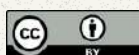
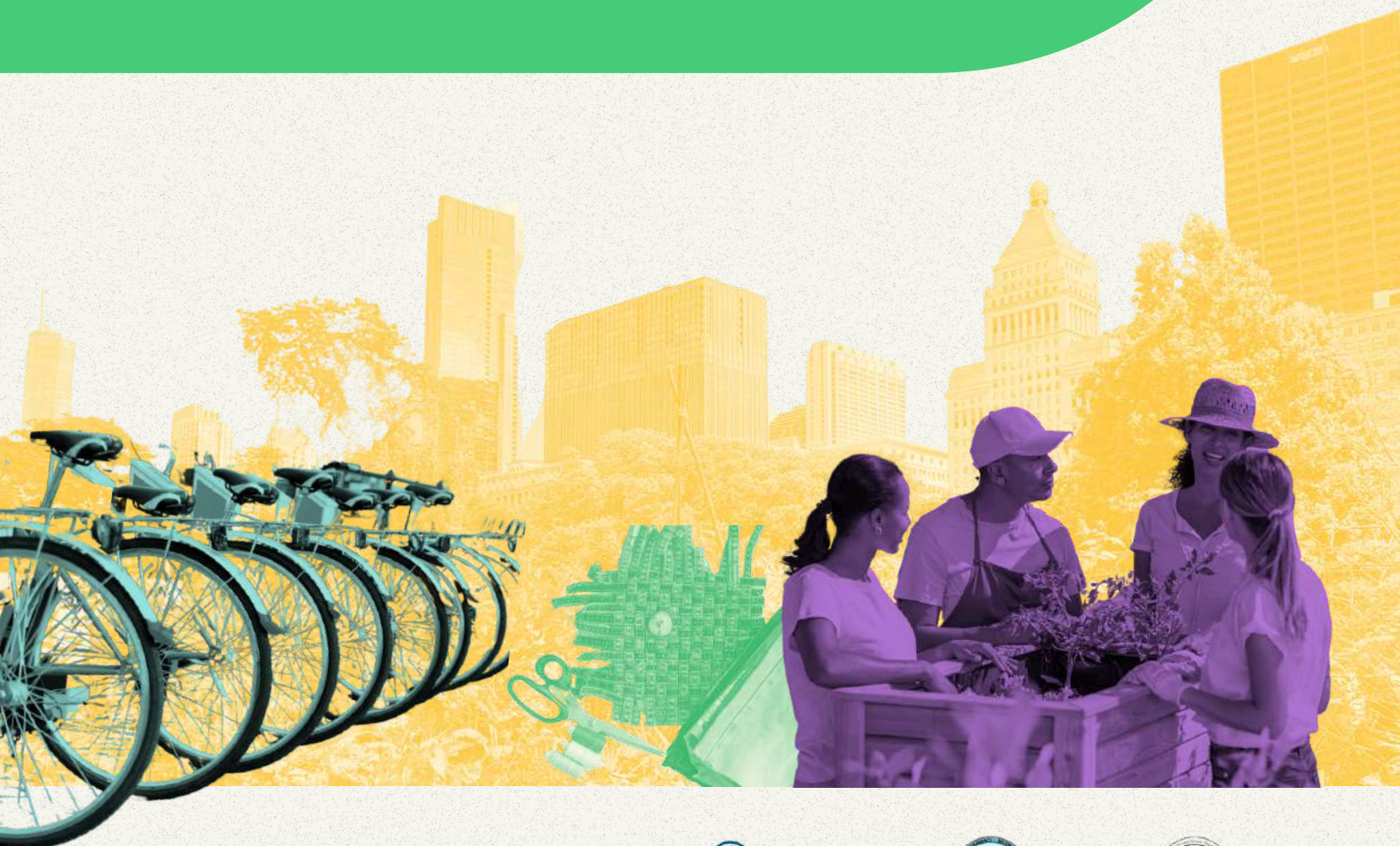




Co-funded by
the European Union



ESTUDO SOBRE PRÁTICAS CIRCULARES PARA A EDUCAÇÃO NO UNIVERSO DIGITAL



Autores

Kolleg für Management und Gestaltung nachhaltiger Entwicklung (KMGNE, Alemanha)

Sucessos Criativos Lda Portugal Norte (SC, Portugal)

Higher School of Transport "Todor Kableshev" (HST, Bulgaria)

FIFTH GENERAL LYCEUM Larisas (FGLL, Grécia)

Fritz-Greve-Gymnasium (FGGM, Alemanha)

Zespół Szkół Agrotechnicznych i Ogólnokształcących im. Józefa Piłsudskiego (ZAI, Polónia)

Hadiye Kuradaci Bilim Ve Sanat Merkezi Tarsus (HKB, Turquia)

Coordenador

Kolleg für Management und Gestaltung nachhaltiger Entwicklung (KMGNE, Alemanha)

Declaração de Divulgação



**Co-funded by
the European Union**

O projeto "Circular Practices for Education in the Digital Universe" é financiado pela União Europeia. Os pontos de vista e as opiniões expressas são as do(s) autor(es) e não refletem necessariamente a posição da União Europeia ou da Agência de Execução Europeia da Educação e da Cultura (EACEA). Nem a União Europeia nem a EACEA podem ser tidos como responsáveis por essas opiniões.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Economia Circular e Abordagens da CE na Educação	2
3	Soluções de Mobilidade Circular na Educação	11
4	Perspetivas Futuras sobre o Uso da Inteligência Artificial na Economia Circular	20
5	Resultados do Inquérito sobre Abordagens Circulares nos Currículos do Ensino Secundário	30
6	Resultados do Inquérito sobre as Perspetivas, Experiências e Necessidades dos Professores em Relação à Educação EC nas Escolas	33
7	Conclusion	45

1. Introdução

Face aos crescentes desafios ambientais e às desigualdades sociais, os modelos económicos lineares tradicionais, caracterizados pela abordagem "extrair, produzir, descartar", revelam-se cada vez mais insustentáveis. Por exemplo, a obsolescência programada, em que os produtos são concebidos com um prazo de validade limitado para incitar os consumidores a comprá-los novamente, é uma estratégia para gerar lucro nesta economia. Por conseguinte, as transformações rumo a uma Economia Circular são cruciais para enfrentar a crise climática e os desafios conectados.

Este estudo "Práticas Circulares para a Educação no Universo Digital" resulta do projeto CircEdu (2024-1-DE03-KA220-SCH-000250897), cofinanciado pela União Europeia. Em todos os países parceiros envolvidos na criação deste estudo (Bulgária, Alemanha, Grécia, Portugal, Polónia e Turquia), foi identificada a necessidade de práticas e materiais educativos abrangentes sobre a educação circular. Assim sendo, o consórcio do projeto CircEdu, composto pela Kolleg für Management und Gestaltung Nachhaltiger Entwicklung (KMGNE, Alemanha), Sucessos Criativos Lda Portugal Norte (SC, Portugal), Escola Superior de Transportes "Todor Kableshkov" (HST, Bulgária), FIFTH GENERAL LYCEUM Larisas (FGLL, Grécia), Fritz-Greve-Gymnasium (FGGM, Alemanha), Zespół Szkół Agrotechnicznych i Ogólnokształcących h im. Józefa Piłsudskiego (ZAI, Polónia) e Hadiye Kuradaci Bilim Ve Sanat Merkezi Tarsus (HKB, Türkiye) realizaram uma extensa pesquisa documental e criaram duas pesquisas diferentes dirigidas às escolas secundárias do consórcio do projeto e aos seus professores. Com estes inquéritos, o consórcio conseguiu detetar a realidade dos grupos-alvo do projeto, os seus conhecimentos e necessidades, bem como uma visão sobre o estado das práticas de EC no ensino secundário nas escolas europeias.

A investigação demonstrou que existe uma vasta investigação relacionada com a economia circular em geral, mas material insuficiente na área do ensino secundário, tanto na investigação como na prática. Assim, o objetivo deste estudo é reunir conhecimento sobre este tema que possa servir de base para o desenvolvimento futuro de metodologias de aprendizagem. Os resultados dos questionários são apresentados numa comparação entre os quatro países diferentes num relatório resumido.

Para além da introdução, o estudo está dividido em cinco capítulos:

2. Economia Circular e Abordagens da CE na Educação
3. Soluções de Mobilidade Circular na Educação
4. Perspetivas Futuras sobre o Uso da Inteligência Artificial na Economia Circular
5. Resultados do Inquérito sobre Abordagens Circulares nos Currículos do Ensino Secundário
6. Resultados do Inquérito sobre Perspectivas, Experiências e Necessidades dos Professores sobre a Educação em EC nas Escolas

2. Economia Circular e Abordagens da CE na Educação

No capítulo seguinte, será apresentado o conceito de Economia Circular (EC) em geral e a educação em EC em particular.

Com o relatório do Clube de Roma "Limites do Crescimento" (1972), o Relatório Brundtland da ONU (1987) e a Conferência Mundial da ONU no Rio de Janeiro (1992), a percepção geral das consequências do metabolismo capitalista começou a deslocar-se para um novo e necessário paradigma de desenvolvimento. A esta desejada mudança de rumo deu-se o nome de desenvolvimento sustentável, com o objetivo de transformar as práticas sociais e individuais em menos, mais circulares, mais duradouras, mais regionais e mais cooperativas. Consequentemente, o sistema económico subordina-se e integra-se no organismo finito da Terra (ver Lovelock & Margulis 2007).

Alinhada com este paradigma, a Economia Circular (EC) reconhece que os recursos naturais são limitados e procura prolongar o ciclo de vida dos materiais, mantendo-os em utilização através de práticas como a reutilização, reparação, refabricação, partilha e reciclagem. Os princípios fundamentais da CE incluem os 3Rs – reduzir, reutilizar e reciclar – e uma versão expandida conhecida como os 6Rs, que acrescenta redesenhar, refabricar e recuperar (ver Jawahir & Bradley 2016). A CE é uma estrutura económica na qual as etapas de planeamento, obtenção de recursos, aquisição, produção e reprocessamento são intencionalmente concebidas e geridas para melhorar a saúde dos ecossistemas e o bem-estar humano (ver Murray et al. 2017). Como modelo generativo e restaurativo, a CE procura preservar o valor dos produtos, materiais e recursos durante o maior tempo possível, reduzindo assim a geração de resíduos finais (Ranta et al. 2018).

Embora grande parte do foco esteja na inovação, como a criação de novas tecnologias e modelos de negócio para manter a circulação de materiais, isto também envolve a eliminação de resíduos através de um melhor design, a substituição de materiais não renováveis por alternativas renováveis e o apoio à regeneração dos ecossistemas naturais. O Parlamento Europeu (2023) afirma os seguintes benefícios principais de uma transição para a CE: limitar a perda de biodiversidade, reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, reduzir o desperdício, diminuir a dependência de matérias-primas e poupar dinheiro aos consumidores através de produtos mais duráveis. Além disso, é mencionado o crescimento económico, embora este ponto não reflita muitas descobertas científicas que assumem que a CE anda de mãos dadas com o decrescimento (ver Winans et al. 2015: 825–826). No entanto, seguir abordagens pós-crescimento não significa necessariamente um declínio do bem-estar, mas pode até levar a um aumento.



Figura 1: O modelo de economia circular: menos matéria-prima, menos resíduos, menos emissões.
Fonte: Serviço de Estudos do Parlamento Europeu (Parlamento Europeu 2023).

O conceito de CE não tem uma origem ou criador único e claramente identificável. No entanto, várias figuras-chave moldaram o seu desenvolvimento, incluindo o académico norte-americano John Lyle, o seu aluno William McDonough, o químico alemão Michael Braungart e o arquiteto e economista Walter Stahel (ver Winans et al. 2015: 825–826). As influências sobre a ideia de CE podem também incluir "Primavera Silenciosa", de Rachel Carson, o já referido relatório do Clube de Roma dos anos 70 sobre os "limites do crescimento", a analogia da "nave espacial Terra" introduzida por Barbara Ward e Kenneth Boulding e o trabalho do ecoeconomista Herman Daly (ibid.).

O quadro da Economia Circular (EC) está interligado com outras ideias, algumas das quais já existiam anteriormente, como a simbiose industrial (ver Winans et al. 2015: 825–826). No âmbito da ecologia industrial e da teoria dos sistemas, a EC está ligada a diversas disciplinas, incluindo a termodinâmica e a economia ecológica (ibid.). De acordo com a teoria dos sistemas e as leis da termodinâmica, a implementação de estratégias de EC tende a deslocar os sistemas económicos para uma fase de "decrecimento", em vez de apoiar um desenvolvimento tradicional orientado para o crescimento (ibid.), alinhando-se com teorias económicas pós-crescimento e de decrecimento.

Em países como a Alemanha e Portugal, o conceito de EC é aplicado à gestão de resíduos e muitas empresas utilizam o conceito para melhorar os seus fluxos de materiais (ibid.: 826). A UE implementou um plano de ação para a EC com o objetivo “de construir uma economia circular e neutra em carbono até 2050” (European Parliament 2023), através da implementação de várias legislações abrangendo ecodesign, embalagens, greenwashing, direito à reparação e gestão de resíduos (ver ibid.). Apesar do número crescente de iniciativas nesta área, a componente social é frequentemente negligenciada.

