

Contributo da ACV para a Gestão Sustentável de Resíduos Plásticos

Florinda F. Martins ^{a*}, Nídia Caetano ^{a,b,c}

^aInstituto Superior de Engenharia do Porto, R. Dr. António Bernardino Almeida, 4249-015 Porto, Portugal

^bLEPABE - Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

^cALiCE - Associate Laboratory in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

RESUMO

Os plásticos constituem, hoje em dia, uma preocupação a nível ambiental pelos impactos ambientais que provocam quer em terra quer no mar. Uma parte significativa dos plásticos residuais encontra-se nos resíduos urbanos, e é alvo da recolha indiferenciada ou seletiva. Os destinos comuns para estes resíduos são a deposição em aterro, a valorização energética e a valorização multimaterial. Neste trabalho consideraram-se vários cenários para o destino final dos plásticos e determinaram-se os respetivos impactos ambientais, tendo sido usada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida e a base de dados *Ecoinvent version 3*. O Cenário 2, que considera apenas valorização energética e multimaterial, apresenta o maior valor para as alterações climáticas. O Cenário 3, que apenas considera a valorização multimaterial, apresenta o maior valor para todas as categorias exceto alterações climáticas, eutrofização e depleção do ozono. No entanto, quando os recursos são usados para produção de novos produtos (Cenários 4 e 5) verifica-se uma melhoria significativa na maioria das categorias de impacto.

Palavras-Chave: Alterações climáticas, deposição em aterro, impactos ambientais, valorização energética, valorização multimaterial.

doi: 10.22181/aer.2025.0202

* Autor para correspondência.
E-mail: ffm@isep.ipp.pt

LCA Contribution for Sustainable Management of Plastic Waste

Florinda F. Martins ^{a*}, Nídia Caetano ^{a,b,c}

^aInstituto Superior de Engenharia do Porto, R. Dr. António Bernardino Almeida, 4249-015 Porto, Portugal

^bLEPABE - Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

^cALICE - Associate Laboratory in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

ABSTRACT

Plastics are nowadays an environmental concern due to the environmental impacts they cause both on land and at sea. A significant fraction of the plastic waste ends up in municipal waste and are subject to commingled or separate collection. The common destinations for this waste are landfill disposal, energy recovery and multi-material recovery. In this work, several scenarios for the final destination of plastics were considered, and the corresponding environmental impacts were determined, using Life Cycle Assessment methodology and the Ecoinvent version 3 database. Scenario 2, which considers only energy and multi-material recovery, presents the highest value for climate change. Scenario 3, which considers only multi-material recovery, presents the highest values to all categories except climate change, eutrophication and photochemical oxidant formation. However, when the resources are used in the production of new products (Scenario 4 and 5) there is a significant improvement in most impact categories.

Keywords: Climate change, energy recovery, environmental impacts, landfilling, multi-material recovery

doi: 10.22181/aer.2025.0202

* Autor para correspondência.
E-mail: ffm@isep.ipp.pt

1 Resíduos Urbanos e Resíduos Plásticos em Portugal

Os resíduos urbanos geridos em Portugal em 2021 foram 5674439 t (Quadro 1), sendo uma parte significativa enviada para aterro (cerca de 50%), seguindo-se a valorização energética (22%), a valorização orgânica (16%) e a valorização multimaterial com o restante, representa o destino com menor representação (INE, 2021).

Estes dados evidenciam já que a quantidade enviada para aterro é bastante elevada, devendo procurar-se encaminhar os resíduos para outros destinos com potenciais menores impactos e mais de acordo com o preconizado na legislação e com o modelo da economia circular. No entanto, importa também determinar quais são os impactos ambientais associados a essas estratégias. Nesta medida, tomando como exemplo os resíduos biodegradáveis, estes deveriam ser encaminhados para valorização orgânica, libertando área nos aterros e evitando a emissão de biogás e de lixiviados, o que está de acordo com a legislação em vigor (Decreto-Lei n.º 102-D/2020, 2020). Os resíduos plásticos constituem também uma preocupação devido aos seus impactos ambientais negativos (Miguel et al., 2024; Sheriff et al., 2025) e o interesse pela economia circular aplicada a este tipo de resíduos tem crescido (Hsu et al., 2022).

