressionar ainda mais os recursos hídricos. Atualmente, mais de quatro mil milhões de pessoas enfrentam escassez severa de água durante pelo menos um mês por ano, tornando a gestão eficiente dos recursos hídricos e das águas residuais um dos maiores desafios do século XXI.

O setor das águas residuais, devido ao seu potencial para recuperação de recursos e à sua relevância para a saúde pública e os ecossistemas, representa uma área estratégica na transição para a economia circular. Os desafios, metodologias e indicadores existentes para avaliar esta transição, com foco nas Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) e na sua transformação em instalações de recuperação de recursos, devem ser investigados e explorados. O setor das águas residuais tem potencial para contribuir ativamente na recuperação de recursos, não só protegendo os ecossistemas e a saúde pública, mas também promovendo a reutilização de água, energia e nutrientes (Marinelli et al., 2021; UNEP, 2023a). As ETAR podem fornecer água reutilizável, fornecer energia e compensar parte do uso global de matérias-primas. Contudo, a avaliação da circularidade das ETAR ainda é incipiente. Persistem barreiras tecnológicas, regulatórias, económicas e sociais que dificultam a transformação das ETAR em instalações de recuperação de recursos hídricos (WRRFs) (Almeida et al., 2022). Entre os principais desafios destacam-se:

- Aplicação limitada de tecnologias avançadas em larga escala;
- Dificuldades na criação de mercados para recursos recuperados;
- Restrições regulatórias à reutilização de recursos;
- Custos elevados de estabilização e deposição de subprodutos;
- Falta de métodos de monitorização e avaliação integrados e dinâmicos.

A Figura 1 apresenta uma análise SWOT acerca dos desafios da implementação da economia circular no setor das águas residuais.



**Figura 1** - Análise SWOT do setor das águas residuais relativamente à implementação da economia circular; Adaptado de Rodrigues et al. (2025).

A análise SWOT do setor evidencia forças (capacidade tecnológica, conhecimento acumulado), fraquezas (barreiras económicas e regulatórias), oportunidades (novos mercados, incentivos europeus) e ameaças (inércia institucional, volatilidade de preços e de políticas). Apesar dos aspetos mencionados, considerando que o objetivo da economia circular é a transição do atual padrão linear de produção, e consumo, para um sistema circular, no qual o valor social dos produtos, materiais e recursos é maximizado ao longo do tempo, um modelo futuro de avaliação dos sistemas existentes deverá considerar as dimensões sociais, económicas e ambientais (isto é, sustentabilidade), para além da componente técnica.

A sustentabilidade das estratégias de EC deve ser medida em comparação com os seus equivalentes lineares, de forma a identificar e evitar estratégias que aumentem a circularidade mas conduzam a externalidades indesejadas (Walzberg et al., 2021). Quando os decisores enfrentam incertezas profundas sobre uma vasta gama de fatores externos, agravadas pela crise pandémica, alterações climáticas, crescimento populacional, novas tecnologias e desenvolvimentos económicos, é necessário criar uma visão estratégica do futuro, comprometendo-se com ações de curto prazo e estabelecendo um quadro orientador para ações futuras. Esta abordagem estratégica é denominada “Dynamic Adaptive Policy Pathways” e permite a adaptação dinâmica das ações ao longo do tempo, em resposta às circunstâncias em mudança (Haasnoot et al., 2013).

O modelo simplificado desta abordagem também facilita o desenvolvimento de estratégias coerentes para reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar recursos das águas residuais, sendo caracterizado por uma ampla variedade de alternativas possíveis e fatores humanos e externos, que podem evoluir ao longo do tempo devido a desenvolvimentos tecnológicos, ambientais, económicos e de mercado. A variedade de incertezas relevantes e de possíveis ações e medidas dificulta este processo de desenvolvimento (Van Der Hoek et al., 2016). O desenvolvimento de políticas dinâmicas e adaptativas é fundamental para responder a incertezas e evoluções tecnológicas, ambientais e económicas

(Haasnoot et al., 2013). Esta abordagem permite a criação de estratégias flexíveis para reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar recursos, adaptando as ações às circunstâncias em constante mudança.

A aplicação deste modelo nas ETAR implica:

- Análise de fluxos de materiais (ex.: fósforo);
- Caracterização e seleção de medidas de melhoria (ex.: otimização do tratamento biológico);
- Desenvolvimento de estratégias para maximizar a recuperação de recursos (água, nutrientes, energia, lamas, entre outros...).