A Agenda 2030 das Nações Unidas destaca que a sustentabilidade ambiental, social e económica estão profundamente interligadas e não podem ser abordadas isoladamente. À medida que se tornam mais evidentes as ligações entre desafios ambientais como as alterações climáticas, o uso excessivo de recursos e os resíduos, e desafios sociais como a desigualdade e a mudança na natureza do trabalho, a necessidade de alinhar a ação ambiental com a justiça social torna-se cada vez mais premente. Por isso, o conceito de uma “transição justa” que combine sustentabilidade ambiental, emprego digno, inclusão social e erradicação da pobreza está a ganhar relevo nos discursos sobre sustentabilidade.

Uma transição justa no âmbito da economia circular oferece uma forma de reduzir resíduos, impulsionar a inovação e promover o desenvolvimento sustentável, ao mesmo tempo que aborda desigualdades sociais e económicas, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, para que ninguém fique para trás (ver Schröder 2020). À medida que as políticas de economia circular avançam, especialmente num contexto de digitalização e transformações industriais, torna-se crucial avaliar o seu impacto no emprego e nos meios de subsistência. É essencial integrar proteções sociais para evitar que os grupos mais vulneráveis sofram as maiores consequências de mudanças como a perda de empregos ou a deterioração das condições laborais (ibid.).

Os países de baixo e médio rendimento, que dependem de sectores económicos lineares como a mineração, a produção de bens de consumo rápido, os têxteis e a agricultura, poderão enfrentar desafios com as transições circulares (ibid.). Estes países necessitarão de apoio internacional direcionado para se adaptarem.

A cooperação global eficaz, mecanismos financeiros transparentes e responsáveis, uma governação justa e políticas coordenadas a todos os níveis de governo serão fundamentais para gerir a transição (ibid.).

Além disso, a Doughnut Economics de Kate Raworth oferece um quadro transformador adicional que propõe um espaço seguro e justo para a humanidade. Este modelo equilibra a necessidade de satisfazer as necessidades essenciais de todas as pessoas (a fundação social) sem ultrapassar os limites ecológicos do planeta (o teto ecológico) (ver Raworth 2017). O modelo do “Donut” desafia o enfoque convencional no crescimento económico perpétuo, defendendo, em alternativa, economias regenerativas e distributivas. Salienta a importância do pensamento sistémico, reconhecendo a interligação entre os sistemas sociais e ecológicos. A EC pode complementar o modelo do Donut ao propor uma mudança sistémica de sistemas lineares para sistemas circulares, incorporando oportunidades e resiliência social e económica.

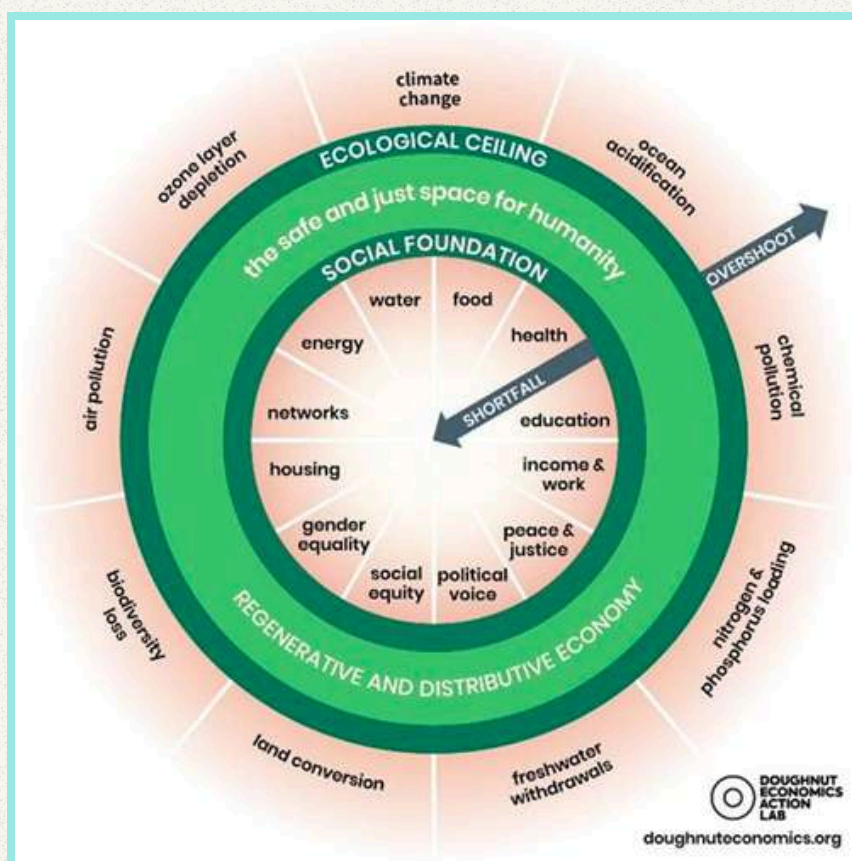


Figura 2: The Doughnut of social and planetary boundaries.

Fonte: Kate Raworth and Christian Guthier. CC-BY-SA 4.0 (Raworth 2017).

A implementação dos princípios da Economia Circular (EC) exige uma mudança fundamental na forma como as sociedades produzem e consomem bens. Implica repensar o design de produtos, modelos de negócio, infraestruturas, políticas e comportamentos individuais. A sensibilização pode desempenhar um papel crucial nesta transição, ao dotar os indivíduos de conhecimentos e competências para participarem em práticas circulares e impulsionarem mudanças institucionais e sistémicas. Assim, a educação é um fator-chave na transição para uma Economia Circular. Para além de promover a sensibilização, desenvolve competências e molda valores alinhados com práticas sustentáveis. A integração dos conceitos de EC nos sistemas educativos prepara os estudantes para navegarem e influenciarem a transformação socioecológica em curso.

Conceitos como a Educação para o Desenvolvimento Sustentável (EDS) já estão amplamente estabelecidos, embora interpretados de diversas formas. Por exemplo, as interpretações da EDS oferecem uma variedade de definições para a EC — algumas centradas sobretudo na reciclagem, outras, como nesta investigação, com abordagens mais amplas e holísticas que incluem fatores sociais e mudança cultural (ver Kirchherr & Piscicelli 2019). Por outro lado, a investigação sobre educação específica para a EC ainda é limitada. Kirchherr & Piscicelli (2019) propõem uma abordagem baseada na literatura sobre EDS e identificam cinco princípios pedagógicos adequados para a ECE (Educação para a Economia Circular): “interatividade, não dogmatismo e reciprocidade, bem como alinhamento construtivo e aprendizagem baseada em problemas”.

Outro quadro de referência relevante neste contexto é o GreenComp – o quadro europeu de competências para a sustentabilidade, desenvolvido pelo Joint Research Centre (JRC), o serviço científico e de conhecimento da Comissão Europeia (ver Bianchi et al. 2022: 2). O objetivo é promover atitudes, competências e conhecimentos para a sustentabilidade, propondo 12 competências organizadas em quatro áreas-chave:

1. Incorporar valores de sustentabilidade, incluindo as competências: valorizar a sustentabilidade, promover a justiça e proteger a natureza.
2. Abraçar a complexidade da sustentabilidade, incluindo as competências: pensamento sistémico, pensamento crítico e formulação de problemas.
3. Perspetivar futuros sustentáveis, incluindo as competências: literacia de futuros, adaptabilidade e pensamento exploratório.
4. Agir em prol da sustentabilidade, incluindo as competências: ação política, ação coletiva e iniciativa individual.

Alguns países já incluem a educação para a Economia Circular (EC) nas suas práticas e políticas. Na Finlândia, por exemplo, a educação para a EC está integrada em todos os níveis de ensino, desde o ensino básico até à formação profissional. Programas como o Yrityskylä oferecem oportunidades de aprendizagem experiencial, onde os alunos participam em atividades económicas simuladas que incorporam princípios da EC (ver Circular Design Suomi 2023 e Tiippana et al. 2023). Tiippana et al. (2023) propõem a adaptação do modelo finlandês a diferentes sistemas educativos.

O ensino secundário constitui uma fase crucial para incutir os princípios da EC. Nesta etapa, os alunos desenvolvem capacidades cognitivas para compreender sistemas complexos e a agência necessária para promover mudanças. A integração da EC não só em disciplinas como ciências, tecnologia, engenharia e matemática (STEM), mas também nas áreas das humanidades, línguas, artes e ciências sociais, proporciona uma compreensão holística da sustentabilidade. Os estudantes podem ser incentivados a desenvolver os seus próprios projetos que incluam práticas circulares.

Para além das aplicações práticas, a educação para a EC promove uma mudança filosófica na forma como percebemos a nossa relação com o ambiente, incentivando uma transformação cultural através das narrativas que construímos sobre o mundo. Promove a transição de visões lineares e antropocêntricas para perspetivas circulares e ecocêntricas, que reconhecem a interdependência de todas as formas de vida. Isto está em sintonia com muitas filosofias indígenas que valorizam as relações com o “mais-do-que-humano” e com os ciclos ecológicos da vida. Pode ainda abrir espaço para discursos sobre conceitos alternativos de tempo em espiral, ligando a história humana à natureza, bem como para uma compreensão intergeracional mais profunda que inclui os antepassados e os descendentes (ver Fritsch 2024), sublinhando a unidade entre vida e morte.

A incorporação destas perspetivas na educação fomenta um compromisso ético mais profundo com a sustentabilidade. Desafia os alunos a refletirem não só sobre os aspetos técnicos da EC, mas também sobre os imperativos morais da convivência multiespécie (ver Haraway 2016) e da equidade social.

Além disso, integrar conhecimentos e práticas tradicionais na educação para a EC enriquece a aprendizagem ao ligar os alunos às histórias locais e a práticas sustentáveis. Por exemplo, explorar técnicas tradicionais de construção que utilizam materiais locais e renováveis pode fornecer ensinamentos valiosos sobre design circular sustentável. Deste modo, estratégias úteis que desapareceram com o tempo podem ser recuperadas, adaptadas aos tempos modernos ou combinadas com novas ideias (ver Watson 2019).

Esta abordagem não só preserva o património cultural e fortalece a ligação dos alunos ao seu ambiente, como também demonstra a relevância das práticas tradicionais para enfrentar os desafios contemporâneos da sustentabilidade.

A transição para uma economia circular exige uma estratégia educativa abrangente que integre dimensões cognitivas, práticas e éticas. Ao incorporar os princípios da EC no ensino secundário, capacitamos os alunos com as ferramentas necessárias para se envolverem criticamente e moldarem um futuro sustentável. Esta transformação educativa é essencial para formar uma sociedade que valorize a sustentabilidade social e ecológica, lançando as bases para uma sociedade resiliente e justa que prospere dentro dos limites ecológicos do planeta.

Referências

Bianchi, G., Pisiotis, U., Cabrera Giraldez, M. (2022). GreenComp – The European sustainability competence framework. Bacigalupo, M., Punie, Y. (ed.), EUR 30955 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Circular Design Suomi (2023). Circular Design – a path towards circular economy, training programme. <https://circulardesignsuomi.fi/en/frontpage/>

European Parliament (2023). Circular economy: definition, importance and benefits. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>

Fritsch, M. (2024). Indigenous Accounts of Spiraling Time. Yearbook for Eastern and Western Philosophy, 7(1), 60-86.

Haraway, D. J. (2016). Staying with the trouble: Making kin in the Chthulucene. Duke University Press.

Jawahir, I. S., & Bradley, R. (2016). Technological elements of circular economy and the principles of 6R-based closed-loop material flow in sustainable manufacturing. Procedia Cirp, 40, 103-108.

Kirchherr, J., & Piscicelli, L. (2019). Towards an education for the circular economy (ECE): five teaching principles and a case study. Resources, Conservation and Recycling, 150, 104406.

Lovelock, J., & Margulis, L. (2007). The gaia hypothesis. New York.

Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. Journal of business ethics, 140, 369-380.

Ranta, V., Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., & Mäkinen, S. J. (2018). Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe. Resources, Conservation and Recycling, 135, 70-82.

Raworth, K. (2017): Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st Century Economist. London: Penguin Random House.

Schröder, P. (2020). Promoting a just transition to an inclusive circular economy (pp. p-33). London: Royal Institute of International Affairs.

Tiippana-Usvasalo, M., Pajunen, N., & Holuszko, M. (2023). The role of education in promoting circular economy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 16(1), 92–103.

Watson, J. (2019). *Lo-TEK: Design by radical indigenism*. Taschen.

Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833.

3. Soluções de Mobilidade Circular na Educação

À medida que o mundo avança para sistemas mais sustentáveis, o conceito de Mobilidade Circular tornou-se um pilar fundamental dentro da Economia Circular. Dado o crescente fosso global de circularidade (Rakowski et al. 2025), integrar esta abordagem no ensino secundário é essencial para preparar os alunos para um futuro que valorize a sustentabilidade, a inovação e o uso responsável dos recursos.

A mobilidade circular abrange várias estratégias de transporte sustentável, como veículos elétricos, serviços de mobilidade partilhada, integração de energias renováveis e planeamento urbano inteligente. A inclusão destes conceitos no currículo escolar permite aos alunos compreenderem a interligação entre tecnologia, ambiente e sociedade. Capacita-os a pensar criticamente sobre como os sistemas de transporte podem evoluir de modelos lineares de consumo para modelos circulares de otimização de recursos.

