



AValiação DO CICLO DE VIDA DE POLI(3-HIDROXIBUTIRATO-CO-3-HIDROXIVALERATO) (PHBV) OBTIDO A PARTIR DE BIOMASSAS RESIDUAIS

Dela Corte, G. C.¹; Pessan, L. A.¹; Moreira, F. K. V.^{1*}

¹Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rod. Washington Luís, km 235, 13565-905, São Carlos (SP), Brasil.

***francys@ufscar.br**

RESUMO

Este trabalho buscou comparar, utilizando a avaliação do ciclo de vida (ACV), os indicadores de impacto ambiental de duas rotas de produção do poli(3-hidroxitirato-co-3-hidroxitirato) (PHBV) a partir de biomassas residuais de 2ª e 4ª geração. Ciclos de vida (CVs) foram modelados para as etapas de obtenção da biomassa, fermentação bacteriana e recuperação da resina de PHBV sem uso de solventes não-renováveis. Todas as informações utilizadas para cálculo de impacto foram selecionadas a partir da base de dados Ecoinvent v3.2 e os indicadores de impacto toxicidade à saúde humana, uso do solo, exaustão de recursos minerais, fósseis e renováveis, e pegada hídrica, para ambos os cenários de CV, foram estimados pelo método ILCD 2011 midpoint+, com incertezas calculadas via simulação Monte Carlo. Os resultados mostram que a biomassa de 4ª geração tem menores impactos ambientais em quase todos os indicadores analisados, com diferenças mais significativas em relação à biomassa de 2ª geração no indicador uso do solo. O processo de obtenção e fermentação da biomassa foram respectivamente identificados como a etapa mais impactante em quase todos os indicadores para fontes de carbono de 2ª e 4ª geração, com exceções respectivamente para o indicador efeitos não-cancerígenos de toxicidade à saúde humana - onde a cadeia produtiva do óleo vegetal pós-consumo contribui negativamente ao indicador - e para o indicador uso de recursos hídricos. Assim, pode-se com maior segurança embasar quantitativamente a escolha de rotas alternativas para a produção sustentável de blendas e compósitos biodegradáveis baseados em PHBV para uso em embalagens e outras aplicações de engenharia.

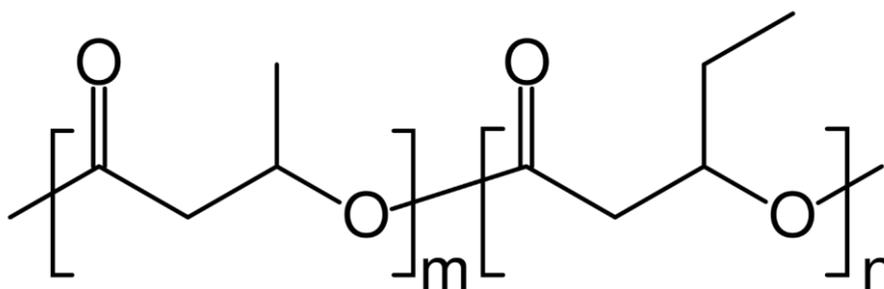
PALAVRAS-CHAVE: poli(3-hidroxitirato-co-3-hidroxitirato) (PHBV), avaliação do ciclo de vida (ACV), biomassa.

INTRODUÇÃO

A produção de novos materiais a partir de recursos renováveis é um dos preceitos do desenvolvimento sustentável (1). Polímeros oriundos de biomassa, por exemplo, se tornaram alternativas de importância para a sustentabilidade, sendo materiais de menor pegada ecológica em comparação aos polímeros de base petroquímica. Em particular, monômeros derivados de óleos vegetais e carboidratos podem ser empregados como matérias-primas para a fabricação de uma variedade de polímeros termoplásticos mediante processos competitivos com aqueles de polímeros convencionais (2, 3).

O poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) (PHBV), um polihidroxicanoato (PHA), Figura 1, obtido via fermentação bacteriana a partir de biomassa rica em carbono, pode impulsionar o desenvolvimento de novos transformados plásticos de baixa pegada ambiental neste contexto. Apesar de sua produção ter sido apenas testada em escala laboratório e piloto, a conversão de biomassa em PHBV usando culturas microbianas está em uma curva crescente de maturidade/otimização, incluindo o potencial para melhorias, como redução no uso de eletricidade e nutrientes durante a síntese microbiana (4). Como o estágio de obtenção foi identificado como o principal contribuinte para encargos ambientais de PHAs, o uso de matérias-primas alternativas, que podem ser resíduos ou subprodutos ou culturas menos intensivas em energia e produtos químicos, é sugerido pela literatura (3).

Figura 1: Fórmula estrutural do PHBV.



Devido à sua capacidade de identificar potenciais efeitos ambientais, quantificá-los e identificar áreas para melhoria, a avaliação do ciclo de vida (ACV) (5) pode ser utilizada para avaliar as pegadas ecológicas da produção do PHBV. Atualmente, existem poucos estudos na literatura que tenham avaliado de forma robusta os

potenciais impactos ambientais da produção de PHBV. Alguns autores (1, 2, 4) afirmam que tais polímeros de biomassa são ambientalmente menos agressivos em indicadores de emissão de gases de efeito estufa e/ou esgotamento de recursos fósseis quando em comparação aos de origem petroquímica, enquanto outros (3, 6) apontam resultados negativos em alguns indicadores de impacto, bem como o fato da maioria das pesquisas publicadas sobre a ACV desses materiais se concentrar em produtos individuais, examinando principalmente indicadores de potencial de aquecimento global ou demanda energética (1). Dessa forma, poucos são os estudos de ACV sobre o efeito das fontes de carbono sobre o desempenho ambiental da produção do PHBV considerando uma perspectiva mais ampla dos potenciais impactos ambientais associados a essa produção e a incerteza quantitativa dos indicadores calculados.

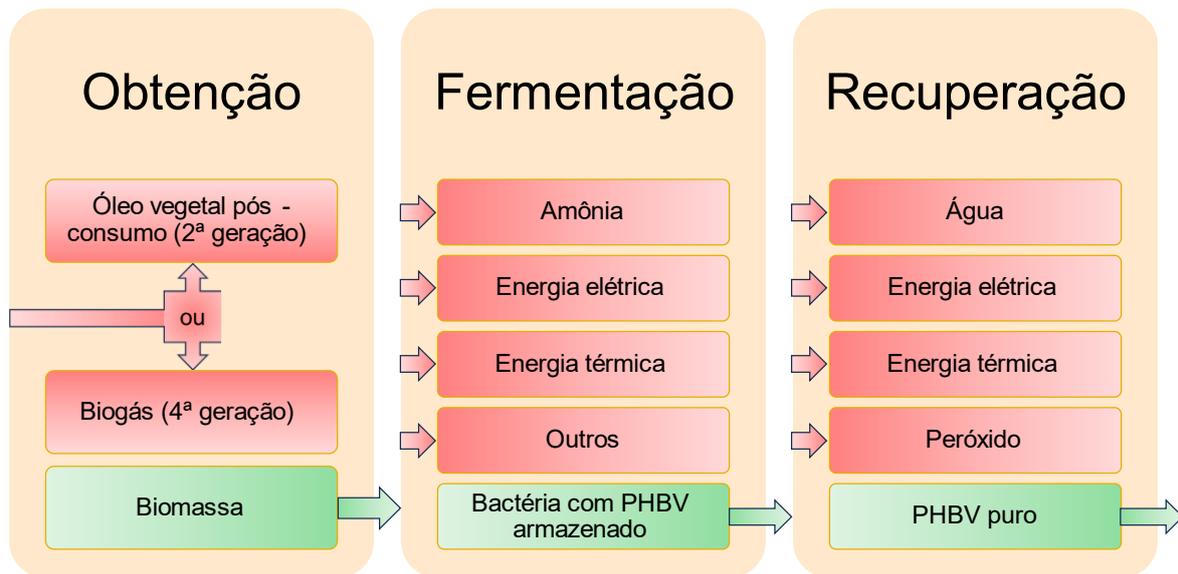
Assim sendo, o presente trabalho foi dedicado à aplicação da ACV para estudar o efeito do tipo de biomassa (fonte de carbono) sobre indicadores ecológicos da produção do PHBV. Foi considerado o uso de óleo vegetal pós-consumo (biomassa de 2ª geração) e biogás (biomassa de 4ª geração) como fonte de carbono para fermentação e produção do PHBV, seguido de recuperação do polímero por processos livres de solvente. Os indicadores ecológicos computados foram baseados nos cenários de impacto sobre o meio ambiente, saúde humana e esgotamento de recursos naturais, tal como recomendado pela ISO 14044.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho buscou comparar, utilizando ACV efetuadas por meio do software openLCA 2.1.1, os indicadores de impacto ambiental de duas rotas de produção do PHBV, nomeadamente, a partir da fermentação de óleo vegetal culinário pós-consumo (biomassa de 2ª geração) e biogás advindo de tratamento de resíduo orgânico (biomassa de 4ª geração) (7). O estudo foi realizado de acordo com a ISO 14044, a qual pressupõe a divisão do trabalho em 4 fases: definição do objetivo e escopo (fase I); análise do inventário de ciclo de vida (fase II); avaliação dos impactos ambientais de ciclo de vida (fase III); interpretação dos resultados (fase IV). Foram assumidos limites de estudo berço-ao-portão e unidade funcional de 1 tonelada de resina de PHBV. Os ciclos de vida foram modelados assumindo 50% de eficiência (relação em peso biomassa:PHBV) para as etapas de obtenção da biomassa, fermentação