No entanto, a multiplicidade de critérios (composição das águas residuais, localização, contexto socioeconómico) exige avaliações integradas e personalizadas. O objetivo é acelerar a transformação das ETAR em instalações multifuncionais, promovendo simbioses industriais e a integração do nexus água-energia-materiais. A operacionalização da avaliação da circularidade nas ETAR exige métodos quantitativos e qualitativos robustos, capazes de captar dinâmicas de mercado, mudanças sociais e impactos ambientais. Tradicionalmente, utiliza-se o modelo 3R (reduzir, reutilizar, reciclar), mas para responder aos objetivos do CEAP é necessário adotar o modelo 4R, que acrescenta a recuperação de recursos (Preisner et al., 2022). Entre as metodologias mais relevantes destacam-se:

- MFA/SFA (Material/Substance Flow Analysis): quantifica fluxos e stocks de materiais, permitindo avaliações em diferentes escalas (Renfrew et al., 2024);
- SPPD-WRF (Strategical planning (SP) and process design (PD) of innovative water resource factories (WRFs): abordagem holística com tomada de decisão multicritério para avaliar de forma integrada e estratégica a sustentabilidade e circularidade em sistemas de águas residuais (Kehrein et al., 2020),
- FSPDM (Framework for Sustainable Planning and Decision-Making): aplicado à realidade de megacidades, integra análise de políticas públicas e decisão (Chrispim et al., 2020);
- MSWCA (Multi-Sectoral Water Circularity Assessment): integra diferentes abordagens para avaliação da circularidade em vários setores (Nika et al., 2020);
- WICER (Water in Circular Economy and Resilience): promove a resiliência e circularidade em sistemas urbanos de água à escala global (Delgado, 2021).

Apesar da diversidade de modelos, subsiste a ausência de um quadro normativo universal, aplicável a todas as ETAR, e adaptado às especificidades regionais e nacionais. A maioria dos modelos é demasiado abstrato, carecendo de indicadores-chave de desempenho (KPI) padronizados e operacionalizáveis. Contudo, a avaliação da circularidade exige o desenvolvimento e aplicação de KPI que abranjam as quatro dimensões da sustentabilidade: técnica, ambiental, económica e social (Baratsas et al., 2022; Walzberg et al., 2021). Entre os indicadores mais relevantes encontram-se:

- Eficiência de remoção de poluentes (orgânicos e nutrientes);
- Taxa de reutilização de água e recuperação de energia;
- Redução na produção de lamas;
- Consumo energético por metro cúbico tratado;
- Custos operacionais e de manutenção;
- Geração de valor económico através de subprodutos;
- Impacto social, incluindo aceitação pública e criação de emprego;
- Conformidade com regulamentos ambientais europeus;
- Prazo de Retorno do Investimento;
- Valor Atual Líquido (VAL);
- Índice de Custos Operacionais;
- Cobertura dos Custos Operacionais.

No contexto surge ainda a nova Diretiva (UE) 2024/3019, reforçando a importância da circularidade, introduzindo requisitos para a recuperação de nutrientes, matéria orgânica e energia, e promovendo tecnologias inovadoras para transformar as águas residuais em recursos. Contudo, a estratégia de avaliação e normalização dos indicadores ainda está numa fase de desenvolvimento e adaptação sectorial.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia de investigação adotada foi alinhada com as premissas iniciais, e com o objetivo de demonstrar a relevância de um espaço na comunidade científica para o desenvolvimento de trabalhos específicos voltados à avaliação do grau de circularidade em sistemas de tratamento de águas residuais, tanto existentes, quanto futuros. Considerando o estágio atual da transição para a economia circular, e as barreiras existentes nos sistemas de tratamento de águas residuais, a primeira etapa do trabalho consistiu na identificação das metodologias disponíveis, com base em critérios de seleção previamente definidos. A execução dos passos seguintes visou precisamente estabelecer uma base científica sólida de replicação e standardização para vários sistemas de tratamento existentes e a construir:

### a) Normalização de Modelos de Avaliação Circular

Definição de orientações e critérios uniformes para o desenvolvimento e aplicação de modelos de avaliação baseados nos princípios da economia circular.

### b) Operacionalização e Massificação dos Modelos de Avaliação Circular para Diagnóstico de Condições Existentes a Curto, Médio e Longo Prazo

Implementação prática e disseminação dos modelos circulares com vista à avaliação do estado atual e projetado de sistemas, processos ou ativos, considerando diferentes horizontes temporais.

### c) Cobertura e Monitorização através de Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) das Dimensões Social, Económica, Ambiental e Técnica

Definição e aplicação de KPIs que garantam uma avaliação abrangente e integrada das quatro dimensões fundamentais da sustentabilidade.

O critério de seleção destes modelos teve em consideração aspetos-chave de desenvolvimento futuro: modelo holístico e multidimensional, abrangendo componentes técnicas, económicas, ambientais e sociais, com exploração de estratégias de operacionalização de medidas circulares. A figura 2 representa a visualização da globalidade dos passos anteriores inseridos na abordagem metodológica do artigo.



**Figura 2** – Metodologia de abordagem na consolidação da identificação de lacunas e espaço de desenvolvimento de um modelo de avaliação circular.

O quadro 1 apresenta uma caracterização geral dos cinco modelos selecionados, em termos de âmbito, tipo, foco e aplicação.

**Quadro 1** - Visão geral dos modelos testados em termos de âmbito, tipo, foco e aplicação; adaptado de Rodrigues et al. (2024).