A aprendizagem baseada em projetos pode simular desafios reais enfrentados por gestores de mobilidade — como equilibrar eficiência, infraestruturas e objetivos ambientais —, permitindo aos alunos explorar soluções estratégicas, técnicas e logísticas. Através de projetos interdisciplinares, os estudantes podem analisar como as cidades reduzem emissões, como os materiais são reutilizados na fabricação de veículos e como as energias renováveis podem alimentar os sistemas de transporte do futuro.

Este capítulo oferece um guia abrangente sobre Soluções de Mobilidade Circular, explorando a sua implementação, benefícios, desafios e perspectivas futuras através de contributos de especialistas, estudos de caso reais e estratégias práticas (Green.org, 2024).

Key Themes for Classroom Integration

1. Sustainable Transportation

The transition to sustainable transportation includes electric vehicles (EVs), bike-sharing programs, and low-emission public transit. These initiatives reduce fossil fuel dependency and improve air quality (European Commission 2025a).

2. Eficiência de Recursos na Mobilidade

A indústria automóvel recorre cada vez mais a materiais reciclados e implementa sistemas de produção em ciclo fechado, com o objetivo de minimizar o desperdício e otimizar o uso de recursos (Green.org 2024).

3. Planeamento Urbano e Infraestruturas Verdes

A incorporação de tecnologias no planeamento urbano, como os sistemas inteligentes de tráfego e os Planos de Mobilidade Urbana Sustentável, melhora a mobilidade e reduz as emissões (Hartley et al. 2023).

4. Integração de Energias Renováveis

O uso de tecnologias solares e de hidrogénio nos transportes reduz as emissões de carbono e promove a eficiência energética. A expansão das redes de carregamento de veículos elétricos alimentadas por fontes renováveis é essencial (Barman et al. 2023).

5. Redução de Resíduos na Mobilidade

Os fabricantes automóveis estão a adotar estratégias para reciclar e reutilizar materiais como alumínio, plásticos e baterias. As cadeias de abastecimento circulares e a produção ecológica ajudam a reduzir o desperdício (Lean Manufacturing Junction 2022).

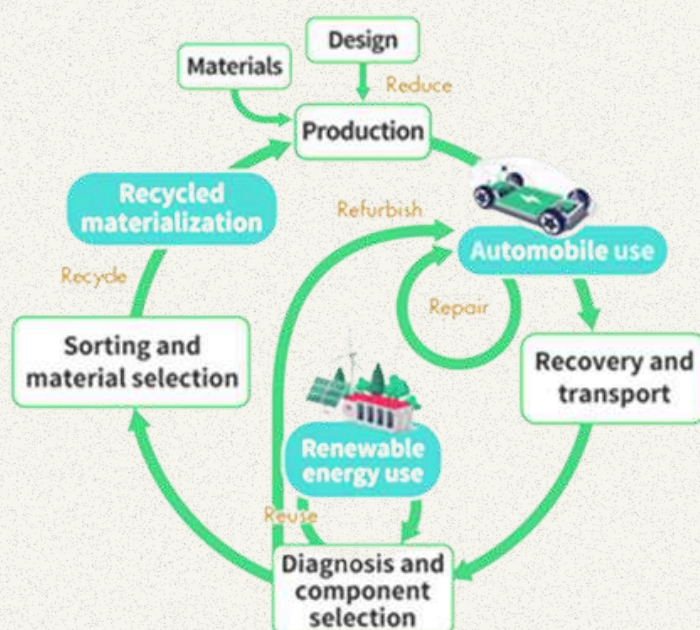


Figura 3: Implementation of CE principles in automobile production.

Fonte: https://www.tytlabs.co.jp/en/assets/images/technology/project/project2_image_01.png

6. Políticas e Regulamentação

Governos e organizações globais implementam estratégias para promover a mobilidade sustentável. A estratégia da União Europeia visa reduzir as emissões do setor dos transportes em 90% até 2050 (European Commission 2025b).

7. Educação e Sensibilização Pública

A integração dos princípios da economia circular nos currículos escolares e em programas comunitários promove a sustentabilidade. Oficinas e ferramentas digitais incentivam comportamentos sustentáveis e ensinam os alunos a sensibilizar a comunidade sobre mobilidade circular (World Economic Forum 2022).

8. Tecnologia e Inovação

A gestão de tráfego baseada em inteligência artificial, a logística inteligente e a automação aumentam a eficiência dos transportes e reduzem o impacto ambiental.

9. Modelos Colaborativos

Parcerias entre indústria e comunidades impulsionam a mobilidade sustentável. Programas como o URBACT demonstram a eficácia da cooperação local (European Commission 2025b).

10. Impacto Económico e Social

A mobilidade circular contribui para a criação de emprego, o crescimento económico e a sustentabilidade urbana, ao reduzir emissões e fomentar a inovação (World Economic Forum 2022).

11. Implementação

A economia circular exige uma transformação profunda nos setores dos transportes e da logística, requerendo novas infraestruturas, processos e tecnologias para garantir sustentabilidade e eficiência. Uma estratégia essencial é priorizar a sustentabilidade em todas as operações, integrando práticas ecológicas na escolha de veículos, combustíveis, design de armazéns e gestão de resíduos, bem como a adoção de práticas como a Logística Reversa (Reverse Logistics – RL) e a Remanufatura (Remanufacturing) (Ji-Hyland et al. 2025). Adicionalmente, a digitalização desempenha um papel crucial na viabilização da logística circular. Tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e o blockchain permitem o rastreamento do ciclo de vida dos produtos, a otimização de recursos e a colaboração nas cadeias de abastecimento. Inteligência artificial avançada e aprendizagem automática melhoram ainda mais a otimização de rotas, reduzem quilómetros em vazio e minimizam o consumo de combustível (Schumann et al. 2022).



Figura 4: The 9Rs of circular economy to better mobility's environmental balance.

Fonte: VCÖ 2022 <https://vcoe.at/publikationen/vcoe-factsheets/detail/implementing-the-circular-economy-in-mobility>

O investimento no transporte intermodal é outro passo essencial. Incentivar o uso do transporte ferroviário, fluvial e de outros modos sustentáveis contribui para a redução das emissões, ao mesmo tempo que melhora as infraestruturas de recolha, triagem e processamento. A implementação bem-sucedida dos princípios da economia circular exige colaboração entre os diversos intervenientes — operadores logísticos, fabricantes, decisores políticos e parceiros —, assegurando a partilha de dados e uma comunicação aberta para uma utilização eficiente dos recursos (Crispin & Parthasarathy 2025).

A última etapa apresenta desafios específicos, exigindo soluções como micro-mobilidade, entregas por drones e pontos de recolha locais para aumentar a eficiência. Além disso, é fundamental promover uma cultura de sustentabilidade no setor, o que implica formação de colaboradores, programas de capacitação e a definição de metas ambiciosas de sustentabilidade (Crispin & Parthasarathy 2025).

Ao adotar a inovação, a colaboração e a sustentabilidade, os operadores logísticos podem construir um futuro mais resiliente e ecológico. Esta transformação exige um investimento significativo em tecnologia, infraestruturas e capital humano, mas os benefícios a longo prazo tornam-na uma iniciativa essencial.

A adoção bem-sucedida de Soluções de Mobilidade Circular requer uma abordagem estratégica, planejamento cuidadoso e colaboração entre os principais intervenientes. As organizações devem implementar práticas sustentáveis e, ao mesmo tempo, evitar erros comuns para maximizar a eficiência e o impacto duradouro.

Estratégias para o Sucesso

Adotar tecnologia e inovação: Aproveitar o potencial da IoT, da inteligência artificial e da análise de dados para otimizar a gestão de recursos, reforçar a manutenção preditiva e melhorar os serviços de mobilidade partilhada. Estas tecnologias permitem operações circulares mais inteligentes e eficientes.

Colaborar com parceiros diversos: Envolver os diferentes intervenientes da cadeia de valor — fornecedores, decisores políticos, consumidores. A colaboração intersectorial fomenta soluções inovadoras e garante alinhamento com os objetivos de sustentabilidade.

Avaliar e adaptar continuamente: Avaliar regularmente os indicadores-chave de desempenho (KPIs) e ajustar estratégias conforme necessário. A mobilidade circular exige melhorias constantes para acompanhar as tendências do setor e manter a eficiência operacional.

Erros Comuns a Evitar

Negligenciar o envolvimento das partes interessadas: A falta de participação de parceiros-chave pode atrasar a adoção e gerar resistência à mudança. A transparência e a colaboração são essenciais em iniciativas circulares.

Focar apenas em ganhos a curto prazo: Embora a redução de custos seja importante, priorizar a sustentabilidade a longo prazo assegura o sucesso duradouro do negócio. Uma visão de curto prazo compromete os esforços de mobilidade circular e limita os benefícios ambientais.

Ignorar mudanças regulamentares: Manter-se atualizado sobre novas políticas e requisitos legais relacionados com transporte e sustentabilidade. Não acompanhar as regulamentações pode implicar riscos operacionais e danos reputacionais.

12. Tendências Futuras

As soluções de mobilidade circular visam tornar os sistemas de transporte mais sustentáveis, através da reutilização, reciclagem e otimização de recursos, em oposição ao modelo tradicional take-make-dispose (extrair-produzir-descartar). Esta abordagem prolonga o tempo de vida útil dos veículos, infraestruturas e materiais de transporte através de diversas estratégias: Ciclos de vida otimizados dos veículos, através de processos de remanufatura e recondicionamento, reduzindo o desperdício e maximizando a eficiência; Utilização de materiais reciclados nas infraestruturas rodoviárias e nos centros de transporte, contribuindo para a redução do impacto ambiental; Fontes de energia renovável para o transporte público e logística, apoiando os objetivos de neutralidade carbónica; Logística inteligente, que reduz o desperdício através de embalagens eficientes e cadeias de abastecimento reversas; Soluções de mobilidade partilhada, como car-sharing e bike-sharing, que diminuem a posse individual de veículos e reduzem a congestão urbana; Tecnologias de IA e IoT, que melhoram a otimização de rotas e a manutenção preditiva, tornando os sistemas de transporte mais eficientes; Cadeias de abastecimento circulares, que reduzem ainda mais o desperdício através de sistemas em ciclo fechado, garantindo a máxima reutilização de recursos; Políticas governamentais, que impõem regulamentações amigas do ambiente, impulsionando a adoção alargada de práticas de mobilidade circular.

Implementação Prática nas Escolas

Os educadores podem conceber atividades que simulem a aplicação de sistemas de mobilidade circular. Exemplos incluem: planeamento de rotas com cálculos da pegada de carbono; conceção de estações de carregamento solar para modelos de veículos elétricos; simulação de rotas de entrega por drones na última milha. Através de projetos integrados nas disciplinas STEM, os alunos exploram como a logística inteligente, as cadeias de abastecimento reversas e o rastreamento digital contribuem para a redução do impacto ambiental.

Preparar os Alunos para um Futuro Circular

A mobilidade circular representa uma transformação na forma como a sociedade encara o transporte — passando da posse para o acesso, do desperdício para a reutilização, e da dependência de carbono para soluções renováveis. Integrar estes temas no ensino secundário promove: pensamento sistémico; literacia ecológica; resolução de problemas com espírito empreendedor. Este tipo de educação prepara os jovens para serem agentes ativos de mudança num futuro mais sustentável.

Conclusões & Recomendações

A educação desempenha um papel fundamental na promoção de práticas sustentáveis. O desenvolvimento curricular, os projetos práticos, as parcerias com a comunidade e as campanhas de sensibilização pública garantem que o ensino secundário apoia a mobilidade circular. Esta mudança educativa não só contribui para os objetivos climáticos globais, como também capacita os jovens a imaginar e criar um futuro circular e mais justo.

A economia circular centra-se na redução do desperdício e no prolongamento do ciclo de vida dos produtos e materiais, através da reutilização, reparação e reciclagem. Ao contrário do modelo linear tradicional de produção e descarte, a circularidade promove a utilização contínua dos materiais, minimizando o consumo de recursos e o impacto ambiental.

Um dos setores em que a economia circular está a ganhar maior relevância é o dos transportes e da logística, dada a magnitude dos desafios de sustentabilidade que enfrenta. Estes incluem o elevado consumo de combustíveis fósseis, o desperdício associado a embalagens e equipamentos, e o aumento das devoluções de produtos no comércio eletrónico, que geram emissões, excesso de embalagens e resíduos em aterro.

Para responder a estes desafios, o setor dos transportes pode adotar estratégias circulares, como a otimização de rotas de entrega para reduzir quilómetros em vazio e o consumo de combustível, a integração de energias renováveis em veículos e operações, e a promoção de embalagens reutilizáveis e recicláveis. Sistemas eficientes de devolução e reutilização podem também ajudar a reduzir o desperdício, ao mesmo tempo que criam novas oportunidades económicas. As empresas podem expandir os seus serviços para incluir reparação, acondicionamento e iniciativas de reciclagem de equipamentos de transporte.

Um dos principais obstáculos à implementação de práticas circulares está na gestão da logística reversa. A sua integração eficaz exige planeamento rigoroso, sistemas eficientes de recolha, instalações de triagem e centros de remanufatura. Além disso, a crescente diversidade de materiais requer flexibilidade, tecnologias avançadas e sistemas robustos de gestão de dados.

Ao adotar os princípios da economia circular, o setor dos transportes e da logística pode evoluir para um futuro mais sustentável e eficiente na utilização dos recursos, conciliando o crescimento económico com a responsabilidade ambiental.

