

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Luiz Gustavo Teixeira

**ANÁLISE SISTEMÁTICA DOS ASPECTOS AMBIENTAIS DO CONSUMO DE EPIS
POLIMÉRICOS DURANTE A PANDEMIA E ACV DA PRODUÇÃO DE
RESPIRADORES PFF2 SEM VÁLVULA COM POLÍMERO RECICLADO VISANDO
REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS**

Sorocaba

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Luiz Gustavo Teixeira

**ANÁLISE SISTEMÁTICA DOS ASPECTOS AMBIENTAIS DO CONSUMO DE EPIS
POLIMÉRICOS DURANTE A PANDEMIA E ACV DA PRODUÇÃO DE
RESPIRADORES PFF2 SEM VÁLVULA COM POLÍMERO RECICLADO VISANDO
REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva

Coorientação: Profa. Dra. Karen de Souza do Prado

Sorocaba

2024

Teixeira, Luiz Gustavo

Análise sistemática dos aspectos ambientais do consumo de EPIs poliméricos durante a pandemia e ACV da produção de respiradores PFF2 sem válvula com polímero reciclado visando redução dos impactos ambientais. / Luiz Gustavo Teixeira -- 2024. 55f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva
Banca Examinadora: Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva, Dra. Virgínia Aparecida da Silva Moris, Dr. José Augusto de Oliveira
Bibliografia

1. Avaliação de ciclo de vida (ACV). 2. Impacto ambiental.. 3. Economia circular.. I. Teixeira, Luiz Gustavo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

LUIZ GUSTAVO TEIXEIRA

ANÁLISE SISTEMÁTICA DOS ASPECTOS AMBIENTAIS DO CONSUMO DE EPIS POLIMÉRICOS DURANTE A PANDEMIA E ACV DA PRODUÇÃO DE RESPIRADORES PFF2 SEM VÁLVULA COM POLÍMERO RECICLADO VISANDO REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Sorocaba, 28 de fevereiro de 2024.

Orientador(a)

Profa. Dr.(a) Jane Maria Faulstich de Paiva

UFSCar - Campus Sorocaba

Examinador(a)

Profa. Dr.(a) Virgínia Aparecida da Silva Moris

UFSCar – Campus Sorocaba

Examinador(a)

Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

UNESP - Campus São João da Boa Vista

DEDICO

À minha filha Betina.

RESUMO

TEIXEIRA, Luiz Gustavo. **Análise sistemática dos aspectos ambientais do consumo de EPIs poliméricos durante a pandemia e ACV da produção de respiradores PFF2 sem válvula com polímero reciclado visando redução dos impactos ambientais.** Defesa da Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos.

O aumento do consumo de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) como máscaras, protetores faciais, óculos e luvas para enfrentamento da pandemia Covid-19 aumentou a geração de resíduos poliméricos. Como os padrões de produção e consumo da indústria e da sociedade geram impactos ambientais, estudos focados no aumento de consumo de polímeros durante e após a pandemia Covid-19 são fundamentais. O objetivo geral deste trabalho foi propor ações de redução dos impactos gerados na produção de respiradores PFF2 sem válvulas, considerando o consumo desses respiradores durante a pandemia Covid-19. Por meio de uma revisão bibliográfica sistemática (RBS), identificou-se que os principais aspectos ambientais do aumento do consumo de EPIs foram: i) poluição ambiental; ii) aumento de microplásticos nas águas; iii) contaminação de águas; iv) contaminação de alimentos; v) redução/eliminação, de reciclagem em alguns locais; vi) aumento no consumo de polímeros virgens. Na ACV, conforme protocolos do OpenLCA, base de dados AGRIBALYSE_V301, base dados ECOINVENT v3.7.1 e metodologia de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H), foram propostos cinco cenários com proporções diferentes de polipropileno de reciclagem secundária para a manufatura do respirador PFF2 sem válvula, devido ao seu maior consumo e similaridade com a N95. Dentre as 18 opções de categorias de impacto, foram apresentadas em maiores detalhes aquecimento global e consumo de água. Os resultados indicaram que a utilização de 10% de polipropileno reciclado pode ocasionar menores impactos ambientais quanto às emissões de gases de efeito estufa (GEE) e consumo de água para geração de energia elétrica. Além disso, pode reduzir o consumo mensal de recursos fósseis em cerca de 97,87 t Oil eq e as emissões de substâncias tóxicas em cerca de 90,60 t 1,4-DCB. Neste trabalho, também sugere-se estudos de ACV futuros com utilização de diferentes cenários, como o uso de polipropileno nacional, águas pluviais, energia eólica ou solar e alumínio reciclado.