Abreviação	Tipo de Estrutura	Foco na promoção da EC	Dimensões do KPI	Aplicação do Estudo	Referências
MFA & SFA	HA EBDM	+ Recuperar	Técnico, Ambiental & Económico	Avaliar a Circularidade dos recursos de águas residuais (ou seja, água, carbono, nitrogénio e fósforo) – Montante e Jusante	Renfrew et al. (2024b)
SPPD-WRF	HA MCDM	+ Recuperar	Técnico, Ambiental & Económico	Estrutura para tomada de decisão no design e planeamento estratégico de ETAR, a partir de uma perspetiva de recuperação de recursos, que promove a transição para a EC.	Kehrein et al. (2020b)
FSPDM	HA MCDM	+ Recuperar	Técnico, Ambiental, Económico e Social	Uma estrutura que apoia o planeamento e a tomada de decisão, utilizando a avaliação do potencial de estratégias de recuperação de recursos em ETAR – “Massificação em Megacidades”.	Chripim et al. (2020)
MSWCA	HA + MM	Recuperar, Reutilizar, Reciclar, Reduzir	Técnico, Ambiental & Económico	Estrutura de avaliação de circularidade, que envolve uma abordagem de sistemas multissetoriais, com os componentes MFA, modelos de sistemas naturais e avaliação económica, baseada em indicadores de desempenho de circularidade orientados para a informação e para a ação (ou seja, indicadores de desempenho de circularidade, CPI).	Nika et al. (2020)

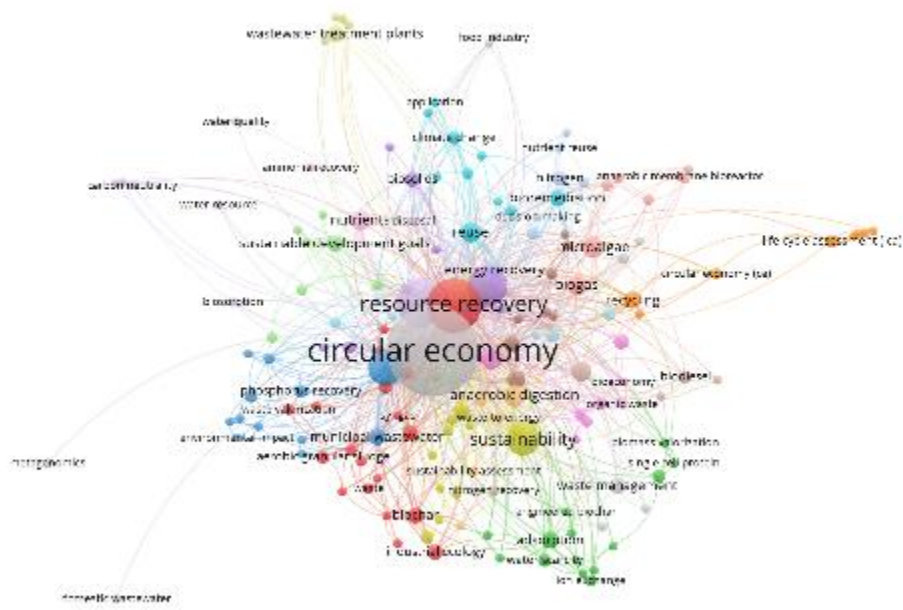
Abreviação	Tipo de Estrutura	Foco na promoção da EC	Dimensões do KPI	Aplicação do Estudo	Referências
WICER	HA	Recuperar, Reutilizar, Reciclar, Reduzir	NA	A estrutura incorpora os princípios fundamentais do ciclo da água circular, definindo resultados concretos e ações-chave por resultado – Matriz de Iniciativas.	Anna et al. (2021)

KPI – Key Performance Indicator; HA – Holistic Approach; EBDM – Evidence-Based Decision Making; LCA – Life Cycle Assessment; MM – Mathematical Model; MCDM – Multi Criteria Decision Making; IDSS – Intelligent Decision Support System; NA – Não aplicável.

Em termos de análise macro, pode afirmar-se que a abordagem holística está presente em todos os modelos analisados, sendo que o SPPD-WRF e o FSPDM incluem também a Tomada de Decisão Multicritério (MCDM). No que diz respeito ao foco na promoção da economia circular, destaca-se a abrangência global dos modelos MSWCA e WICER, concluindo-se que os restantes se concentram apenas no pilar da recuperação de recursos. Pode ainda concluir-se que apenas o modelo FSPDM integra as quatro dimensões da abordagem da sustentabilidade, enquanto o modelo WICER não contempla a perspetiva de avaliação através de KPIs, estando unicamente centrado em ações-chave. Após etapa de estudo dos modelos de avaliação circular existentes e respetiva identificação de lacunas e espaços de desenvolvimento, seguiu-se uma profunda revisão bibliográfica acerca de Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs), seguindo uma metodologia PRISMA (tal facto resultou precisamente de uma das lacunas detetadas ser referente à não medição dos cumprimentos de objetivos ou ações através de KPIs). No quadro 2 e Figura 3 poderemos ver os critérios e termos de pesquisa utilizados, bem como, uma visualização da massificação das palavras-chave através do software VOSviewer (Visualizing scientific landscapes).