Através da adoção de tecnologia, da promoção da colaboração e do compromisso com a melhoria contínua, as organizações podem implementar eficazmente Soluções de Mobilidade Circular, evitando erros comuns. Uma abordagem proativa garante sustentabilidade, eficiência e sucesso a longo prazo num setor dos transportes em constante evolução.

Sources

Barman, P., Dutta, L., Bordoloi, S., Kalita, A., Buragohain, P., Bharali, S., & Azzopardi, B. (2023). Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123003751>

Crispin, A. & Parthasarathy, P. (2025). Geochemical characteristics and paleo weathering in sediments of Noyyal River Basin, Tamilnadu–India. *Environmental Research & Technology*, 8 (1), 163–171 (Scopus Index).

European Commission (2025a). Sustainable transport. Retrieved from https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/sustainable-transport_en

European Commission (2025b). Sustainable urban mobility planning and monitoring. https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/sustainable-urban-mobility-planning-and-monitoring_en

Green.org (2024). The circular economy in automotive: Closing the sustainability loop. <https://green.org/2024/01/30/the-circular-economy-in-automotive-closing-the-sustainability-loop/>

Hartley, K., Schülzchen, S., Bakker, C. A., & Kirchherr, J. (2023). A policy framework for the circular economy: Lessons from the EU. *Journal of Cleaner Production*, 412, Article 137176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137176>

Ji-Hyland, C., White, D., & Khaydarov, R. (2025). The impact of circular economy practices on sustainable logistics performance. *International Journal of Logistics: Research and Applications*. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13675567.2025.2465579>

Lean Manufacturing Junction (2022). The best ways to reduce waste in automotive manufacturing. [Hartley, K., Schülzchen, S., Bakker, C. A., & Kirchherr, J. \(2023\). A policy framework for the circular economy: Lessons from the EU. Journal of Cleaner Production, 412, Article 137176. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137176](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137176)

Rakowski, D., Ewalts, D. & Dall' Acqua, C. (2025). The Global Circularity Gap Report. <https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/global-circularity-gap.html>

Schumann, C., Riedel, R., Franke, S., Nitsche, A., & Runte, C. (2022). Artificial intelligence support for smart logistics systems in industrial environments. SAE Technical Paper, 2022-01-0347. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0347>

World Economic Forum (2022). Circular economy key to accelerating net-zero transportation. <https://www.weforum.org/stories/2022/05/circular-economy-net-zero-transportation/>

4. Perspetivas Futuras sobre o Uso da Inteligência Artificial na Economia Circular

À medida que os educadores procuram dotar a próxima geração com os conhecimentos e ferramentas necessários para liderar esta transição, a integração das tecnologias digitais na Educação para a Economia Circular torna-se cada vez mais essencial. Entre estas tecnologias, a Inteligência Artificial (IA) destaca-se pela sua poderosa capacidade de modelar a complexidade, otimizar a tomada de decisões e automatizar processos de sustentabilidade. Além disso, o Machine Learning (aprendizagem automática) oferece um conjunto crescente de técnicas computacionais capazes de lidar com a complexidade e o dinamismo dos sistemas da economia circular, devendo ser um tema-chave no ensino secundário. Nos últimos anos, investigadores e profissionais têm aplicado diversos tipos de aprendizagem automática para otimizar fluxos de recursos, melhorar a recuperação de materiais, prever impactos ambientais e permitir uma tomada de decisões mais inteligente em vários setores. Os estudos resumidos na tabela anexa refletem aplicações diversas do machine learning alinhadas com os princípios da economia circular, incluindo a reutilização, regeneração, redução de emissões e processos em ciclo fechado.

A **aprendizagem supervisionada** continua a ser um dos paradigmas de machine learning mais amplamente aplicados na investigação em economia circular. Esta abordagem envolve treinar modelos com conjuntos de dados que contêm tanto variáveis de entrada como resultados conhecidos, permitindo ao algoritmo aprender relações preditivas. Uma vez treinado, o modelo pode estimar resultados desconhecidos para novos dados. Nos sistemas circulares, a aprendizagem supervisionada é usada para prever o rendimento ou a qualidade de materiais reciclados, antecipar a disponibilidade de recursos ou avaliar o desempenho de fornecedores com base em critérios de sustentabilidade. Alguns algoritmos comuns incluem as Redes Neurais Artificiais (ANN), eficazes no reconhecimento de padrões complexos em dados ambientais ou agrícolas; a Regressão por Vetores de Suporte (SVR), utilizada para previsões numéricas precisas; e o Random Forest, um método de conjunto robusto que lida bem com ambientes de decisão com múltiplas variáveis, como a reciclagem de plástico PET.

A **aprendizagem não supervisionada**, por sua vez, opera sobre dados sem resultados previamente rotulados. É frequentemente usada para explorar padrões subjacentes, agrupamentos ou anomalias em conjuntos de dados complexos. No contexto da economia circular, a aprendizagem não supervisionada apoia funções como a identificação de tendências no comportamento dos consumidores em relação a produtos sustentáveis, a classificação de fluxos de resíduos por composição, ou a deteção de irregularidades em redes de reciclagem. As técnicas de clustering (agrupamento) e topic modeling (modelação de tópicos) são particularmente valiosas na análise de fontes de dados não estruturados, incluindo redes sociais, registos de resíduos ou feedback de sensores em sistemas de infraestrutura.

O **Reinforcement Learning** (aprendizagem por reforço) introduz adaptabilidade através de ciclos de feedback. Neste modelo, um agente aprende estratégias ótimas através de interações iterativas com um sistema, recebendo recompensas ou penalizações consoante os resultados. Este mecanismo de tentativa e erro torna a aprendizagem por reforço particularmente adequada para contextos operacionais dinâmicos, como logística, gestão de frotas ou agendamento adaptativo em cadeias de abastecimento bio-circulares. Os estudos que aplicam esta técnica concentram-se frequentemente na minimização do consumo de combustível, redução de emissões e melhoria da eficiência dos serviços — objetivos diretamente alinhados com o enfoque da economia circular na conservação de recursos e resiliência dos sistemas.

As técnicas de Deep Learning, incluindo as redes neuronais convolucionais (CNN), estão a ganhar destaque em aplicações que envolvem reconhecimento de imagens, classificação e análise sensorial. Estas técnicas são especialmente eficazes na automatização da triagem de resíduos, deteção de contaminação em materiais recicláveis ou avaliação da qualidade de produtos reconicionados. O deep learning permite uma automatização rápida e escalável dos processos de classificação de materiais, essencial para aumentar as taxas de recuperação e reduzir operações intensivas em mão de obra nas infraestruturas da economia circular.

Por fim, a IA Explicável (Explainable AI – XAI) tornou-se uma inovação crítica onde são exigidas transparência e responsabilidade nos modelos. Ao contrário dos modelos tradicionais de machine learning do tipo “caixa negra”, a XAI fornece explicações sobre os fatores que influenciam as previsões, apoiando a tomada de decisão em áreas como políticas ambientais, planeamento da redução de emissões ou desenvolvimento urbano sustentável. Modelos como o XGBoost, quando combinados com valores SHAP (SHapley Additive exPlanations), permitem identificar as variáveis mais influentes nos resultados de sustentabilidade, tornando as intervenções na governação da economia circular mais informadas e justificáveis.

Em conjunto, estas abordagens de aprendizagem automática constituem um conjunto complementar de ferramentas para operacionalizar a circularidade. A sua aplicação abrange desde a previsão e otimização até à automatização e conformidade — cada uma contribuindo para a reconfiguração sistémica dos sistemas de produção, consumo e recuperação necessários para a transição para uma economia circular.

Abordagens de Machine Learning em Contextos de Economia Circular

A Inteligência Artificial (IA) é cada vez mais reconhecida como um facilitador estratégico no avanço da economia circular (EC). Em vez de atuar como uma tecnologia de suporte, a IA está a moldar ativamente o design, o controlo e a otimização de sistemas circulares em múltiplos setores. Da agricultura ao planeamento urbano, da recuperação de materiais à gestão do ciclo de vida dos produtos, a IA está a facilitar a transição de modelos lineares do tipo “extrair-produzir-descartar” para sistemas regenerativos e circulares, que reduzem o desperdício e maximizam a eficiência na utilização de recursos.

Uma das aplicações mais evidentes da Inteligência Artificial (IA) na economia circular (EC) encontra-se na modelação preditiva para a otimização de recursos. No setor da agricultura bio-circular, Pitakaso et al. (2025) aplicaram reinforcement learning e inteligência múltipla artificial para otimizar o planeamento de rotas e a programação logística da frota de transporte de cana-de-açúcar. Este sistema conseguiu reduzir o consumo de combustível e as emissões, contribuindo para práticas agrícolas circulares que fecham o ciclo da biomassa (Pitakaso et al., 2025). De forma semelhante, Kravchenko et al. (2025) utilizaram support vector regression para prever as propriedades químicas do biochar derivado de resíduos alimentares. O seu trabalho apoia a engenharia de precisão em sistemas de conversão de resíduos em energia, garantindo que a produção de biochar esteja alinhada com os objetivos da EC, ao maximizar a reutilização e reduzir os resíduos remanescentes (Kravchenko et al., 2025).

Outro domínio em que a IA está a transformar as práticas da EC é a triagem de resíduos e a recuperação de materiais circulares. Os avanços na visão computacional, especialmente através do deep learning, estão a melhorar significativamente a eficiência dos sistemas de reciclagem. Faghih et al. (2024) demonstraram como as redes neuronais convolucionais (CNN) podem classificar têxteis pós-consumo por tipo de tecido com elevada precisão. Isto melhora a pureza dos materiais recuperados e facilita a sua reutilização eficaz na indústria têxtil (Faghih et al., 2024). No domínio da reciclagem de plásticos, Abedsoltan et al. (2025) desenvolveram um modelo híbrido que combina Random Forest e redes neuronais artificiais (ANN) para simular processos de hidrólise de PET, ajudando os recicladores a melhorar tanto o rendimento como a pureza dos plásticos reciclados em sistemas de ciclo fechado (Abedsoltan et al., 2025).

A IA também desempenha um papel central nos sistemas urbanos circulares. Nas cidades inteligentes, a IA permite uma gestão mais sustentável da infraestrutura, através da gestão dinâmica de recursos como a água e os resíduos. Ojadi et al. (2024) utilizaram previsões temporais baseadas em IA para otimizar o uso da água e a gestão de resíduos sólidos em ambientes urbanos, permitindo às cidades adaptar-se em tempo real aos padrões de consumo e reduzir a pressão ambiental (Ojadi et al., 2024). Para além da eficiência operacional, a IA está a contribuir para o planeamento estratégico urbano. Wang et al. (2025) recorreram à IA Explicável (XAI), combinando XGBoost com valores SHAP, para avaliar o desempenho de iniciativas de carbono circular em cidades piloto na China. Os seus resultados fornecem insights valiosos para a formulação de políticas, identificando as variáveis com maior impacto na redução de emissões e aumentando a transparência de dados na governação da EC (Wang et al., 2025).

Os sistemas industriais e cadeias de abastecimento também estão a beneficiar da integração da IA no design circular. Ghanavati-Nejad et al. (2025) desenvolveram um modelo estocástico baseado em redes neuronais artificiais para apoiar a seleção de fornecedores com base em métricas de resiliência e de economia circular. Este modelo ajuda os fabricantes a incorporar critérios de sustentabilidade nos seus processos de aquisição, promovendo práticas como a remanufatura e o aprovisionamento ético (Ghanavati-Nejad et al., 2025).

De forma semelhante, Meena et al. (2025) apresentaram um quadro de apoio à decisão para cadeias de abastecimento circulares, que utiliza Inteligência Artificial para equilibrar o triplo objetivo da sustentabilidade: eficiência económica, responsabilidade ambiental e justiça social (Meena et al., 2025).

Olhando para o futuro, estão a emergir aplicações mais sofisticadas, nomeadamente sob a forma de ecossistemas industriais coordenados por IA. Telesca (2025) propôs o modelo de Smart Sustainable Development (SSD) para a gestão de Zonas Eco-Industriais, utilizando IA para integrar métricas de desempenho da economia circular, políticas de ordenamento e dados em tempo real sobre fluxos de energia e materiais. O modelo prevê um sistema orquestrado, no qual as indústrias partilham recursos e sincronizam operações com base em análises inteligentes (Telesca, 2025).

Aplicações de Machine Learning na Economia Circular

A tabela apresentada resume as principais utilizações do machine learning (ML) na economia circular (EC). Cada entrada destaca como diferentes técnicas de ML — incluindo aprendizagem supervisionada, não supervisionada, por reforço e deep learning — permitem a otimização de recursos, redução de resíduos, classificação de materiais e adaptabilidade dos sistemas. Esta visão geral liga cada abordagem a funções específicas da EC, oferecendo uma perspetiva clara sobre como as ferramentas inteligentes apoiam soluções regenerativas, de baixo impacto e baseadas em dados em vários setores.