Quadro 1. Resíduos urbanos produzidos em Portugal em 2021 e respetivo destino (INE, 2021)

	Total	Aterro	Valorização energética	Valorização orgânica	Valorização multimaterial
Quantidade (t)	5674439	2809418	1248077	892654	724290

De acordo com o Relatório Anual de Resíduos Urbanos (RARU) de 2021, os resíduos plásticos correspondem a cerca de 10,67% o que equivale a cerca de 605462,6 t (APA, 2021). Os valores calculados e apresentados no quadro 2 resultam do cálculo da percentagem tendo em conta os valores do Quadro 1, depois de retirados os resíduos que são encaminhados para valorização orgânica. Considerou-se que apenas são encaminhados para valorização orgânica resíduos biodegradáveis.

Quadro 2. Resíduos plásticos produzidos em Portugal em 2021 e respetivo destino (INE, 2021)

	Total	Aterro	Valorização energética	Valorização multimaterial
Quantidade (t)	605463	355724	158030	91708

A legislação em vigor (Decreto-Lei n.º 102-D/2020, 2020) refere a hierarquia das atividades de gestão dos resíduos e estabelece metas para a valorização de diversos fluxos, de entre os quais os plásticos de embalagem constituem um dos mais importantes. Acresce ainda que, a adoção de opções de gestão de resíduos deve basear-se em demonstrações do desempenho ambiental e socioeconómico de cada uma dessas opções. Assim, neste trabalho pretendeu-se avaliar o desempenho ambiental de diversas opções, através da avaliação dos impactos ambientais a elas associados. Para o efeito, estabeleceram-se diversos cenários de distribuição quantitativa dos resíduos de plásticos por destino.

2 Metodologia da Avaliação do ciclo de vida

A avaliação do ciclo de vida (ACV) permite determinar os impactos ambientais de um produto, serviço ou atividade. Preconiza uma abordagem que considera o ciclo de vida dos produtos desde a extração das matérias-primas, produção de partes do produto, produção do produto, o seu uso, até ao destino final. É frequentemente designada como sendo uma avaliação do berço-à-cova mas mais recentemente surgiu a designação do berço-ao-berço para evidenciar a importância da operação de reciclagem. As operações de transporte são também processos muito relevantes na maior parte dos casos. Esta metodologia tem quatro etapas, 1) definição do objetivo e âmbito, 2) inventário, 3) avaliação de impactos e 4) interpretação. Na primeira etapa pode-se indicar como especialmente relevantes a definição da unidade funcional e das fronteiras do sistema. Na segunda etapa são recolhidos todos os dados de entrada e de saída do sistema. Na terceira etapa, os dados do inventário são convertidos em indicadores que permitem fazer a avaliação dos potenciais impactos no ambiente, na saúde humana e nos recursos naturais e, por fim, na interpretação são analisados os resultados (Brito & Martins, 2017).

3 Cenários para o destino dos resíduos plásticos em Portugal

Neste trabalho pretendeu-se determinar os impactos ambientais associados aos plásticos residuais, considerando os destinos finais comuns (aterro, valorização energética e multimaterial) numa abordagem que considera vários cenários de distribuição quantitativa.

Em primeiro lugar foi considerada a base de referência que corresponde ao ano de 2021. A percentagem de plásticos nos resíduos é de 10,67% (RARU 2021) tal como já referido anteriormente.

Relativamente à unidade funcional foi considerado o tratamento dos resíduos plásticos para o ano de 2021. As fronteiras consideradas circunscrevem os processos em estudo para cada um dos cenários.