**Quadro 2** – Metodologia Prisma; adaptado de Rodrigues et al. (2025).

<i>Critério de Elegibilidade Usado</i>	Termos da Pesquisa Específico
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Avaliar especificamente a economia circular e/ou a sustentabilidade dos sistemas de águas residuais;</i></li> <li>✓ <i>A avaliação deve incluir obrigatoriamente uma lista de indicadores-chave de desempenho (KPIs);</i></li> <li>✓ <i>Pode abranger total ou parcialmente as dimensões/categorias: técnica, ambiental, económica e social;</i></li> <li>✓ <i>O texto deve constituir um artigo original, uma revisão ou um capítulo de livro, revisto por pares;</i></li> <li>✓ <i>Apenas são aceites documentos redigidos em inglês;</i></li> <li>✓ <i>O texto completo deve estar disponível;</i></li> <li>✓ <i>A publicação deve ter ocorrido após 2020, em alinhamento com o novo Plano de Ação para a Economia Circular.</i></li> </ul>	<p><b>Query: (Topic):</b> "circular economy" and "wastewater treatment" and "key performance indicators" or "assessment" or "sustainable development" or "resource recovery";  <b>(Publication Year):</b> 2020 or 2021 or 2022 or 2023 or 2024 or 2025; <b>(Document Types):</b> Book Chapters or Article or Review Article;  <b>(Languages):</b> English; <b>(Open Access):</b> All Open Access. The results of this step of research are presented in Figure 2.</p>



**Figura 3** – Densificação das Palavras-chave através do software VOSviewer (Visualizing scientific landscapes).

O tamanho dos círculos na figura representa a densidade de palavras-chave específicas, sendo que os círculos maiores indicam uma maior densidade dessas palavras-chave. Esta análise abrangente não só orientou as nossas decisões relativamente à implementação da metodologia PRISMA, como também melhorou os resultados, permitindo aperfeiçoar e expandir a amostra final através da incorporação de estudos adicionais relevantes.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente projeto de investigação surge da necessidade de aprofundar o conhecimento sobre a aplicação dos princípios da economia circular aos sistemas de tratamento de águas residuais. Face aos desafios ambientais e à crescente pressão para uma gestão sustentável dos recursos hídricos, torna-se essencial desenvolver abordagens metodológicas que permitam avaliar o grau de circularidade destes sistemas, inclusivamente permitindo avaliar estratégias e soluções tecnológicas a serem implementadas nas muitas reabilitações que irão ser necessárias fazer, à luz da nova DARU. Neste contexto, foi desenvolvido um procedimento metodológico que orientou a identificação de lacunas bibliográficas relevantes, através de uma análise crítica da literatura existente, bem como da verificação e testagem de metodologias de avaliação da circularidade. A investigação procurou ainda identificar e validar indicadores de desempenho capazes de mensurar o potencial inicial de transição circular dos sistemas em funcionamento, considerando dimensões ambientais, económicas e sociais. Neste sentido foram selecionados cinco modelos de referência (MFA/SFA, SPPD-WRF, FSPDM, MSWCA e WICER), de acordo com critérios pré-estabelecidos, para efetuar uma análise detalhada sobre a avaliação do potencial de circularização em quatro Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) portuguesas, no âmbito da sua transição para Fábricas de Recuperação de Recursos de Águas Residuais (WWRRF). Estes modelos seguiram uma caracterização baseada em procedimento de abordagem dinâmica e adaptativa, incluindo a verificação da existência de etapas base de avaliação da situação atual, identificação e avaliação de medidas de melhoria e definição de estratégias de implementação.

Os casos de estudos reais foram analisados segundo estes referenciais, permitindo posteriormente retirar conclusões sobre a operacionalização do quadro de EC e identificar lacunas de comunicação na avaliação do desempenho circular. Os modelos selecionados apresentam diferentes âmbitos, focos e níveis de aplicação. A comparação inicial dos modelos foi efetuada através de uma análise SWOT, identificando os pontos fortes, fracos, oportunidades e ameaças de cada um. Conclui-se que os modelos SPPD-WRF e FSPDM são os mais completos, permitindo definir indicadores claros para a avaliação da circularidade, ainda que estejam mais orientados para a fase de conceção de novas instalações. Em contrapartida, modelos como o MFA/SFA e MSWCA apresentam lacunas significativas, não identificando ou avaliando medidas concretas nem estratégias de implementação.

Foram analisadas quatro ETAR portuguesas, todas baseadas em sistemas de lamas ativadas, representativas do contexto nacional (Quadro 3), e com objetivos iniciais traçados após conhecimento do estado atual de funcionamento e de controlo processual, projetando o nível de circularidade água-energia-materiais a curto prazo.