Palavras-chave: ACV. Covid-19. EPI. Aspecto ambiental. Impacto Ambiental. PFF2. Polipropileno. PP. Resíduo.

ABSTRACT

The increased consumption of Personal Protective Equipment (PPE) such as masks, face shields, glasses and gloves to combat the Covid-19 pandemic has increased the generation of polymeric waste. As production and consumption patterns in industry and society generate environmental impacts, studies focused on the increase in polymer consumption during and after the Covid-19 pandemic are essential. The general objective of this work was to propose actions to reduce the impacts generated by the production of FFP2 respirators without valves, considering the increase in consumption of these respirators during the Covid-19 pandemic. Through a systematic literature review (RBS), it was identified that the main environmental aspects linked to the increase in PPE consumption were: i) environmental pollution; ii) increase in microplastics in water; iii) water contamination; iv) food contamination; v) reduction/elimination, recycling in some locations; vi) increase in the consumption of virgin polymers. In the LCA, according to OpenLCA standard protocols, AGRIBALYSE_V301 database, ECOINVENT v3.7.1 database and ReCiPe 2016 Midpoint (H) calculation methodology, five scenarios were proposed with different proportions of secondary recycling polypropylene for the manufacture of the FFP2 respirator without valve, due to its higher consumption and similarity with the N95. Among the 18 impact category options, global warming and water consumption were presented in greater detail. The results indicate that the use of 10% recycled polypropylene might cause the lowest environmental impacts in terms of greenhouse gas (GHG) emissions and water consumption to generate electricity. In addition, it also has a potential to reduce the monthly consumption of fossil resources by around 97.87 t Oil eq and the emissions of toxic substances by around 90.60 t 1.4-DCB. This work also suggests future LCA studies using different scenarios, such as national polypropylene, rainwater, wind or solar energy, and recycled aluminum.

Keywords: LCA. Covid-19. PPE. Environmental aspect. Environmental impact. FFP2. . Polypropylene. PP. Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais máscaras utilizadas durante a pandemia Covid-19.....	14
Figura 2: Histórico de vendas nacionais de EPIs: a) Luvas Hospitalares (pares); b) Luvas de Segurança (pares); c) Respiradores Descartáveis/ Sem Manutenção (unidades); d) Óculos de Segurança (unidades).....	19
Figura 3 Histórico de vendas globais de EPIs: a) Luvas de Segurança (US\$ milhão); b) Respiradores Descartáveis/ Sem Manutenção (US\$ milhão); c) Óculos de Segurança (US\$ milhão).....	20
Figura 4: Nuvem de ocorrências de palavras dos artigos selecionados.	26
Figura 5: Classificação hierárquica descendente dos resumos dos artigos selecionados.....	27
Figura 6: Características principais das máscaras mais utilizadas na pandemia Covid-19.....	41
Figura 7: Fluxo do processo e Limites de estudo.....	44
Figura 8: Reduções dos impactos ambientais no cenário B.	49
Figura 9: Aumentos nas categorias de impacto com mudança de matriz elétrica no cenário B.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Termos de pesquisa utilizados na base <i>Web of Science</i>	23
Tabela 2: Termos de pesquisa utilizados na base <i>Scopus</i>	24
Tabela 3: Quantitativos de artigos científicos identificados em cada base de dados.	25
Tabela 4: Projeções de consumos de máscaras em uma mesma localidade no período de 2020 a 2021.	29
Tabela 5: Projeções de geração de resíduos de máscaras cirúrgicas por continente.	30
Tabela 6: Destinação de resíduos domésticos em países da América do Sul.....	32
Tabela 7: Materiais utilizados no respirador PFF2 sem válvula em cada cenário.	45
Tabela 8: Redução das categorias de impactos para cada cenário proposto.	47
Tabela 9: Proporções de aumento dos impactos em relação ao cenário A.....	48
Tabela 10: Projeção de redução dos impactos ambientais do cenário B segundo estimativa de consumo de respiradores nos EUA.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ANIMASEG – Associação Nacional da Indústria de Material de Segurança e Proteção ao Trabalho

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

CH₄ – Metano

CHD – Classificação Hierárquica Descendente

CO₂ – Dióxido de Carbono

Covid-19 – *Corona Virus Disease* (em português, doença do coronavírus)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPI – Equipamento de Proteção Individual

GEE – Gases de Efeito Estufa

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

N₂O – Óxido Nitroso

OMS – Organização Mundial da Saúde

PAN – Poliacrilonitrila

PE – Polietileno

PET – Poli(tereftalato de etileno)