Foram considerados 5 cenários para a distribuição quantitativa dos resíduos de plásticos por destino de tratamento. A quantidade de resíduos plásticos para cada destino foi estimada conforme os valores do Quadro 2. No primeiro cenário, os destinos considerados foram o aterro e a valorização multimaterial. No segundo cenário, foram considerados a valorização energética e multimaterial. No terceiro cenário apenas foi considerada a valorização multimaterial. O quarto e o quinto cenários têm a ver com estratégias situadas no topo da hierarquia das atividades de gestão dos resíduos (prevenção) e visam uma diminuição de 25 e 50% da geração destes resíduos, mantendo-se contudo a atual distribuição pelos diferentes destinos (Quadro 3).

Quadro 3. Cenários para o destino dos resíduos plásticos em 2021

	Aterro (t)	Valorização energética (t)	Valorização multimaterial (t)
Base	355724	158030	91708
Cenário 1	355724 + 158030		91708
Cenário 2		355724 + 158030	91708
Cenário 3			355724 + 158030+91708
Cenário 4	0,75x355724	0,75x158030	0,75x91708
Cenário 5	0,5x355724	0,5x158030	0,5x91708

Depois da elaboração dos cenários, foram determinados os impactos ambientais correspondentes a cada um dos diferentes cenários, usando a base de dados Ecoinvent e considerando o modelo CML v4.8 2016 (Ecoinvent, 2023).

As categorias de impacto consideradas nesta avaliação foram Acidificação, Alterações climáticas, Ecotoxicidade: água doce, Ecotoxicidade: água marinha, Ecotoxicidade: terrestre, Recursos energéticos: não renováveis, Eutrofização, Toxicidade humana, Recursos materiais: metais/minerais, Depleção de ozono e Oxidação fotoquímica.

Foram considerados três processos relativos à Suíça (CH) dado que não estão disponíveis dados para Portugal: treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration; treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill waste plastic, mixture e treatment of waste polyethylene terephthalate (PET), for recycling, unsorted, sorting. Este último processo foi escolhido para representar a operação de valorização multimaterial. Como não havia dados para mistura de plásticos, escolheu-se aquele material (PET) como sendo representativo da mistura de plásticos. Este processo inclui todos os processos de triagem dos resíduos até ao portão da fábrica.

4 Resultados

Os resultados obtidos para os diferentes cenários apresentam-se no Quadro 4. Os valores assinalados a cinzento representam uma melhoria relativamente à base de referência. O Cenário 1 apresentou melhoria em 7 categorias, o Cenário 2 em 4, o Cenário 3 em 3 e os Cenários 4 e 5, como expectável, melhoraram em todas as categorias, apresentando, portanto, menores impactos ambientais. O cenário 3 apresenta o maior valor para todas as categorias exceto alterações climáticas, eutrofização e depleção do ozono.