**Quadro 3** - Visão geral dos modelos testados em termos de âmbito, tipo, foco e aplicação; adaptado de Rodrigues et al. (2024)

Nome e Localização	Tipo Recolha de Efluentes	Ano de Início	População (Pop.eq.)	Nível de tratamento	Nível de circularidade (4R's)	Objetivos Traçados
<b>ETAR A</b>	Domésticas Industriais	1992	80 000	Terciário	Reutilização de WW tratada Compostagem de lamas Produção de energia	Melhorar a recuperação de recursos e a eficiência energética
<b>ETAR B</b>	Domésticas	2001	70 000	Terciário	Reutilização de WW tratada Compostagem de lamas	Melhorar a recuperação de recursos e a eficiência energética
<b>ETAR C</b>	Domésticas Industriais	2012	10 000	Secundário	Reutilização de WW tratada	Atualização de capacidade
<b>ETAR D</b>	Domésticas Industriais Águas pluviais	1995	77 000	Secundário	Reutilização de WW tratada	Atualização de capacidade

Os dados foram recolhidos de bases operacionais internas e controlos mensais, permitindo uma análise detalhada da situação inicial ("As Is") e projeção de cenários de melhoria ("To Be"). A primeira etapa consistiu na avaliação do desempenho atual das ETAR em termos de cumprimento legislativo e identificação de margens de melhoria. Seguiu-se a aplicação dos modelos, com recolha de dados específicos para cada caso de estudo entre 2021 e 2023.

A ETAR A revela um grau elevado de circularidade, com valorização de energia e compostagem, apesar de ser uma instalação com mais de 30 anos. A ETAR B, embora de construção mais recente, apresenta potencial significativo para incorporar práticas de EC, estando prevista uma requalificação da capacidade de tratamento. As ETAR de C e D, mais pequenas, também evidenciam oportunidades de melhoria, nomeadamente ao nível da reutilização de águas, enfrentando desafios específicos relacionados com a influência de águas pluviais e industriais. Considerando que esta fase inicial se insere na etapa de descrição da situação atual “Status Quo” dos sistemas de tratamento, decidiu-se avançar um pouco mais no processo de avaliação, descrevendo os modelos de avaliação selecionados quais os modelos que dão respostas às questões seguintes de: identificação e análise de medidas de melhoria consideradas como fatores-chave para alcançar os objetivos definidos e a identificação e avaliação de estratégias de implementação que viabilizem a concretização da transição circular. De acordo com uma análise binária dos modelos revelou-se que SPPD-WRF e FSPDM são os únicos a abranger todas as etapas decisórias, desde a descrição da situação atual até à avaliação de estratégias. Os restantes pecam por não avaliarem medidas ou estratégias, limitando a sua aplicabilidade prática. Além disso, verifica-se que a maioria dos modelos não permite uma quantificação objetiva da circularidade, dificultando comparações entre diferentes ETAR ou contextos.

Realizando uma análise SWOT, o modelo MFA/SFA penaliza comportamentos lineares e permite criar cenários alternativos, mas baseia-se em dados teóricos e apresenta lacunas nos indicadores sociais e de desempenho técnico. O SPPD-WRF, embora robusto na fase de planeamento estratégico, exclui a operação e carece de indicadores quantitativos, sendo difícil de adaptar à realidade prática. O FSPDM foca-se na recuperação de recursos e oferece uma avaliação detalhada, mas ignora dimensões como a reutilização e reciclagem. O MSWCA, apesar da sua abrangência e inclusão da componente social, é de difícil implementação devido à quantidade de dados e *stakeholders* envolvidos. Por fim, o WICER, de carácter mais teórico, fornece apenas orientações e ações, sem métricas concretas.

Na medida do possível a aplicabilidade dos modelos foi testada e realizada, e os modelos confirmaram as expectativas: A ETAR A é a mais circular, C e D apresentam boas oportunidades de reutilização, e B destaca-se pelo potencial de desenvolvimento futuro. O modelo MFA/SFA revelou que há espaço para melhorar a eficiência da desidratação de lamas e recuperação de nutrientes, sendo a ETAR A a instalação com melhor desempenho global. Já o SPPD-WRF permitiu concluir que o reaproveitamento de recursos impacta positivamente nos custos energéticos e na gestão de lamas, embora a seleção de tecnologias adequadas permaneça um desafio. O FSPDM demonstrou viabilidade económica na recuperação de nutrientes e co-digestão, sobretudo em instalações de maior dimensão, mas não integra indicadores para reutilização de águas. O MSWCA evidenciou a dificuldade de recolha de dados e a importância dos fatores externos (população, turismo, precipitação), sendo útil para caracterização ambiental. O WICER, por sua vez, destacou-se pela identificação de ações a implementar, ainda que sem resultados mensuráveis.

Em síntese, todos os modelos analisados contribuem para descrever ou orientar melhorias na circularidade das ETAR, mas apresentam limitações quanto à mensuração prática e comparabilidade dos resultados. A ETAR A surge como o caso mais avançado, enquanto a ETAR B representa um grande potencial de evolução. O modelo SPPD-WRF é valioso para planeamento estratégico, enquanto o MSWCA, simplificado, pode complementar a avaliação do contexto envolvente. O FSPDM é recomendado para grandes instalações, focando-se na recuperação de recursos. O MFA/SFA, apesar de limitado, permite testar cenários e avaliar o impacto de diferentes medidas. O WICER, embora amplamente utilizado, carece de indicadores concretos, funcionando sobretudo como guia de boas práticas. Globalmente, a integração de diferentes modelos e a definição clara de indicadores de desempenho são essenciais para operacionalizar e comparar a circularidade nas ETAR portuguesas, promovendo uma transição efetiva para a Economia Circular.