Título	Autores	Tipo de ML	Algoritmo	Aplicação	Impacto na Economia Circular
Mapeamento da Produção de Plantas Aquáticas para Biochar	Banda et al. (2025)	Aprendizagem Supervisionada	Redes Neurais Artificiais (ANN)	Previsão do rendimento de biomassa para produção de biochar	Converte biomassa em energia, otimizando os fluxos de bio-recursos
Economia Verde Bio-Circular na Agricultura	Pitakaso et al. (2025)	Aprendizagem por Reforço	RL com Inteligência Múltipla Artificial	Planeamento de rotas e agendamento logístico para biomassa	Otimiza emissões de transporte e recuperação de recursos na agricultura
Seleção de Fornecedores em Cadeias de Abastecimento Circulares	Ghanavati-Nejad et al. (2025)	Aprendizagem Supervisionada	Modelos Estocásticos de ANN	Seleção de fornecedores com base na resiliência e circularidad	Reforça a sustentabilidade e agilidade em redes de abastecimento

Título	Autores	Tipo de ML	Algoritmo	Aplicação	Impacto na Economia Circular
Modelação da Hidrólise de PET para Plásticos Circulares	Abedsoltan et al. (2025)	Aprendizagem Supervisionada	Random Forest, ANN	Modelação da eficiência do processo de hidrólise de resíduos de PET	Permite a reciclagem em ciclo fechado de plásticos através da otimização de processos químicos
Análise da Economia Circular de Carbono Urbana	Wang et al. (2025)	IA Explicável (XAI)	XGBoost com análise SHAP	Avaliação do desempenho de sustentabilidade em cidades piloto chinesas	Apoia o planeamento urbano alinhado com a EC através de dados sobre a pegada de carbono
IA para Previsão das Propriedades do Biochar	Kravchenko et al. (2025)	Aprendizagem Supervisionada	Regressão por Vetores de Suporte (SVR)	Previsão de propriedades do biochar a partir de resíduos alimentares	Otimiza percursos de valorização de resíduos orgânicos
Reimaginar a Conformidade com IA em Sistemas Waste-to-Value	Ashraf & Mustafa (2024)	Aprendizagem Não Supervisionada	Deteção de Anomalias, Extração de Padrões	Monitorização da conformidade em processos digitais de valorização de resíduos	Garante fluxos de resíduos circulares éticos e rastreáveis
Otimização por IA do Uso de Água e Resíduos em Cidades Inteligentes	Ojadi et al. (2024)	Aprendizagem Supervisionada	Previsão de Séries Temporais	Otimização dos sistemas urbanos de água e resíduos	Promove ciclos de recursos urbanos em circuito fechado
Triagem de Resíduos Têxteis com IA	Faghih et al. (2024)	Visão Computacional / Deep Learning	Redes Neurais Convolucionais (CNN)	Classificação de resíduos têxteis pós-consumo para reciclagem	Melhora as taxas de recuperação e a pureza na reutilização têxtil

AIA na Economia Circular: Oportunidades e Riscos

À medida que os sistemas de Inteligência Artificial (IA) se tornam cada vez mais integrados nas infraestruturas da economia circular (EC), o seu papel está a evoluir de apoio analítico para controlo autónomo e governação preditiva. Estão a surgir aplicações como avaliações do ciclo de vida em tempo real (Kravchenko et al., 2025), micro-redes de energia coordenadas por IA, logística dinâmica para cadeias de abastecimento circulares (Pitakaso et al., 2025) e sistemas autónomos de rastreabilidade para monitorização de fluxos de materiais. Estas ferramentas prometem ganhos significativos em eficiência, transparência e sustentabilidade ecológica. Através de aprendizagem avançada, reconhecimento de padrões e tomada de decisão adaptativa, a IA apoia os objetivos de eliminação de resíduos, regeneração de ecossistemas e fecho de ciclos de recursos em diversos setores.

No entanto, estas capacidades trazem desafios críticos. A governação ética da IA permanece pouco desenvolvida em muitos contextos da EC, onde persistem preocupações com viés algorítmico, opacidade de dados e exclusão de processos de decisão (Floridi et al., 2018). Sem controlo, estes riscos podem amplificar injustiças ambientais ou fragilizar o controlo democrático. Por exemplo, a automação baseada em IA nos sistemas de reciclagem pode marginalizar trabalhadores informais ou recicladores de pequena escala, especialmente em economias de baixos rendimentos onde o acesso à infraestrutura digital é limitado (Vinuesa et al., 2020). Ao mesmo tempo, as cadeias de abastecimento circulares dependem cada vez mais da recolha massiva de dados — através de sensores, contratos inteligentes ou monitorização do comportamento do consumidor — levantando preocupações sobre soberania de dados e privacidade.

Estas preocupações estão agora a ser abordadas por reguladores. O Regulamento Europeu de Inteligência Artificial (AI Act) introduz um quadro legal que classifica os sistemas de IA com base nos seus riscos potenciais, com disposições específicas para sistemas de alto risco utilizados na gestão ambiental, infraestruturas urbanas e controlo industrial (Comissão Europeia, 2021/2024). O AI Act exige transparência, supervisão humana e responsabilidade algorítmica para estes sistemas — princípios particularmente relevantes quando a IA é usada para monitorizar emissões, otimizar o uso de energia ou garantir o cumprimento de normas ligadas à economia circular.

O AI Act adota uma estrutura baseada no risco, dividindo os sistemas de IA em quatro níveis organizados como uma pirâmide. Esta estrutura visa garantir uma regulação proporcional: quanto maior o risco potencial de um sistema de IA para as pessoas, a sociedade ou o ambiente, mais rigorosos são os requisitos regulatórios.

EU AI Act: Risk Levels

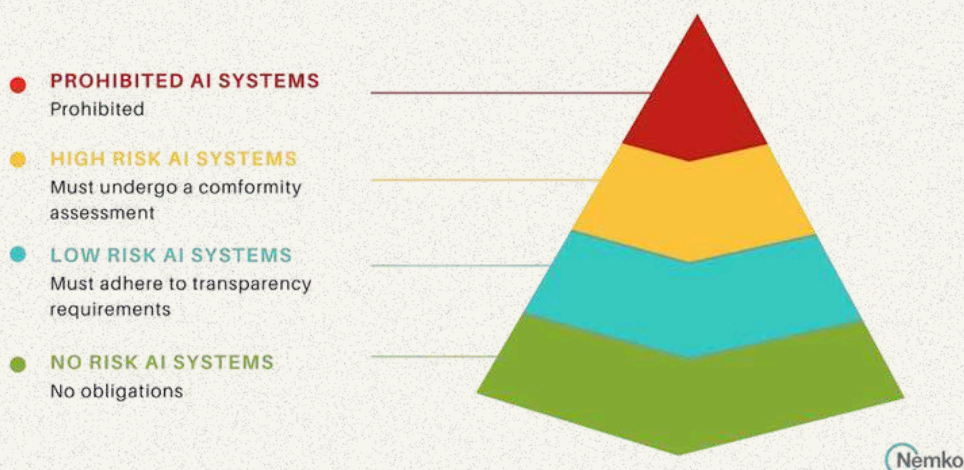


Figura 4: EU AI Act: Risk Levels.

Fonte: <https://www.nemko.com/blog/a-quick-dive-into-the-eu-ai-act>

No topo da pirâmide estão os sistemas de IA de risco inaceitável, considerados demasiado perigosos para serem permitidos no mercado da UE. Estes sistemas são proibidos. No contexto da economia circular, um exemplo seria um sistema de IA utilizado para manipular consumidores através de práticas enganosas de marketing verde — por exemplo, utilizando mensagens subliminares para apresentar falsamente um produto como sustentável. Se tal sistema explorar populações vulneráveis (como crianças ou idosos), enquadra-se nesta categoria de risco máximo e é interdito.

O nível seguinte diz respeito aos sistemas de IA de alto risco, que não são proibidos, mas estão sujeitos a obrigações rigorosas em termos de transparência, qualidade dos dados, supervisão humana e gestão de riscos. Na economia circular, isso pode incluir sistemas de IA utilizados em instalações automatizadas de triagem de resíduos, que classificam materiais para reciclagem. Outro exemplo seria a IA que gere sistemas energéticos críticos numa cidade inteligente ou que otimiza a distribuição de bens reutilizáveis. Embora estes sistemas apoiem os objetivos de sustentabilidade, qualquer erro ou viés pode ter consequências graves — como danos ambientais ou má alocação de recursos — sendo, por isso, considerados de alto risco.

Abaixo encontram-se os sistemas de risco limitado, sujeitos principalmente a requisitos de transparência. Estes sistemas podem interagir com utilizadores ou influenciar decisões, mas é pouco provável que causem danos significativos. Um exemplo seria um assistente digital ou chatbot que orienta os consumidores sobre como reutilizar ou reciclar produtos — funcionalidade útil, mas de baixo impacto em termos de risco.

Estas ferramentas de IA devem informar os utilizadores de que estão a interagir com um sistema de inteligência artificial e podem ter de explicar como são geradas as recomendações (por exemplo, sugerir produtos em segunda mão ou opções de reparação com base nas preferências do utilizador).

Na base da pirâmide estão os sistemas de IA de risco mínimo ou nulo, que não estão sujeitos a restrições legais específicas ao abrigo do AI Act. Estes incluem a maioria das aplicações comuns que não afetam significativamente os direitos ou a segurança das pessoas. No contexto da economia circular, um exemplo seria a IA utilizada para logística interna, como a otimização de rotas para camiões de recolha de recicláveis, ou ferramentas de manutenção preditiva de máquinas numa central de reciclagem. Estas utilizações melhoram a eficiência e a sustentabilidade sem levantar preocupações éticas ou legais — e, por isso, são livremente permitidas.

A pirâmide do AI Act garante que as aplicações de IA em áreas como a economia circular são reguladas de forma proporcional ao seu impacto. Sistemas críticos para o bem-estar público ou ambiental estão sujeitos a normas mais exigentes, enquanto ferramentas de menor risco são incentivadas com mínima interferência. No entanto, alcançar uma economia circular potenciada por IA que seja justa e eficaz requer mais do que cumprimento legal. Exige design responsável, governação inclusiva e inovação centrada na justiça. As decisões algorítmicas devem ser explicáveis, rastreáveis e auditáveis. As comunidades afetadas pela automação — especialmente aquelas inseridas em sistemas laborais ou ecológicos vulneráveis — devem ter voz no modo como os sistemas de IA são concebidos e implementados. A integração de princípios de justiça ambiental na IA para a economia circular assegura que a sustentabilidade não seja alcançada à custa da equidade.

Em conclusão, embora a IA tenha um enorme potencial para expandir os modelos circulares, a sua utilização deve ser guiada por garantias éticas. Quadros como o AI Act da UE fornecem um ponto de partida, mas será essencial manter um diálogo contínuo entre decisores políticos, tecnólogos e sociedade civil para garantir que a inteligência circular seja não só inteligente, mas também justa, inclusiva e responsável.

Referências:

Abbas, S., & Mustafa, M. (2024). Waste valorization meets AI: SME growth and inequality. Working Paper, ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/390629994>

Abedsoltan, R., Jafari, R., Rastegar, M., & Brar, S. K. (2025). Modeling and optimization of enzymatic hydrolysis for PET plastic using machine learning. SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5223492

Almashaleh, I., Wicaksono, H., & Valilai, O. F. (2025). A framework for social media analytics in textile business circularity for effective digital marketing. Smart Cities and Society, 1(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2199853125000794>

Ashraf, M., & Mustafa, M. (2024). Reimagining compliance through AI in waste-to-value systems. Working Paper, ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/390630356>

Aslam, M., & Mustafa, M. (2024). From waste to wealth: AI and FinTech strategies for equitable SME development. Working Paper, ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/390630431>

Banda, M., Simukoko, M., & Kalumba, M. (2025). Utilizing machine learning to map aquatic weed yields for biochar production: A case study in the Bangweulu Wetlands, Zambia. Advances in Environmental and Energy Research, 6(2), 020. <https://www.lidsen.com/journals/aeer/aeer-06-02-020>

Faghih, M., Shokri, A., & Ramezani, M. (2024). AI-enabled textile waste classification for sustainable recycling: A deep learning approach. Sustainability, 17(10), 4264. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/10/4264>

Ghanavati-Nejad, M., Jolai, F., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2025). Supplier selection for resilient-leagile circular supply chains using stochastic ANN-based models. Soft Computing. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-025-10578-z>

Kravchenko, J., Bockel, L., & Li, Y. (2025). Predicting biochar properties from food waste using support vector regression. Waste Management & Research. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725014873>

Meena, P. L., Ghadge, A., & Kumar, V. (2025). A triple bottom line approach to circular supply chain optimization using artificial intelligence. *Annals of Operations Research*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-025-06510-1>

Ojadi, F., Eze, S. C., & Adeleke, I. (2024). AI-driven optimization of water usage and waste in smart cities. Working Paper, ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/390695591>

Pitakaso, R., Jittamai, W., & Chaitiamwong, N. (2025). Bio-circular green economy development in agriculture using reinforcement learning. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816992500537X>

Telesca, L. (2025). A systemic sustainable development model for industrial circular economy in special economic zones. University of Basilicata Doctoral Thesis. <https://iris.unibas.it/bitstream/11563/196975/1/tesi%20dottorato%20di%20ricerca%20Lo%20VECCHIO%20con%20firme.pdf>

Wang, L., Xu, Y., & Zhang, T. (2025). Explainable machine learning to evaluate circular carbon performance in pilot cities. *Environmental Development*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095525001233>

5. Resultados do Inquérito sobre Abordagens Circulares nos Currículos do Ensino Secundário

Esta avaliação baseia-se num inquérito realizado nas quatro escolas secundárias públicas que integram o consórcio do projeto, com a participação de um representante de cada instituição: FIFTH GENERAL LYCEUM Larisas (FGLL, Grécia), Fritz-Greve-Gymnasium (FGGM, Alemanha), Zespół Szkół Agrotechnicznych i Ogólnokształcących im. Józefa Piłsudskiego (ZAI, Polónia) e Hadiye Kuradaci Bilim Ve Sanat Merkezi Tarsus (HKB, Turquia). O objetivo foi recolher informações sobre os currículos, práticas existentes e necessidades no que diz respeito à abordagem educativa da Economia Circular (EC). Embora todas as escolas participantes indiquem a inclusão de tópicos relacionados com a EC nos seus currículos nacionais ou regionais, a profundidade e abrangência dessa inclusão variam significativamente entre os países.