Quadro 4. Impactos ambientais correspondentes aos diferentes cenários

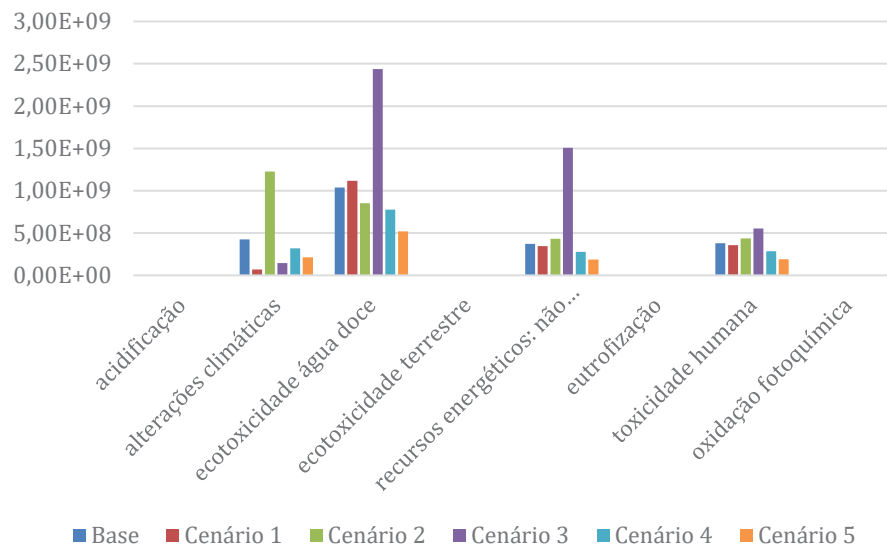
	Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Acidificação kg SO ₂ -Eq	1,34E+05	7,53E+04	2,65E+05	3,27E+05	1,00E+05	6,68E+04
Alterações climáticas kg CO ₂ -Eq	4,26E+08	7,03E+07	1,23E+9	1,43E+08	3,19E+08	2,13E+08
Ecotoxicidade: água doce kg 1,4-DCB-Eq	1,04E+09	1,12E+09	8,54E+08	2,44E+09	7,78E+08	5,19E+08
Ecotoxicidade: água marinha kg 1,4-DCB-Eq	2,68E+12	2,73E+12	2,56E+12	1,34E+13	2,01E+12	1,34E+12
Ecotoxicidade: terrestre kg 1,4-DCB-Eq	7,74E+05	8,43E+05	6,20E+05	2,77E+06	5,81E+05	3,87E+05
Recursos energéticos: não renováveis MJ	3,71E+08	3,44E+08	4,33E+08	1,51E+09	2,79E+08	1,86E+08
Eutrofização kg PO ₄ -Eq	2,39E+06	3,33E+06	2,82E+05	1,34E+05	1,80E+06	1,20E+06
Toxicidade humana kg 1,4-DCB-Eq	3,80E+08	3,56E+08	4,36E+08	5,52E+08	2,85E+08	1,90E+08
Recursos materiais: metais/ Minerais kg Sb-Eq	1,61E+02	1,27E+02	2,40E+02	7,59E+02	1,21E+02	8,07E+01
Depleção ozono kg CFC-11-Eq	2,47E+00	3,04E-01	7,35E+00	1,19E+00	1,85E+00	1,24E+00
Oxidação fotoquímica kg etileno-Eq	1,74E+04	1,55E+04	2,16E+04	3,73E+04	1,30E+04	8,69E+03

A Figura 1 representa os impactos ambientais em algumas categorias, para todos os cenários. Desta figura destacam-se alguns impactos associados ao Cenário 3 nomeadamente na Ecotoxicidade: água doce, nos recursos energéticos e Toxicidade: humana. No entanto, no Cenário 3 convém realçar que depois desta etapa estes recursos poderão ser usados no fabrico de novos produtos, havendo, portanto, uma extensão do

ciclo de vida. Nas Alterações climáticas, o maior valor é para o Cenário 2 que privilegia a valorização energética, o que faz sentido, tendo em conta o tipo de processo.

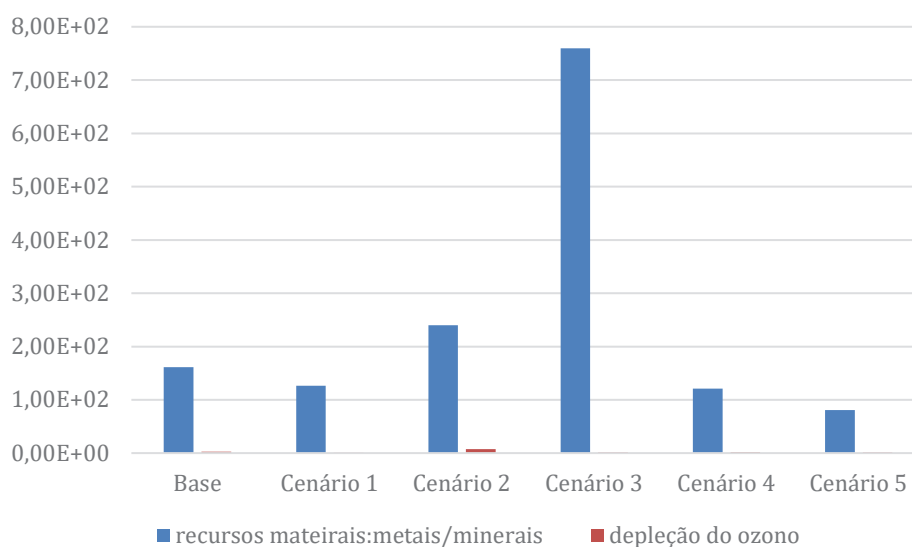
Na Figura 2 apresentam-se os impactos ambientais dos vários cenários para as restantes categorias, excetuando Ecotoxicidade: marinha. De destacar o impacto do Cenário 3 nos recursos materiais e o impacto do Cenário 2 na depleção de ozono.