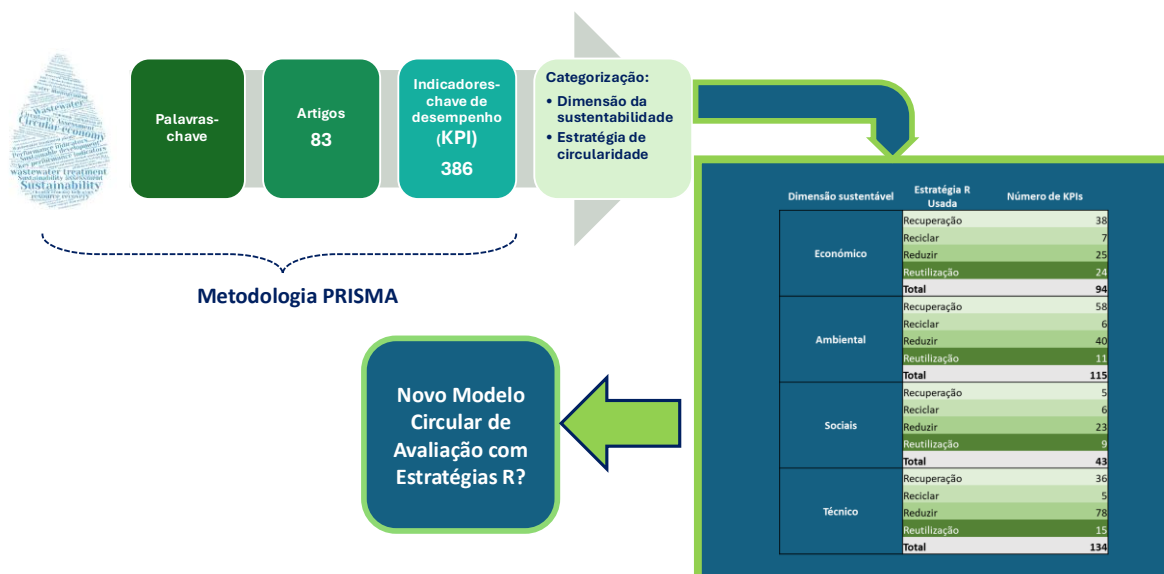
Na fase seguinte do processo metodológico, e após as primeiras conclusões obtidas na análise da aplicabilidade dos modelos de avaliação da circularidade para diagnóstico das condições existentes a curto, médio e longo prazo, tornou-se evidente a dificuldade em identificar e sistematizar Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) nas dimensões social, económica, ambiental e técnica. Estes indicadores são essenciais para descrever a situação atual e orientar o desenvolvimento futuro dos sistemas de tratamento, tendo como referência os objetivos iniciais associados às estratégias de transição circular. Esta etapa corresponde à fase de identificação e avaliação de medidas que possam dar seguimento ao diagnóstico inicial, bem como à definição de um índice de circularidade. Este índice deverá estar articulado com a identificação e avaliação de estratégias de implementação que operacionalizem as fases anteriores. Tais estratégias poderão incluir a introdução de novas unidades de tratamento, etapas intermédias adicionais ou mesmo conceções inovadoras de sistema de tratamento.

Para sustentar esta abordagem, foi realizada uma pesquisa bibliográfica aprofundada, centrada em bases de dados internacionais e nacionais sobre metodologias de avaliação em países com regulação avançada e práticas consolidadas de medição de desempenho. Destacam-se, por exemplo:

- Quadros de indicadores propostos pela norma ISO 59020:2024 , que fornece uma estrutura clara e normalizada para que organizações possam medir e avaliar o seu desempenho em termos de circularidade, utilizando indicadores obrigatórios e opcionais (Standardization, 2024);
- O sistema de avaliação operacional de ETARs urbanas desenvolvido pelo LNEC, que incorpora índices de desempenho técnico e ambiental para cada etapa do tratamento (Silva & Rosa, 2020);
- 

O guia metodológico e roteiro para avaliar a conformidade das ETAR com critérios de sustentabilidade e circularidade (Estevez et al., 2025);

Apesar dos avanços, verifica-se ainda um elevado potencial de evolução nesta área, particularmente no contexto do saneamento básico, onde a integração de práticas circulares pode representar ganhos significativos em eficiência, sustentabilidade e inovação. A figura 4 apresenta um resumo global da metodologia seguida, bem como as conclusões em termos de resultados.