bacteriana e recuperação da resina de PHBV, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma dos três processos encadeados de obtenção, fermentação e recuperação do PHBV, mostrando os fluxos de entrada e saída.



Todas as informações utilizadas para cálculo de impacto foram selecionadas a partir da base de dados Ecoinvent v3.2 e os indicadores de impacto toxicidade à saúde humana – HT (subdividido em efeitos cancerígenos de toxicidade à saúde humana (HTc) e efeitos não-cancerígenos de toxicidade à saúde humana (HTnc) de acordo com a Equação A), uso do solo – LU, esgotamento de recursos minerais, fósseis e renováveis – RD e pegada hídrica – WRD para ambos os cenários de CV foram estimados pelo método ILCD 2011 midpoint+, com incertezas uniformes calculadas via simulação Monte Carlo (10000 interações) a partir de valores estratificados da literatura científica (8, 9, 10, 11, 12, 13).

$$HT = HTc + HTnc \quad (A)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados absolutos dos indicadores, expostos abaixo na Tabela 1, observa-se que a produção de PHBV a partir do biogás como fonte de carbono (4ª geração) apresenta menores impactos ambientais em comparação ao uso do óleo vegetal pós-consumo (biomassa de 2ª geração), exceto no indicador HT. As diferenças são mais pronunciadas para o indicador uso da terra (LU) (65 vezes menor)

e menos pronunciadas para o indicador pegada hídrica (WRD) (3 vezes menor). Os desvios-padrão relativos foram entre 0,3% e 27,5%, indicando que o cálculo dos impactos teve um grau promissor de exatidão para alguns indicadores.

Tabela 1: Resultados absolutos dos indicadores de impacto ambiental da produção do PHBV a partir de diferentes biomassas.

Fonte de carbono →		Óleo vegetal pós-consumo (2ª geração)		Biogás (4ª geração)	
HT (* 10 ⁻⁴ CTUh)	HTc	3,7 ± 2,2	15,0 ± 2,4	4,5 ± 1,0	15,5 ± 2,4
	HTnc	11,2 ± 1,0		11,0 ± 2,2	
LU (* 10 ³ C deficit)		548,2 ± 1,8		8,4 ± 1,8	
RD (* 10 ⁻² kg Sb eq)		47,3 ± 1,0		5,2 ± 1,0	
WRD (* 10 ¹ m ³ water eq)		13,5 ± 1,1		4,0 ± 1,1	

Segundo a Tabela 2, respectivamente para as biomassas de 2ª e 4ª geração, os processos de obtenção e fermentação são as etapas mais onerosas ambientalmente em todos os indicadores - exceto em WRD para a biomassa de 4ª geração, onde o maior impacto advém da etapa de recuperação do PHBV, onerada em 55 pontos percentuais pela entrada de água, conforme ilustrado a Figura 2, e em HTnc para a biomassa de 2ª geração, onde a cadeia produtiva do óleo vegetal pós-consumo contribui negativamente ao indicador.