Todas as escolas afirmaram que os seus currículos nacionais/regionais incluem temas específicos relacionados com a EC, com a ressalva de que, na Polónia, apenas uma pequena parte de algumas disciplinas aborda a temática.

As quatro escolas reconhecem que os temas da EC estão presentes no currículo formal, integrados sobretudo em disciplinas da área das ciências (como Biologia, Química, Física) e das humanidades (como História, Estudos Sociais, Economia). Na Turquia e na Polónia, o âmbito é mais alargado, estendendo-se também à área das Tecnologias da Informação e línguas; no caso da Turquia, também às artes. A Alemanha, por sua vez, refere uma abordagem mais centrada na sustentabilidade em geral, sem uma referência explícita à EC.

Existe uma tendência comum na Grécia, Polónia e Alemanha para integrar os tópicos da EC em disciplinas já existentes. A Turquia distingue-se pela ênfase na aprendizagem baseada em projetos e no uso de ferramentas digitais e tecnológicas. Na Polónia, os conteúdos relacionados com a EC estão também presentes em atividades extracurriculares e em colaborações com organizações externas, enquanto a escola alemã aplica igualmente metodologias de aprendizagem por projeto.

Todas as escolas abrangem os principais temas da EC nos seus currículos, sendo a Polónia o país que aborda o conjunto mais completo. As alterações climáticas são integradas em todas as escolas; a biodiversidade é abordada na Grécia, Polónia e Alemanha; as energias renováveis e o consumo sustentável estão presentes na Turquia, Polónia e Alemanha; a gestão de resíduos e a reciclagem são tratadas na Grécia, Turquia e Polónia. A Polónia e a Alemanha incluem ainda conservação da água e justiça social e equidade. A ética ambiental é abordada apenas no currículo grego.

A Alemanha volta a reportar uma abordagem menos explícita, indicando que temas como a produção de energia podem ser ensinados sem que haja um foco claro nas energias renováveis. Esta variação sugere que, embora os temas da EC estejam presentes, a terminologia e o âmbito abordado podem diferir significativamente, o que pode levar a inconsistências na compreensão por parte dos alunos.

Apenas a Turquia faz referência explícita aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no currículo. A Polónia e a Alemanha referem uma inclusão parcial, enquanto a Grécia indica não fazer qualquer referência. Esta diferença é relevante, uma vez que os ODS constituem um quadro de referência globalmente reconhecido, que se alinha com a educação para a EC e pode contribuir para uma estratégia educativa mais coesa.

Todas as escolas declararam que não utilizam quadros ou orientações específicas para a análise curricular (como a Educação para o Desenvolvimento Sustentável da UNESCO ou quadros locais) e que apenas os alunos, e não os encarregados de educação, estão envolvidos na educação para a EC.

Para além do currículo, foi analisada a inclusão de princípios da EC nas práticas pedagógicas. Na Grécia, estes são integrados no currículo e em programas ambientais; na Turquia, a aprendizagem baseada em projetos ligados à EC faz parte das atividades em sala de aula; na Polónia, os alunos participam em atividades extracurriculares promovidas por professores e em colaboração com organizações externas ou comunidades locais; na Alemanha, a EC é também abordada em aulas regulares ou através do desenvolvimento de projetos específicos. A Polónia é a única escola com parcerias ativas com organizações externas para promover a educação para a EC. As restantes escolas não reportam colaborações deste tipo, o que representa uma área com potencial de melhoria, especialmente para reforçar as oportunidades de aprendizagem prática em contextos reais.

No plano prático, todas as escolas organizam eventos temáticos sobre sustentabilidade (por exemplo, Dia da Terra, Feira Ecológica), e a maioria conta também com programas de reciclagem (Grécia, Polónia, Alemanha). Adicionalmente, a Turquia e a Polónia desenvolvem projetos de plantação de árvores ou hortas escolares; a Turquia promove ainda projetos de compostagem e a Polónia ações de limpeza ambiental.

O nível de envolvimento dos alunos no desenho e implementação de projetos de EC também varia: a Polónia reporta uma participação ativa, a Turquia e a Alemanha uma participação parcial, e a Grécia nenhuma. Estas diferenças refletem culturas escolares distintas e desigualdade nos recursos disponíveis para iniciativas lideradas pelos estudantes. Além disso, a maioria das escolas não monitoriza o impacto destas atividades práticas, sendo a Polónia a única escola que avalia os resultados das suas atividades extracurriculares.

Nenhuma das escolas oferece formação formal para professores em Economia Circular (EC), e os recursos disponíveis são geralmente escassos. Os professores recorrem a materiais impressos (Grécia, Alemanha, Turquia), oficinas, recursos e ferramentas digitais (Turquia) ou conteúdos obtidos por iniciativa própria (Polónia). A escola turca encontra-se relativamente melhor equipada do que as restantes, enquanto a Polónia destaca a necessidade de uma plataforma centralizada de conhecimento e recursos sobre EC.

As barreiras mais frequentemente referidas na implementação da educação para a EC incluem:

- Falta de recursos, como materiais pedagógicos e financiamento
- Flexibilidade limitada do currículo (todas as escolas)
- Formação insuficiente dos professores (Grécia, Polónia, Alemanha)
- Falta de competências por parte dos professores (Turquia)
- Sobrecarga burocrática, especialmente destacada na Alemanha
- Falta de apoio institucional e de enquadramento político-educativo (sobretudo na Turquia e na Polónia)
- Falta de interesse por parte dos alunos (Turquia)
- Tempo limitado disponível para os professores prepararem atividades relacionadas com a EC, dado que o fazem de forma voluntária (especialmente na Alemanha e na Polónia)

Estes desafios refletem problemas sistémicos mais amplos das políticas educativas dos respetivos países, mas evidenciam também oportunidades de mudança a nível escolar.

A Polónia e a Alemanha apresentam os projetos mais desenvolvidos relacionados com a EC. A Polónia destaca iniciativas como a “Sala de Aula Verde”, os “Debates de Oxford”, projetos sobre resíduos eletrónicos, o projeto “Sala de Aula sob as Nuvens (Arboreto)”, bem como ações como o “Dia da Terra” e o “Dia de Limpar o Mundo”. Já a Alemanha evidencia a empresa escolar de cariz empreendedor “Freiday”, que entrega e vende alimentos em copos reutilizáveis, e um projeto estudantil de longa duração destinado à criação de uma horta escolar para essa empresa. Neste contexto, os alunos têm a possibilidade de conceber e implementar as suas próprias ideias de projeto, sendo que o projeto vencedor é promovido e apoiado.

A escola grega implementou recentemente um programa Erasmus+ intitulado “Let's Get Green – raising the awareness of ecological problems”, enquanto a escola turca ainda não realizou projetos bem-sucedidos nesta área.

O envolvimento dos alunos, embora variado, tende a ser mais evidente onde existem oportunidades extracurriculares e metodologias baseadas em projetos. Na Polónia, os alunos participam ativamente em todas as atividades organizadas pela escola e por entidades externas, demonstrando consciência sobre as ameaças das alterações climáticas, a reutilização de materiais, a reciclagem e a poupança de recursos. Na Alemanha, os alunos estão envolvidos nos projetos mencionados. Em contraste, na Grécia, a participação dos estudantes limita-se à reciclagem, e na Turquia, às atividades de aprendizagem baseadas em projetos descritas anteriormente.

Necessidades e Recomendações

Para melhorar a educação para a Economia Circular (EC), as escolas identificaram de forma clara as seguintes necessidades:

- + Maior flexibilidade curricular e tempo dedicado à EC, por exemplo, para projetos escolares interdisciplinares ou novas disciplinas relacionadas com a EC (especialmente Alemanha e Grécia)
- + Recursos pedagógicos práticos adaptados à EC (todos os países)
- + Oportunidades de formação de professores e intercâmbio entre pares
- + Maior apoio institucional e político, incluindo menos burocracia (Alemanha)
- + Colaboração com organizações externas e com a indústria (Alemanha)

A sugestão da ZAI (Polónia) para a criação de uma plataforma centralizada de conhecimento confirma a pertinência deste projeto e revela-se particularmente promissora, pois poderia responder simultaneamente a vários desafios — lacunas de recursos, apoio aos professores e controlo da qualidade.

Conclusão

Os dados do inquérito revelam um reconhecimento comum da importância da educação para a economia circular, mas também variações significativas na sua implementação, profundidade e apoio institucional. A Polónia surge como o país mais avançado em termos de envolvimento estudantil, diversidade temática e colaboração externa, enquanto a Turquia demonstra forte potencial através da sua infraestrutura digital e da abordagem baseada em projetos. Alemanha e Grécia evidenciam desafios estruturais e sistémicos que limitam a integração profunda da EC, apesar do interesse manifestado pelos professores.

Para avançar, é necessário:

- + Alinhamento das políticas nacionais com os princípios da Economia Circular e dos ODS
- + Investimento na formação de professores e na criação de materiais pedagógicos
- + Apoio à aprendizagem interdisciplinar e baseada em projetos
- + Reforço da colaboração com atores externos

Estas medidas ajudariam a passar de esforços isolados para um sistema de educação para a Economia Circular mais coeso e impactante em toda a Europa. O estudo realça a importância do projeto CircEdu, uma vez que este responde a vários destes pontos-chave.

6. Resultados do Inquérito sobre Perspetivas, Experiências e Necessidades dos Professores sobre a Educação em EC nas Escolas

Os seguintes resultados apresentam a avaliação de um inquérito realizado com cerca de metade do corpo docente de cada uma das quatro escolas secundárias públicas que integram o consórcio do projeto: FIFTH GENERAL LYCEUM Larisas (FGLL, Grécia), Fritz-Greve-Gymnasium (FGGM, Alemanha), Zespół Szkół Agrotechnicznych i Ogólnokształcących im. Józefa Piłsudskiego (ZAI, Polónia) e Hadiye Kuradaci Bilim Ve Sanat Merkezi Tarsus (HKB, Turquia). O objetivo do inquérito foi avaliar as perspetivas, experiências e necessidades dos professores relativamente à educação para a economia circular nas escolas. No total, 56 professores responderam ao inquérito, incluindo 15 da Grécia, 19 da Polónia, 11 da Alemanha e 12 da Turquia.

Áreas Disciplinares

Na Alemanha, a maior proporção de professores é da área de Línguas (33,3%), seguida das Humanidades (como História, Estudos Sociais, Economia) com 26,7%, das Ciências (Biologia, Química, Física) com 20% e das Artes com 13,3%. A área das Tecnologias da Informação (TI) é a menos representada, com 6,7%.

Na Grécia, a maioria dos inquiridos leciona Ciências (35,7%), seguida pelas Humanidades (28,6%). Línguas e Matemática representam cada uma 14,3%, e Grego Antigo & Latim 7,1%. É de notar que Artes e TI não estão representadas.

A Polónia apresenta uma distribuição mais diversificada. Ciências, Humanidades e Línguas estão igualmente representadas com 18,2% cada. Outras áreas incluem Aulas educativas, Educação para a Vida Familiar, Apoio ao Aluno, Hospitalidade, TI, Matemática, Ciências, Gastronomia, Educação Vocacional, Orientação Profissional e Educação Física, todas com 4,5%.

Na Turquia, a área mais representada é TI (33,3%), seguida por Ciências (26,7%), Línguas (20%), Artes (13,3%) e Humanidades (6,7%).

Anos de Experiência Docente

Relativamente à experiência profissional, verifica-se uma maioria significativa de professores altamente experientes na Grécia, Polónia e Turquia. Na Grécia, 92,9% dos docentes lecionam há mais de 10 anos, sendo que apenas 7,1% têm menos de 2 anos de experiência. A Polónia apresenta uma tendência semelhante, com 84,2% dos professores a acumularem mais de 10 anos de experiência e 15,8% entre 2 a 5 anos.

A Turquia segue o mesmo padrão, com 83,3% dos professores a indicarem ter mais de 10 anos de experiência e 16,7% entre 6 e 10 anos. A Alemanha, por outro lado, apresenta uma distribuição mais equilibrada: 45,5% dos inquiridos têm mais de 10 anos de experiência, 27,3% entre 2 e 5 anos, 18,2% entre 6 e 10 anos, e 9,1% são relativamente novos na profissão, com menos de 2 anos de experiência.

Formação em Educação para a Economia Circular

A formação em conceitos de economia circular continua a ser limitada nos países inquiridos. Os professores da Alemanha, Grécia e Turquia referem não ter recebido qualquer formação formal nesta área, o que evidencia a falta de prioridade institucional dada ao tema. A Polónia destaca-se, com 31,6% dos docentes a indicarem ter tido algum tipo de formação. No entanto, mesmo neste país, a formação ainda não é generalizada, o que aponta para uma necessidade sistémica de oportunidades de desenvolvimento profissional orientadas para a educação para a sustentabilidade.