**Figura 3** – Resumo do processo de revisão PRISMA, e os principais resultados; adaptado de Rodrigues et al. (2025).

A análise dos 83 artigos resultantes do algoritmo PRISMA, com 386 KPI identificados, demonstra a ausência de uma metodologia padronizada para avaliar a Economia Circular (EC) numa ETAR. A diversidade de indicadores gera resultados ambíguos e dificulta comparações entre instalações e países. É necessária a criação de um modelo universal que integre todas as dimensões da sustentabilidade e estratégias de circularidade. Contudo, a avaliação de parâmetros envolve custos e depende da disponibilidade de dados fiáveis. Existe ainda o facto de que indicadores complexos aumentem o risco de erros e desigualdade nas avaliações. Por isso, é essencial padronizar os KPI com unidades claras, garantindo comparabilidade entre ETAR e países. Este processo deve também considerar os requisitos das entidades reguladoras, enquanto estas evoluem para incluir critérios ambientais e circulares mais abrangentes.

Os próximos passos da presente investigação têm se centrado na agregação de KPI que sejam representativos e permitam analisar a EC de uma ETAR nas suas diferentes componentes (económico, ambiental, social e técnico) dentro de todas as categorias da política de 4R. Nesta fase têm sido considerados os requisitos dos quadros legais assim como o custo e praticidade de obtenção e tratamento de dados relativos a novos indicadores. O objetivo final prende-se ao desenvolvimento de um quadro de avaliação que permitam, de uma forma uniforme, prática e comparável, avaliar a EC das diferentes WWTP nos diferentes cenários e países.

#### 4. CONCLUSÕES

A avaliação da circularidade nas ETAR assume atualmente um papel central na transição para uma economia circular no setor da água, refletindo a crescente necessidade de adaptar os modelos de gestão aos princípios de sustentabilidade e resiliência ambiental. Esta temática reveste-se de particular importância na Europa, onde políticas e regulamentos procuram alinhar práticas inovadoras com as diretivas comunitárias para responder eficazmente aos desafios ambientais, económicos e sociais emergentes.

A comunicação conta a história de análise crítica das principais frameworks existentes para avaliar o nível de circularidade em ETAR, apontando avanços, limitações e lacunas, acabando por explorar estas últimas. Os casos de estudo demonstram que, apesar de algumas unidades apresentarem bom desempenho, persistem desafios na recuperação de recursos e integração das diferentes dimensões da sustentabilidade (ambiental, social, técnica e económica).

Adicionalmente, destaca-se a necessidade de alinhar políticas e diretivas europeias, como a UWWTD e o Plano de Ação para a Economia Circular (Europeia, 2024; Portugal, 2019), para promover uma transição circular eficaz no setor da água. A ausência de metodologias claras e matrizes de KPI bem definidas compromete a avaliação comparativa e a implementação prática das medidas. Assim, sublinha-se que o futuro da avaliação da circularidade em ETAR depende do desenvolvimento de abordagens integradas, adaptativas e multidimensionais, deixando em abertas questões sobre como operacionalizar essas estratégias em diferentes contextos e como envolver eficazmente todos os stakeholders neste processo dinâmico. Uma abordagem circular deve incluir objetivos claros para reduzir, recuperar, reutilizar e reciclar recursos, contribuindo para a reconfiguração das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) como Instalações de Recuperação de Recursos Hídricos (WRRF). Esta estratégia integrada deve considerar as dimensões económica, ambiental, técnica e social, de forma a envolver eficazmente todas as partes interessadas. Trata-se de uma abordagem dinâmica e adaptativa que impulsionará a transição circular das ETAR, através da avaliação da situação atual, identificação de medidas-chave de melhoria para alcançar os objetivos definidos e uma análise das estratégias de implementação mais adequadas e como um contributo para o que venha a ser a implementação da EC no quadro do sector global da água (abastecimento e tratamento de águas residuais, permitindo uma valorização e recuperação em todo o ciclo urbano da água.

## AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem e agradecem o apoio prestado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia ao CENSE – Centro de Investigação em Ambiente e Sustentabilidade, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, bem como, ao Laboratório Associado CHANGE – Instituto para a Sustentabilidade e Alterações Globais.

Adicionalmente, os autores expressam a sua gratidão a todos os que contribuíram para esta investigação com conhecimento, aconselhamento e apoio emocional.

## BIBLIOGRAFIA

COMMISSION, EUROPEAN – *A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Bruxelas (Bélgica), European Commission, 2020.

DELGADO, A.; RODRIGUEZ, D. J.; AMADEI, C. A.; MAKINO, M. – *Water in Circular Economy and Resilience (WICER)*. Washington (EUA), World Bank, 2021.

ECONOMY, CIRCLE – *Circularity Gap Report 2025: A global call to action*. Haia (Países Baixos), Circle Economy, 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION – *Circular Economy in Cities: Project Guide*. Cowes (Reino Unido), Ellen MacArthur Foundation, 2019.

PORTUGAL – *Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal 2020*. Lisboa (Portugal), Diário da República, 2019.

ALMEIDA, M.; MANNINA, G.; BADALUCCO, L.; BARBARA, L.; COSENZA, A.; TRAPANI, D. D.; LAUDICINA, V. A.; MUSCARELLA, S. M.; PRESTI, D. – "Roadmapping the Transition to Water Resource Recovery Facilities: The Two Demonstration Case Studies of Corleone and Marineo (Italy)". *Water*, 14(2), 2022, pp. 1–56.