Em tal comportamento excepcional do provedor de óleo vegetal pós-consumo, observou-se que o processo de uso do óleo vegetal seria um sumidouro de metais pesados para a rota de recuperação de PHBV via solventes de base renovável absorvendo quase o triplo em quantidade de CTUh liberados no ciclo de produção do poliéster, de acordo com as informações da base de dados utilizada neste trabalho.

Verificou-se assim que a rota de obtenção da biomassa exerceu impactos finais significativos no processo de fermentação a partir de óleo vegetal pós-consumo, chegando a representar 99,3% dos impactos finais em LU, concordando com a literatura (3) que aponta o estágio de obtenção como o principal contribuinte para os encargos ambientais de PHAs.

Tabela 2: Resultados percentuais das etapas dos processos avaliados.

Indicador\Etapa		Biomassa de 2ª geração			Biomassa de 4ª geração		
		100%			100%		
		Obtenção	Fermentação	Recuperação	Obtenção	Fermentação	Recuperação
HT	HTc	72,3%	17,10%	10,6%	22,0%	48,0%	30,0%
	HTnc	-275,8%	293,4%	82,4%	24,0%	59,4%	16,6%
LU		99,3%	0,6%	0,1%	37,1%	50,6%	12,3%
RD		91,5%	7,6%	0,9%	7,4%	82,4%	10,2%
WRD		74,0%	9,6%	16,4%	1,1%	36,7%	62,2%

CONCLUSÃO

Este trabalho buscou comparar via ACV os indicadores de impacto ambiental de duas rotas de produção do PHBV a partir de biomassa de 2ª e 4ª geração, mensurando etapas de obtenção da biomassa, fermentação bacteriana e recuperação da resina de PHBV, com inventários de ciclo de vida elaborados a partir de revisão literária. É possível intuir que o uso de biomassa mais distante à fonte primária favorece a redução dos impactos ambientais da produção do PHBV. Assim, pode-se com maior segurança embasar quantitativamente a escolha de rotas alternativas para a produção de materiais biodegradáveis baseados em PHBV para uso em embalagens e outras aplicações de engenharia.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- (1) MOUTOUSIDI, E. S.; KOOKOS, I. K. Life cycle assessment of biobased chemicals from different agricultural feedstocks. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, v. 323, p. 129201, 2021. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129201
- (2) ZHU, Y; ROMAIN, C.; WILLIAMS, C. K. Sustainable polymers from renewable resources. *NATURE*, v. 540, p. 354-362, 2016. doi:10.1038/nature21001
- (3) YATES, M. R.; BARLOW, C. Y. Life cycle assessments of biodegradable,

commercial biopolymers - A critical review. *RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING*, v. 78, p. 54-66, 2013. doi:10.1016/j.resconrec.2013.06.010