Compreensão dos Professores sobre a Economia Circular

De forma geral, os professores demonstram uma compreensão básica dos princípios da economia circular, embora a profundidade e o alcance das respostas variem consideravelmente.

Os professores polacos apresentaram as definições mais completas, frequentemente mencionando sustentabilidade, responsabilidade ambiental e ciclos de vida dos produtos. Há uma compreensão sólida dos princípios-chave da EC: reutilização, reciclagem, redução de resíduos, sustentabilidade e prolongamento do ciclo de vida. Alguns realçaram o impacto educativo da EC, sublinhando a importância da consciencialização, dos valores e da mudança de comportamentos. Outros destacaram o papel dos currículos e da formação profissional (por exemplo, nos setores alimentar e hoteleiro). Algumas respostas relacionaram a EC com desafios ambientais globais, como as alterações climáticas.

As respostas alemãs focaram-se mais nas dimensões económicas e sociais. As definições enfatizam o pensamento sistémico, envolvendo a sociedade, a economia, as instituições e os ciclos de recursos. Existe uma atenção particular aos processos em ciclo fechado, com interesse em como a EC pode ser aplicada dentro da própria escola. Estas respostas apresentam uma abordagem mais analítica, com foco na eficiência de recursos e sustentabilidade como questões sistémicas.

Na Turquia, os professores enfatizaram as aplicações práticas, como a reutilização e a sustentabilidade no contexto educativo. As definições variam entre referências básicas à reutilização e reciclagem e contributos mais aprofundados, com destaque para uma resposta que relaciona a EC com um ecossistema de aprendizagem (sustentabilidade digital, aprendizagem baseada em projetos). Alguns sublinham a consciência dos recursos, a sustentabilidade e a inclusão curricular. Outras respostas admitem um conhecimento ainda limitado sobre o conceito.

Na Grécia, as respostas revelaram uma forte associação entre economia circular e reciclagem/gestão de resíduos. Várias respostas mencionam atividades práticas em sala de aula e ações de formação. Algumas destacam a mudança comportamental através da educação prática, e outras referem as eco-escolas, formação de professores e a adaptação curricular como elementos relevantes.

Integração da EC no Ensino

A forma como os temas da economia circular são integrados no currículo varia consideravelmente entre os países.

Na Alemanha, a maioria dos professores incorpora a EC em disciplinas já existentes, com 36,4% dos inquiridos a indicar esta abordagem. A aprendizagem baseada em projetos e a colaboração com organizações externas são mencionadas por 18,2% dos professores, embora não sejam práticas generalizadas. 27,3% dos docentes referem não abordar a economia circular nas suas aulas, e 9% acrescentam que a EC mal é referida nos anos finais do secundário (11.º e 12.º).

Na Grécia, a maioria dos inquiridos (44,4%) também integra a EC em disciplinas já existentes, em vez de a tratar como um tema autónomo. A aprendizagem baseada em projetos e as atividades extracurriculares são utilizadas por 16,7% dos professores, tal como a colaboração com organizações externas. No entanto, 26,7% dos docentes gregos afirmam não abordar a EC, o que revela lacunas significativas na cobertura do tema.

Na Polónia, observa-se o maior grau de envolvimento: 36,8% dos professores indicam lecionar aulas dedicadas à EC, e 57,9% integram os temas em disciplinas existentes. 21,1% colaboram com organizações externas, embora a aprendizagem baseada em projetos e as atividades extracurriculares sejam menos frequentes. Apenas 5,3% dos professores polacos referem não abordar a EC, o que sugere uma abordagem relativamente estruturada e abrangente.

Na Turquia, a EC é sobretudo introduzida através de aprendizagem baseada em projetos, prática mencionada por 75% dos docentes, e por atividades extracurriculares (33,3%). Uma parte menor (8,3%) refere integração da EC em disciplinas existentes e 16,7% indicam ministrar aulas dedicadas. 8,3% destacam ainda o uso de projetos artísticos com materiais recicláveis como método criativo para envolver os alunos com a sustentabilidade. Apesar destes esforços, 16,7% dos professores turcos afirmam não abordar a EC no ensino.

Resumidamente, Alemanha e Grécia tendem a integrar a EC em disciplinas existentes, mas sem lhe dar centralidade. A Polónia apresenta o maior grau de envolvimento, com aulas estruturadas e integradas, enquanto a Turquia aposta fortemente na aprendizagem baseada em projetos.

As atividades extracurriculares e colaborações externas são limitadas em todos os países analisados, o que revela uma área com potencial para expansão.

Abordagem dos Tópicos da Economia Circular nas Aulas

Os conteúdos lecionados sobre economia circular centram-se maioritariamente na redução de resíduos, reciclagem e consumo sustentável:

Na Alemanha, os aspetos mais frequentemente abordados são o consumo e produção sustentáveis (mencionados por 72,7% dos inquiridos) e a redução de resíduos e reciclagem (63,6%). As estratégias de reparação e reutilizaçõesurgem em 36,4% das respostas, enquanto o ciclo de vida dos produtos e a eficiência dos recursos são referidos apenas por 9,1%. Importa destacar que 18,2% dos professores não abordam de todo os temas da economia circular.

Na Grécia, a escola apresenta a maior proporção de professores que não abordam os conceitos de economia circular, com 33,3% a indicar ausência de cobertura. A redução de resíduos e reciclagem são os tópicos mais comuns (40% das respostas), seguidos do consumo e produção sustentáveis (20%). O ciclo de vida dos produtos e a eficiência de recursos são identificados em 13,3% das respostas.

Os professores da Polónia demonstram um envolvimento alargado com os temas da EC. A redução de resíduos e reciclagem é abordada por 73,7%, e o consumo e produção sustentáveis surgem em 52,6% das respostas. O ciclo de vida dos produtos e a eficiência de recursos são mencionados por 47,4%, e as estratégias de reparação e reutilizaçãopor 42,1%. A economia partilhada e conceitos relacionados aparecem em 26,3% das respostas. Apenas 15,8% dos docentes indicam não abordar a EC no ensino.

Na Turquia, todos os inquiridos abordam pelo menos um aspeto da economia circular. A redução de resíduos e reciclagem são integradas por 100% dos participantes, enquanto 66,7% incluem o consumo e produção sustentáveis. O ciclo de vida dos produtos e a eficiência de recursos são referidos por 50%, e as estratégias de reparação e reutilização por 41,7%. A economia partilhada é mencionada por 8,3%, sendo a Turquia o único país entre os quatro a incluir a economia circular no contexto do planeamento urbano e comunidades, referida também por 8,3% dos professores.

Esta análise mostra níveis variados de integração dos temas da economia circular no ensino nos quatro países, com a Polónia e a Turquia a demonstrarem os níveis mais consistentes e abrangentes de envolvimento.

Métodos de Ensino da Economia Circular

Os métodos utilizados para ensinar os conceitos de economia circular variam significativamente entre os quatro países. Embora as aulas tradicionais continuem a ser a abordagem dominante, as atividades práticas e experiências estão a ganhar terreno, especialmente na Turquia e na Alemanha, com a Grécia a apresentar o nível mais baixo de implementação. A Turquia destaca-se também pela maior utilização de ferramentas digitais e projetos liderados por alunos. No entanto, o uso de aprendizagem gamificada e simulações digitais continua a ser geralmente reduzido.

Os métodos tradicionais, como aulas expositivas e teóricas, são a abordagem mais comum em geral. São mais utilizados na Polónia, onde 73,7% dos inquiridos referem recorrer a este método. Seguem-se a Grécia com 60%, a Turquia com 50% e a Alemanha com 54,5%. Estes dados indicam uma base sólida em termos de conteúdos teóricos, mas também revelam a necessidade de diversificar as estratégias pedagógicas.

As atividades práticas e experiências laboratoriais têm uma presença mais forte na Turquia (58,3%), na Alemanha (54,5%) e na Polónia (31,6%). Curiosamente, a Grécia não reporta a utilização deste método, o que evidencia uma lacuna no ensino experiencial.

As visitas de estudo e saídas de campo são mais comuns na Polónia, com 42,1% dos professores a indicarem a sua utilização. Em contrapartida, estas práticas são muito menos frequentes na Grécia (20%), na Turquia (8,3%) e na Alemanha (9,1%), revelando que o envolvimento com o mundo real continua limitado em muitos contextos educativos. As abordagens digitais e gamificadas continuam pouco exploradas. Jogos sérios são usados por 15,8% dos professores polacos e 18,2% dos alemães, enquanto nenhum docente na Turquia ou na Grécia mencionou esta metodologia. O uso de ferramentas digitais e simulações interativas é mais elevado na Turquia (41,7%), seguida pela Polónia (31,6%), e muito limitado na Alemanha (9,1%) e na Grécia (6,7%). A Turquia demonstra assim a melhor integração das tecnologias educativas digitais entre os quatro países.

A aprendizagem colaborativa e liderada por alunos também apresenta aplicação desigual. A presença de oradores convidados e colaborações externas é rara, sendo mencionada apenas por 9,1% dos inquiridos na Alemanha, 15,8% na Polónia e 8,3% na Turquia. A Grécia não reportou qualquer utilização de oradores externos. Por outro lado, a Turquia destaca-se na promoção de projetos liderados por alunos, com 50% dos docentes a referirem esta abordagem. Em comparação, Polónia (10,5%) e Grécia (13,3%) apresentam valores muito mais baixos, e a Alemanha não indica qualquer uso deste tipo de prática.

De forma geral, a Polónia demonstra a maior diversidade de abordagens pedagógicas, combinando ensino tradicional com visitas de estudo, atividades práticas e alguma utilização de métodos digitais e gamificados. A Turquia e a Alemanha também apresentam uma abordagem diversificada, com destaque para o uso de ferramentas interativas. Em contraste, a Grécia parece ter o conjunto mais limitado de estratégias de ensino, com 26,7% dos inquiridos a indicar que não utilizam quaisquer métodos de ensino da economia circular. A Polónia reporta igualmente 15,8% de professores sem uso de métodos específicos, e a Alemanha 18,2%. Estas diferenças evidenciam os diferentes níveis de envolvimento e inovação na educação para a economia circular nos países participantes.

Acesso a Materiais de Ensino sobre Economia Circular

O acesso a materiais educativos específicos varia significativamente entre os países. Na Alemanha, apenas 18,2% dos professores referem ter acesso a algum tipo de material, sendo que 9,1% desses estão limitados a conteúdos básicos em manuais escolares. Um impressionante 81,8% indicam não ter qualquer acesso. A Grécia apresenta a situação mais crítica, pois nenhum professor declarou ter acesso a materiais sobre economia circular, evidenciando uma necessidade urgente de desenvolvimento de recursos. A Polónia lidera neste aspeto, com 36,9% dos docentes a referirem dispor de materiais, sendo que 5,3% mencionam especificamente o site ekopotencjal.pl. Ainda assim, 63,2% dos professores polacos indicam não ter acesso. Na Turquia, o acesso é moderado (23,1%), mas a maioria (76,9%) refere não dispor de materiais. Estas disparidades sublinham a necessidade de esforços direcionados para melhorar a disponibilidade e distribuição de recursos educativos sobre economia circular em toda a Europa.

Principais Desafios na Integração da EC no Ensino

As barreiras mais comuns à integração da educação para a economia circular incluem:

- + A **falta de formação** foi a barreira mais frequentemente referida em todos os países: Alemanha (25%), Grécia (23,1%), Polónia (20,9%) e Turquia (23,1%). Este dado evidencia uma necessidade generalizada de mais programas de desenvolvimento profissional para professores sobre temas relacionados com a economia circular.
- + A **insuficiência de materiais didáticos** é especialmente notória na Alemanha, onde 37,5% dos docentes referem dificuldades no acesso a recursos de ensino. A Grécia (25,6%), a Polónia (27,9%) e a Turquia (20,5%) também enfrentam desafios neste domínio, revelando uma lacuna consistente na disponibilidade de recursos educativos.

- + A **falta de flexibilidade curricular** é um desafio relevante em todos os países, sendo a Alemanha o país com a taxa mais elevada (33,3%), seguida da Grécia (25,6%), Polónia (20,9%) e Turquia (17,9%).
- + A **falta de interesse e envolvimento dos alunos** foi especialmente referida pela escola da Turquia (15,4%). A Grécia (7,7%) e a Polónia (4,7%) também mencionam esta dificuldade, enquanto a Alemanha não relata este problema.
- + A Polónia (7%) e a Turquia (10,3%) indicam alguma **falta de apoio por parte dos encarregados de educação**, enquanto a Grécia (2,6%) reporta uma preocupação mínima. Nenhum país refere falta de apoio da direção escolar, o que sugere que a implementação de mais iniciativas de educação para a economia circular não deverá ser dificultada por ausência de apoio institucional.
- + A Grécia (15,4%), a Polónia (11,6%) e a Turquia (12,8%) destacam a fraca inclusão da economia circular nas políticas educativas. A Alemanha não indica este ponto como um desafio, o que poderá refletir maior alinhamento político com a temática.
- + Por fim, uma pequena percentagem de professores da Alemanha (4,2%) e da Polónia (7%) refere não enfrentar qualquer obstáculo na educação para a economia circular. Na Grécia e na Turquia, nenhum professor afirma estar livre de dificuldades neste domínio.