Finalmente, a Figura 3 apresenta os impactos na categoria Ecotoxicidade: marinha. Destaque para o impacto do Cenário 3 nesta categoria. Os cenários base, 1 e 2 apresentam valores próximos, e com redução apenas os cenários 4 e 5, que atuam na diminuição da geração dos resíduos de plástico.



Acidificação kg SO₂-Eq; alterações climáticas kg CO₂-Eq, ecotoxicidade e toxicidade humana kg 1,4-DCB-Eq, , recursos energéticos MJ, eutrofização kg PO₄-Eq, recursos materiais kg Sb-Eq, depleção ozono kg CFC-11-Eq, oxidação fotoquímica kg etileno-Eq

Figura 1. Identificação dos impactos em algumas categorias de impacto



Acidificação kg SO₂-Eq; alterações climáticas kg CO₂-Eq, ecotoxicidade e toxicidade humana kg 1,4-DCB-Eq, , recursos energéticos MJ, eutrofização kg PO₄-Eq, recursos materiais kg Sb-Eq, depleção ozono kg CFC-11-Eq, oxidação fotoquímica kg etileno-Eq

Figura 2. Identificação dos impactos nas restantes categorias excetuando a ecotoxicidade marinha

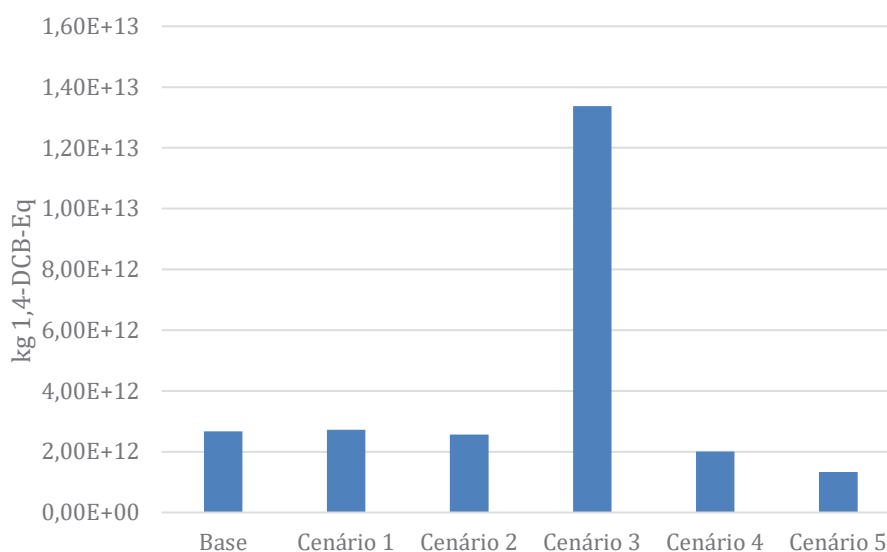


Figura 3. Impactos na categoria ecotoxicidade marinha para os diversos cenários de gestão de plásticos propostos.