PP – Polipropileno

PU – Poliuretano

PUU – Plástico de Uso Único

QP – Questões de Pesquisa

RBS – Revisão Bibliográfica Sistemática

RSU – Resíduo Sólido Urbano

TP – Termos de Pesquisa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
2. ANÁLISE SISTEMÁTICA DO AUMENTO DO CONSUMO E DESCARTE DE POLÍMEROS DE EPIS DURANTE A PANDEMIA COVID-19 E PRINCIPAIS ASPECTOS AMBIENTAIS	17
2.1. INTRODUÇÃO.....	18
2.2. METODOLOGIA	21
2.2.1. Questões de Pesquisa	22
2.2.2. Termos de Pesquisa	23
2.2.3. Critérios de Inclusão	24
2.2.4. Critérios de Exclusão	25
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.3.1. QP1 – Qual é o cenário global de consumo de EPIs de base polimérica na pandemia Covid-19?	28
2.3.2. QP2 – Qual é o cenário global de geração de resíduos poliméricos de EPIs pós- consumo na pandemia Covid-19?	29
2.3.3. QP3 – Quais são os aspectos ambientais atrelados ao aumento da geração de resíduos poliméricos de EPIs pós-consumo durante a pandemia Covid-19?	31
2.3.4. Conclusões	33
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE RESPIRADORES PFF2 SEM VÁLVULA PRODUZIDOS COM MISTURA DE POLIPROPILENO VIRGEM E RECICLADO	39
3.1. INTRODUÇÃO.....	40
3.2. METODOLOGIA	43
3.2.1. Objetivo e escopo da ACV.....	43

3.2.2. Limites do estudo	43
3.2.3. Unidade funcional	44
3.2.4. Inventário.....	44
3.2.5. Categorias de Impacto	45
3.2.6. Análise de Sensibilidade	45
3.2.7. Cálculo de redução dos impactos	46
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.3.1 Interpretações da ACV	46
3.3.2 Projeção de redução dos impactos ambientais frente ao consumo de respiradores na pandemia COVID-19	49
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
4. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	56

1. INTRODUÇÃO

No estudo de Prata *et al.* (2020), os autores afirmam que os polímeros revolucionaram o mundo moderno e contribuíram para melhorias na saúde por meio da segurança alimentar, ao desenvolver embalagens mais seguras e diversos equipamentos médicos descartáveis. Contudo, seu uso indiscriminado e o mau gerenciamento de seus resíduos levaram à contaminação ambiental generalizada. Nesse sentido, Patrício Silva *et al.* (2021) afirmam que os resíduos poliméricos se tornaram uma grave ameaça internacional aos ecossistemas naturais e à saúde humana. Esta situação provavelmente foi agravada pelo consumo excessivo de Plásticos de Uso Único (PUU), incluindo aqui os Equipamentos de Proteção Individual (EPI) durante a pandemia Covid-19. Na Figura 1 estão mostrados os principais tipos de máscaras utilizadas durante a pandemia Covid-19. Dessa forma, estudos focados nos aspectos e impactos ambientais gerados pelo aumento dos resíduos poliméricos durante a pandemia Covid-19 são fundamentais. Segundo a ABNT (2015), aspecto ambiental é o resultado das interações das atividades, produtos ou serviços com o meio ambiente gerando impacto(s) ambiental(is). Ao passo que, impacto ambiental, é a consequência do aspecto ambiental, resultando em modificação no meio ambiente, tanto adversa como benéfica.

Hantoko *et al.* (2021) e Cabrejos-Cardena *et al.*, (2023) descreveram que, devido às recomendações de proteção, bilhões de EPIs foram produzidos e usados diariamente. Kilmartin-lynn *et al.* (2021) citaram que foram encontradas luvas de borracha, máscaras e frascos de desinfetante de mãos no oceano. Karris *et al.* (2023) citam terem identificado aves marinhas presas em EPIs pós-consumo no mar mediterrâneo. Já Saberian *et al.* (2021) evidenciaram o aparecimento de EPI em vias públicas. Dessa maneira, este trabalho visa responder a seguinte questão: quais são os aspectos ambientais gerados pelo aumento do descarte de polímeros de EPIs pós-consumo durante a pandemia COVID-19?

Segundo Fan *et al.* (2021), a pandemia Covid-19 contribuiu muito para o aumento de resíduos sólidos, gerando diferentes desafios para sua gestão, tais como: mudanças de quantidades, composições, frequências de geração, distribuições e riscos. No trabalho de Armoh *et al.* (2023), os autores apresentam evidências que pilotos de triciclos da coleta de resíduos, em Gana, foram contaminados pelo vírus SARS-CoV-2.