- (4) NHU, T. T.; BOONE, L.; GUILLARD, V.; CHATELLARD, L.; REIS, M.; MATOS, M.; DEWULF, J. Environmental sustainability assessment of biodegradable bio-based poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) from agro-residues: Production and end-of-life scenarios. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT*, v. 356, p. 120522, 2024. doi:10.1016/j.jenvman.2024.120522
- (5) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. ISO Standard No. 14044:2016. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- (6) WALKER, S.; ROTHMAN, R. Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, v. 261, p. 121158, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121158
- (7) DELA CORTE, G. C.; MOREIRA, F. K. V. The role of n-generation carbon sources on environmental footprints of biodegradable polyesters produced by fermentation. openLCA.conf - Internacional, realizada de 15 a 16 de abril de 2024, Berlim, Berlim, Alemanha – <https://zenodo.org/records/11103649>, Zenodo, p. 73, 2024.
- (8) HARDING, K. G.; DENNIS, J. S.; von BLOTTNITZ, H.; HARRISON, S. T. L. Environmental analysis of plastic production processes: Comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly- β -hydroxybutyric acid using life cycle analysis. *JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY*, v. 130, p. 57-66, 2007. doi:10.1016/j.jbiotec.2007.02.012
- (9) KENDALL, A. A life cycle assessment of biopolymer production from material recovery facility residuals. *RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING*, v. 61, p. 69-74, 2012. doi:10.1016/j.resconrec.2012.01.008
- (10) ROSTKOWSKI, K. H.; CRIDDLE, C. S.; LEPECH, M. D. Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment for a Cradle-to-Cradle Cycle: Biogas-to-Bioplastic (and Back).

ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, v. 46, p. 9822-9829, 2012.
doi:10.1021/es204541w

- (11) FERNÁNDEZ-DACOSTA, C.; POSADA, J. A.; RAMIREZ, A. Techno-economic and carbon footprint assessment of methyl crotonate and methyl acrylate production from wastewater-based polyhydroxybutyrate (PHB). *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 942-952, 2016. doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.152
- (12) KOOKOS, I. K.; KOUTINAS, A.; VLYSIDIS, A. Life cycle assessment of bioprocessing schemes for poly(3-hydroxybutyrate) production using soybean oil and sucrose as carbon sources. *RESOURCES, CONSERVATION & RECYCLING*, v. 141, p. 317-328, 2019. doi:10.1016/j.resconrec.2018.10.025
- (13) KACHRIMANIDOU, V.; IOANNIDOU, S. M.; LADAKIS, D.; PAPAPOSTOULOU, H.; KOPSAHELIS, N.; KOUTINAS, A. A.; KOOKOS, I. K. Techno-economic evaluation and life-cycle assessment of poly (3-hydroxybutyrate) production within a biorefinery concept using sunflower-based biodiesel industry by-products. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 326, p. 124711, 2021.
doi:10.1016/j.biortech.2021.124711

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF POLY(3-HYDROXYBUTYRATE-CO-3-HYDROXYVALERATE) (PHBV) FROM RESIDUAL BIOMASSES

Dela Corte, G. C.¹; Pessan, L. A.¹; Moreira, F. K. V.^{1*}

¹ Department of Materials Engineering (DEMa), Federal University of São Carlos (UFSCar). Rod. Washington Luís, km 235, ZIP Code 13565-905, São Carlos (SP), Brazil.

*francys@ufscar.br

ABSTRACT

This study aimed to compare, using life cycle assessment (LCA), the environmental impact indicators of two production routes for poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) from 2nd and 4th generation residual biomass. Life cycles (LCs) were modeled for the stages of biomass production, bacterial fermentation, and PHBV resin recovery without the use of non-renewable solvents. All information used for impact calculation was selected from the Ecoinvent v3.2 database, and the impact indicators of human health toxicity, land use, mineral, fossil, and renewable resource depletion, and water resource depletion for both LC scenarios were estimated using the ILCD 2011 midpoint+ method, with uncertainties calculated via Monte Carlo simulation in the free software openLCA 2.1.1. Results show that 4th generation biomass has lower environmental impacts in almost all analyzed indicators, with more significant differences compared to 2nd generation biomass in the land use indicator. The biomass production and fermentation process were respectively identified as the most impactful stages in almost all indicators for 2nd and 4th generation carbon sources, with exceptions respectively for the human toxicity non-carcinogenic effects indicator - where the post-consumer vegetable oil production chain contributes negatively to the indicator - and for the water resource depletion indicator. Thus, it is possible to quantitatively support with greater confidence the choice of alternative routes for sustainable production of biodegradable blends and composites based on PHBV for use in packaging and other engineering applications.

KEYWORDS: poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV), life cycle assessment (LCA), biomass.