O Cenário 3 tem como saída um material que poderá ser usado como matéria-prima para produzir novos plásticos. Considerando a produção de PET, determinaram-se os impactos da substituição de matéria-prima virgem por este produto. Um fator de correção é muitas vezes incluído em estudos de ACV para incorporar a perda de qualidade. Neste caso, considerou-se um valor de 70%, que é o valor mais desfavorável (Harst et al., 2016). Considerando a produção correspondente ao plástico, pode ser contabilizada a substituição de material virgem, utilizando neste caso o processo polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade para a Europa. Os resultados são apresentados no Quadro 5. Verificaram-se melhorias acentuadas em todas as categorias exceto na Ecotoxicidade: água doce e Ecotoxicidade: marinha

Quadro 5. Impactos ambientais correspondentes ao Cenário 3 e Cenário 3 mais substituição

	Cenário 3	Cenário 3 mais substituição de material virgem
Acidificação kg SO ₂ -Eq	3,27E+05	-1,40E+06
Alterações climáticas kg CO ₂ -Eq	1,43E+08	-3,60E+08
Ecotoxicidade: água doce kg 1,4-DCB-Eq	2,44E+09	2,23E+09
Ecotoxicidade: água marinha kg 1,4-DCB-Eq	1,34E+13	1,29E+13
Ecotoxicidade: terrestre kg 1,4-DCB-Eq	2,77E+06	-4,03E+06
Recursos energéticos: não renováveis MJ	1,51E+09	-1,04E+10
Eutrofização kg PO ₄ -Eq	1,34E+05	-4,21E+05
Toxicidade humana kg 1,4-DCB-Eq	5,52E+08	-6,17E+06
Recursos materiais: metais/minerais kg Sb-Eq	7,59E+02	-6,54E+04
Depleção ozono kg CFC-11-Eq	1,19E+00	-1,80E+03
Oxidação fotoquímica kg etileno-Eq	3,73E+04	-1,05E+05

5 Conclusões

Neste trabalho foram considerados vários cenários para o destino dos resíduos plásticos. O Cenário 3, que considera somente a valorização multimaterial, apresenta impactos significativos na acidificação, nos recursos energéticos, nos recursos materiais, na toxicidade humana, na ecotoxicidade: água doce, ecotoxicidade: terrestre, ecotoxicidade: marinha e oxidação fotoquímica. No entanto, estes recursos poderão ser usados no fabrico de novos produtos, havendo, portanto, uma extensão do ciclo de vida, em consonância com a economia circular, e evitando o uso de materiais virgens. Quando isso é considerado verifica-se uma melhoria significativa na maioria das categorias de impacto. Nas alterações climáticas, o maior valor é observado para o Cenário 2, que privilegia a valorização energética, o que faz sentido tendo em conta o tipo de processo. Também aqui há a considerar a potencial redução da utilização de fontes fósseis para a produção de energia, o que pode de algum modo ter um contributo positivo. O Cenário 1 apresenta o maior impacto para a eutrofização.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC): LEPABE, UIDB/00511/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/00511/2020) e UIDP/00511/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/00511/2020) e ALICE, LA/P/0045/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0045/2020).

Referências

- APA, Agência Portuguesa do Ambiente (2022), Relatório Anual Resíduos Urbanos 2021
- Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro de 2020
- Ecoinvent, <https://ecoinvent.org>, acedido em setembro de 2024
- Harst, E. Van der, Potting, J., Kroeze, C. (2016). Comparison of different methods to include recycling in LCAs of aluminium cans and disposable polystyrene cups, *Waste Management* 48, 565-583
- INE (2021), <https://www.ine.pt/>, acedido em setembro de 2024
- Brito, M., & Martins, F. (2017). Life cycle assessment of butanol production. *Fuel*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.050>
- Hsu, W. T., Domenech, T., & McDowall, W. (2022). Closing the loop on plastics in Europe: The role of data, information and knowledge. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 942–951. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.019>
- Miguel, I., Santos, A., Venâncio, C., & Oliveira, M. (2024). Knowledge, concerns and attitudes towards plastic pollution: An empirical study of public perceptions in Portugal. *Science of the Total Environment*, 906(July 2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167784>
- Sheriff, S. S., Yusuf, A. A., Akiyode, O. O., Hallie, E. F., Odoma, S., Yambasu, R. A., Thompson-Williams, K., Asumana, C., Gono, S. Z., & Kamara, M. A. (2025). A comprehensive review on exposure to toxins and health risks from plastic waste: Challenges, mitigation measures, and policy interventions. *Waste Management Bulletin*, 3(3). <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100204>