BARATSAS, S. G.; PISTIKOPOULOS, E. N.; AVRAAMIDOU, S. – "A quantitative and holistic circular economy assessment framework at the micro level". *Computers and Chemical Engineering*, 160, 2022, pp. 107697–107697.

CHRISpIM, M. C.; DE SOUZA, F. M.; SCHOLZ, M.; NOLASCO, M. A. – "A framework for sustainable planning and decision-making on resource recovery from wastewater: Showcase for São Paulo megacity". *Water*, 12(12), 2020, pp. 1–38.

ESTEVEZ, S.; ARIAS, A.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M. T. – "Methodological guide and roadmap to assess the compliance of wastewater treatment plants with sustainability and circularity criteria". *Water Research*, 274, 2025, pp. 123125.

HAASNoot, M.; KWAKKEL, J. H.; WALKER, W. E.; TER MAAT, J. – "Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world". *Global Environmental Change*, 23(2), 2013, pp. 485–498.

HARTLEY, K.; VAN SANTEN, R.; KIRCHHERR, J. – "Policies for transitioning towards a circular economy: Expectations from the European Union (EU)". *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 2020, pp. 104634–104634.

KEHREIN, P.; VAN LOOSDRECHT, M.; OSSEWEIJER, P.; POSADA, J.; DEWULF, J. – "The SPPD-WRF framework: A novel and holistic methodology for strategical planning and process design of water resource factories". *Sustainability*, 12(10), 2020.

MARINELLI, E.; RADINI, S.; AKYOL, Ç.; SGROI, M.; EUSEBI, A. L.; BISCHETTI, G. B.; MANCINI, A.; FATONE, F. – "Water-Energy-Food-Climate Nexus in an Integrated Peri-Urban Wastewater Treatment and Reuse System: From Theory to Practice". *Sustainability*, 13(19), 2021, pp. 10952.

NIKA, C. E.; VASILAKI, V.; EXPÓSITO, A.; KATSOU, E. – "Water Cycle and Circular Economy: Developing a Circularity Assessment Framework for Complex Water Systems". *Water Research*, 187, 2020, pp. 116423.

PREISNER, M.; SMOL, M.; HORTTANAINEN, M.; DEVIATKIN, I.; HAVUKAINEN, J.; KLAVINS, M.; OZOLA-DAVIDANE, R.; KRUIPIENĒ, J.; SZATKOWSKA, B.; APPELS, L.; HOUTMEYERS, S.; ROOSALU, K. – "Indicators for resource recovery monitoring within the circular economy model implementation in the wastewater sector". *Journal of Environmental Management*, 304, 2022, pp. 114261–114261.

RENFREW, D.; VASILAKI, V.; NIKA, E.; HARRIS, E.; KATSOU, E. – "Tracing wastewater resources: Unravelling the circularity of waste using source, destination, and quality analysis". *Water Research*, 250, 2024.

RODRIGUES, C.; MARTINS, T. A. E.; AMARAL, L. – "Wastewater treatment plants circular performance models evaluation: Portugal case-study". *Science of the Total Environment*, 955, 2024, pp. 177013.

RODRIGUES, C.; MARTINS, T. A. E.; AMARAL, L. – "From Efficiency to Circularity in the Wastewater Sector: A Review of Performance Indicators in Regulated Countries". *Water*, 17(15), 2025.

SILVA, C.; ROSA, M. J. – "Performance assessment of 23 wastewater treatment plants – a case study". *Urban Water Journal*, 17(1), 2020, pp. 78–85.

VAN DER HOEK, J. P.; DE FOOIJ, H.; STRUKER, A. – "Wastewater as a resource: Strategies to recover resources from Amsterdam's wastewater". *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 2016, pp. 53–64.

VELENTURF, A. P. M.; PURNELL, P. – "Principles for a sustainable circular economy". *Sustainable Production and Consumption*, 27, 2021, pp. 1437–1457.

WALZBERG, J.; LONCA, G.; HANES, R. J.; EBERLE, A. L.; CARPENTER, A.; HEATH, G. A. – "Do We Need a New Sustainability Assessment Method for the Circular Economy? A Critical Literature Review". *Frontiers in Sustainability*, 1, 2021.

DIRETIVA (UE) 2024/3019 – Do Parlamento Europeu e do Conselho de 27 de novembro de 2024 relativa ao tratamento de águas residuais urbanas (recast). Jornal Oficial da União Europeia, L 2024/3019, 12 dez. 2024.

ISO – ISO 59020:2024 – Circular economy — Measuring and assessing circularity performance. Genebra (Suíça), International Organization for Standardization, 2024.

UNEP – Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). Nairobi (Quénia), UNEP, 2023.

UNEP – Wastewater – Turning Problem to Solution. Nairobi (Quénia), UNEP, 2023a.

UNFCCC – *COP28 Agreement Signals “Beginning of the End” of the Fossil Fuel Era*. Bonn (Alemanha), UNFCCC, 2023.