A Alemanha enfrenta maiores dificuldades ao nível da disponibilidade de recursos e da flexibilidade curricular. A Grécia revela maior preocupação com lacunas nas políticas educativas, apoio parental e falta de interesse dos alunos. A Polónia e a Turquia experienciam desafios mais variados. No entanto, os dois maiores problemas transversais a todos os países são a falta de formação e a insuficiência de materiais didáticos.

Apoio Desejado para Ensinar a Economia Circular de Forma Mais Eficaz

Muitos professores solicitaram melhor acesso a materiais pedagógicos, tornando esta a prioridade principal em todos os países. Na Alemanha, 90,9% dos inquiridos destacaram esta necessidade — o valor mais elevado entre os países. Segue-se a Polónia com 89,5%, a Turquia com 75% e a Grécia com 60%.

Programas de formação e workshops também foram amplamente solicitados, com particular ênfase na Grécia (93,3%) e na Polónia (78,9%). A Turquia (50%) e a Alemanha (36,4%) também manifestaram interesse nestas oportunidades.

A colaboração interdisciplinar é especialmente valorizada por professores na Alemanha (63,6%), seguida da Polónia (47,4%) e da Turquia (41,7%). Na Grécia, 20% dos docentes também demonstraram interesse, embora de forma menos expressiva.

A aprendizagem baseada em projetos e as oportunidades práticas foram fortemente solicitadas por professores da Polónia (68,4%) e da Turquia (66,7%). Alemanha (54,5%) e Grécia (26,7%) também demonstraram interesse por formatos de ensino mais aplicados e participativos.

O apoio de organizações e especialistas externos foi valorizado em todos os países: Polónia (36,8%), Alemanha (45,5%), Turquia (50%) e Grécia (33,3%) reconheceram a importância destas colaborações. Isto sugere uma oportunidade para estabelecer parcerias com ONG, empresas e instituições públicas para reforçar a educação para a economia circular.

Os professores na Polónia demonstraram a maior necessidade de políticas educativas e apoio institucional mais fortes (42,1%), seguidos da Grécia (33,3%). A Alemanha não reportou esta necessidade e apenas 8,3% dos docentes na Turquia a referiram.

Por fim, a Polónia também expressou a maior necessidade de apoio parental (26,3%), enquanto essa foi uma prioridade menor na Turquia (16,7%), na Alemanha (9,1%) e na Grécia (6,7%). A flexibilidade curricular foi mencionada exclusivamente na Alemanha (9,1%).

Iniciativas de Economia Circular ao Nível Escolar

Todas as escolas implementam algum tipo de iniciativa relacionada com a economia circular. Programas de reciclagem foram referidos por todas. No entanto, oficinas de reparação e reutilização existem apenas na Polónia e na Turquia. Infraestruturas escolares sustentáveis (como sistemas de poupança de água e painéis solares) estão presentes nas escolas da Alemanha e da Polónia, mostrando oportunidades de investimento em design escolar ecológico nos outros países.

Concursos e eventos temáticos sobre a economia circular são organizados nas escolas da Alemanha, Polónia e Turquia, enquanto a Grécia não reportou qualquer evento. As escolas turca, polaca e alemã colaboram ativamente com empresas e organizações locais.

Adicionalmente, a Grécia mencionou a participação anual num programa ambiental nacional sobre ecossistemas florestais, sustentabilidade e gestão sustentável, que inclui atividades relacionadas com a economia circular.

Contudo, na Turquia (57,1%) e na Grécia (13,3%), vários professores indicaram que não existem iniciativas atualmente nas suas escolas, apesar das menções feitas pelos colegas. Em todos os países, as respostas dos docentes sobre as iniciativas existentes nas suas escolas foram muito divergentes, o que indica problemas de comunicação, falta de coerência e interdisciplinaridade em falta.

Envolvimento dos Estudantes

Em todas as escolas foi reportada a participação ativa dos estudantes na conceção ou implementação de projetos de Economia Circular (EC). Na Alemanha, destacou-se a empresa escolar, onde os jovens desenvolvem o seu próprio projeto empresarial sustentável, bem como a implementação de projetos próprios ligados aos ODS e o projeto “Freiday”, no qual os estudantes criam o seu próprio projeto sustentável. Na Grécia, as atividades estão sobretudo centradas na reciclagem e no projeto ambiental anteriormente referido. A escola turca realiza projetos TÜBITAK e Teknofest, envolvendo parcialmente os estudantes em estudos baseados em projetos, sendo as iniciativas ligadas à criação de produtos as mais populares. Na Polónia, a maioria dos professores indica o envolvimento dos alunos, mas sem fornecer mais detalhes.

A avaliação desta questão confirma a suposição anteriormente referida sobre a falta de consistência e de comunicação entre os professores relativamente aos projetos implementados, uma vez que as respostas foram bastante contraditórias em todas as escolas.

De forma geral, a implementação consistente de projetos práticos liderados por estudantes, variados e até mesmo interdisciplinares, poderia beneficiar significativamente as escolas, garantindo uma liderança jovem ativa nas soluções de EC.

Práticas de Avaliação

A avaliação dos esforços em EC é feita principalmente através de projetos e apresentações dos estudantes em todos os países. A Turquia (66,7%), a Grécia (64,3%) e a Polónia (58,3%) demonstram maior dependência deste método. A Alemanha (38,5%) também utiliza esta abordagem, mas com menor frequência, confiando mais no feedback de alunos e professores em comparação com os outros países (30,8%). A Grécia (14,3%), a Polónia (20,8%) e a Turquia (6,7%) utilizam inquéritos em menor escala. A recolha de dados (como redução de resíduos e poupança de energia) é aplicada nas escolas da Grécia (21,4%), Polónia (12,5%) e Turquia (20%). Por outro lado, a Alemanha não utiliza recolha de dados.

A Polónia (4,2%) e a Turquia (6,7%) produzem relatórios e publicações, embora em níveis reduzidos, enquanto a Alemanha e a Grécia não publicam relatórios formais. Na escola alemã, um número elevado de professores indica não haver qualquer avaliação das iniciativas de EC, enquanto nas restantes escolas todos os participantes reportaram algum tipo de avaliação, apesar de uma pequena percentagem de professores polacos referir não conhecer as medidas.

De forma geral, a avaliação das iniciativas de EC não é muito abrangente nos países envolvidos. Inquéritos estruturados, relatórios e recolha de dados continuam subutilizados na maioria dos casos.

Projetos de EC Bem-Sucedidos com Alunos

Nos quatro países, vários projetos de economia circular e sustentabilidade foram implementados nas escolas, refletindo diferentes níveis de envolvimento dos estudantes, inovação e apoio institucional.

Alemanha

- + Foco em upcycling (mobiliário, projetos artísticos) e separação de resíduos, embora estes últimos esforços nem sempre tenham sido bem-sucedidos.
- + A empresa escolar criou o seu próprio modelo de reciclagem para um pequeno-almoço sustentável.
- + Oficinas com especialistas externos (projeto Spirit of Football), ligando sustentabilidade ao desporto.
- + Os alunos ensinaram crianças mais novas sobre a redução de resíduos, promovendo a educação entre pares.
- + Preocupações quanto à falta de princípios sustentáveis implementados na própria escola.

Grécia

- + Os projetos existentes focam-se na reciclagem de pilhas, reutilização de materiais antigos, plantação de árvores e visitas ambientais.
- + Um projeto Erasmus+ está em curso.
- + Não há referência a inovação orientada pelos alunos, sendo os esforços de sustentabilidade maioritariamente pré-estruturados.

Polónia

- + Cooperações externas com o Centro de Educação Ambiental Arka.
- + Projetos de reciclagem: “Dia Mundial da Limpeza” e recolha de resíduos eletrónicos.
- + Campanhas como “Montanhas Limpas”, promovendo a proteção ambiental e a biodiversidade.
- + Projetos de economia circular ligados à moda (Eco-Wave: sensibilização para a fast fashion).
- + Projetos que envolvem modelos alternativos de energia, jardinagem sustentável e colheita de húmus.
- + Projetos de economia circular com foco na gastronomia, demonstrando a integração da sustentabilidade em setores específicos.

Turquia

- ✦ Projetos criativos práticos utilizando materiais reciclados, incluindo construção de foguetões e carros.
- ✦ Projetos de planeamento urbano que integram conceitos de sustentabilidade.
- ✦ Aplicação móvel premiada pela TÜBİTAK para conservação da água.
- ✦ Técnicas de aprendizagem gamificada aumentam o interesse dos alunos.
- ✦ Projetos de investigação com participação ativa dos estudantes.

A escola polaca apresenta a maior variedade de projetos, enquanto a escola turca destaca-se pelas abordagens criativas e baseadas em tecnologia. A escola grega concentra-se principalmente em atividades tradicionais de reciclagem e ambientais, e a escola alemã enfatiza a aprendizagem entre pares, onde os alunos ensinam outros sobre sustentabilidade.

Conselhos para Educadores sobre o Ensino de Conceitos de Economia Circular

• Integrar a Economia Circular no ensino diário

- ✦ Incluir tópicos de economia circular nas aulas do dia a dia e através de exemplos da vida real (Alemanha).
- ✦ Utilizar aprendizagem baseada em projetos e atividades extracurriculares (Grécia, Turquia).
- ✦ Incentivar os alunos a iniciar iniciativas como trocas de roupa ou projetos de desperdício zero (Polónia).

Procurar apoio externo e estabelecer colaborações

- ✦ Convidar especialistas e colaborar com empresas locais e organizações ambientais (Alemanha, Grécia, Turquia).
- ✦ Formar redes de aprendizagem entre pares para partilhar boas práticas (Grécia).
- ✦ Incentivar parcerias com instituições focadas na sustentabilidade (Polónia, Turquia).

Utilizar abordagens práticas e experimentais na aprendizagem

- ✦ Organizar workshops, visitas de estudo e atividades interativas para os alunos (Grécia, Turquia).
- ✦ Implementar projetos de sustentabilidade em pequena escala, como reciclagem de pilhas ou instalação de painéis solares na escola (Turquia).
- ✦ Ensinar através de aprendizagem gamificada, incluindo eco-competições e jogos sobre economia circular (Polónia).

Advocate for Curriculum & Policy Integration

- + Encourage curriculum updates to formally include circular economy concepts (Türkiye).
- + Push for institutional support and funding to strengthen sustainability education (Greece, Poland).
- + Launch pilot programs before wider implementation (Greece).

Access & Develop Teaching Resources

- + Search for appropriate educational materials and case studies (Germany, Greece).
- + Create resource libraries with lesson plans, videos, and case studies (Greece).
- + Promote online courses and teacher workshops on circular economy (Poland, Türkiye).

Conclusão e Recomendações

Os resultados do inquérito revelam um panorama fragmentado, mas em evolução, da educação para a economia circular. Embora a Polónia demonstre a abordagem mais abrangente e estruturada, os restantes países apresentam esforços isolados com lacunas significativas em termos de formação, materiais e envolvimento dos alunos.

As recomendações incluem:

1. Desenvolver programas nacionais de formação para educadores em conceitos de economia circular.
2. Criar e distribuir materiais didáticos padronizados, acessíveis em todas as línguas e adaptáveis a vários níveis de ensino.
3. Promover a aprendizagem interdisciplinar e baseada em projetos, incentivando a aplicação prática no mundo real.
4. Fomentar colaborações com empresas, ONGs e comunidades locais para reforçar a componente prática.
5. Apoiar iniciativas lideradas por estudantes, garantindo que os jovens não sejam apenas aprendizes passivos, mas contribuidores ativos para os esforços de sustentabilidade.
6. Implementar quadros de avaliação claros que acompanhem tanto os resultados da aprendizagem como o impacto ambiental.

Assim, o inquérito destaca também a importância do projeto CircEdu na implementação de um panorama europeu de aprendizagem, incluindo um programa de capacitação e uma plataforma de conhecimento.

7. Conclusões

Este estudo evidencia a necessidade urgente de integrar os princípios da Economia Circular no ensino secundário como uma resposta transformadora às crises ambientais e sociais provocadas pelos modelos económicos lineares. Através de uma revisão documental abrangente e de uma investigação baseada em inquéritos realizados na Alemanha, Grécia, Polónia e Turquia, o projeto CircEdu revelou tanto o reconhecimento generalizado da importância da EC como as lacunas significativas na sua integração curricular, na formação de professores e na disponibilidade de recursos.

Apesar do crescente número de estudos e práticas inovadoras no campo mais amplo da economia circular, a sua incorporação nos sistemas educativos — especialmente ao nível do ensino secundário — permanece fragmentada e pouco desenvolvida. O estudo sublinha o valor da educação não apenas na sensibilização, mas também na capacitação das novas gerações com competências, valores e pensamento sistémico essenciais para liderar uma transformação sustentável. Demonstra ainda o potencial dos modelos de aprendizagem interdisciplinares, baseados em projetos e com apoio digital para promover um envolvimento significativo com os conceitos da EC.

Os contributos recolhidos junto de educadores e instituições dos países parceiros constituem uma base sólida para as próximas fases do projeto CircEdu. Para avançar, serão necessários esforços contínuos para reforçar capacidades, criar recursos pedagógicos adaptáveis e aumentar a consciencialização sobre as mudanças necessárias nos quadros políticos, de forma a integrar o pensamento circular nas culturas escolares e nos currículos.

Ao capacitar professores e alunos, a educação pode tornar-se um catalisador de uma economia circular justa e regenerativa na era digital.