Para o levantamento dos vários trabalhos publicados no período da pandemia, aplicou-se uma pesquisa exploratória e uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) em artigos científicos com o objetivo de avaliar as contribuições já realizadas, de forma a compreender os aspectos ambientais atrelados ao aumento de descarte de polímeros de EPIs pós-consumo. A

pesquisa se utilizou das bases *Web of Science* e *Scopus*, devido à conhecida reputação nos meios acadêmicos e seus extensos bancos de dados. Para a RBS, foram consideradas as etapas propostas por Tranfield *et al.* (2003) e realizou-se a pesquisa inicial, considerando os termos de exclusão e de inclusão (conforme itens 2.2.3 e 2.2.4) e fez-se a avaliação dos resultados, descritos em 2.3.

Figura 1: Principais máscaras utilizadas durante a pandemia Covid-19.

Máscara Cirúrgica	Máscara Lavável	Respirador PFF
		
<p>Tipo I: eficiência de filtração bacteriana acima de 95%; recomendada para o público em geral.</p> <p>Tipo II/IIR: eficiência de filtração bacteriana acima de 98% (a IIR possui proteção adicional de respingos); recomendada para uso profissional.</p>	<p>Variam desde simples máscaras caseiras de algodão à máscaras de multicamadas produzidas comercialmente.</p> <p>Embora muitas não sejam testadas, algumas são certificadas para uma eficiência de filtragem específica para um número específico de lavagens.</p>	<p>Ajuste perfeito ao rosto.</p> <p>Valvulada ou não para facilitar a expiração.</p> <p>Diferentes nomes: i) EUA: N95 (95% de filtragem de partículas), N99 (99%) e N100 (99,97%); ii) China: KN com numeração e filtragens iguais aos EUA; iii) Europa: FFP1 (80%), FFP2 (94%) e FFP3 (99%); iv) Brasil: PFF com numeração e eficiências iguais da Europa.</p>

Fonte: Adaptado de Allison *et al.*, 2021; Notten *et al.*, 2022; Rodríguez, Formentini, Favi, & Marconi, 2021b, 2021a.

Após o estudo de RBS, fez-se um trabalho de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) utilizando o software OpenLCA, base de dados AGRIBALYSE_V301 e ECOINVENT v3.7.1, metodologia de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H) e, como unidade funcional, a produção de 1.000 respiradores do tipo PFF2 sem válvula.

O objetivo geral deste trabalho foi propor ações de redução dos impactos gerados na produção de respiradores PFF2 sem válvulas, considerando o aumento do consumo desses respiradores durante a pandemia Covid-19.

Para isso, este trabalho se apresenta em quatro capítulos, sendo: i) primeiro capítulo: é apresentada uma introdução ao assunto junto à contextualização, problemática, justificativa,

objetivos e metodologias; ii) segundo capítulo: são apresentados os resultados da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), que resultaram na elaboração de um artigo com o nome similar ao do capítulo, intitulado “Análise sistemática do aumento do consumo e descarte de polímeros de EPIs durante a pandemia Covid-19 e principais aspectos ambientais”, onde foram identificados os principais aspectos ambientais atrelados ao aumento do consumo de EPIs durante a pandemia da Covid-19”; iii) terceiro capítulo: são apresentados os resultados da ACV, que resultaram em um texto para um artigo com o mesmo nome do capítulo, intitulado “Avaliação do ciclo de vida de respiradores PFF2 sem válvula”. Nele, são avaliadas as categorias de impacto para cinco cenários distintos de uso de polipropileno (PP); iv) quarto capítulo: são apresentadas as considerações gerais do trabalho.

1.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (2015). ABNT NBR ISO 14001 Sistemas de gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso. In Associação Brasileira de Normas Técnicas (pp. 1–41).

Allison, A. L., Ambrose-Dempster, E., Bawn, M., Arredondo, M. C., Chau, C., Chandler, K., Dobrijevic, D., Aparasi, T. D., Hailes, H. C., Lettieri, P., Liu, C., Medda, F., Michie, S., Miodownik, M., Munro, B., Purkiss, D., & Ward, J. M. (2021). The impact and effectiveness of the general public wearing masks to reduce the spread of pandemics in the UK: a multidisciplinary comparison of single-use masks versus reusable face masks. *UCL Open Environment*, 3. <https://doi.org/10.14324/111.444/ucloe.000022>

Armoh, S. Y., Aryeetey, S., Kamasah, J. S., Boahen, K. G., Owusu, M., Adjei-Boateng, A., Agbenyega, O., Kwarteng, A., Hingley-Wilson, S., Obiri-Danso, K., Ansong, D., & Sylverken, A. A. (2023). Solid waste motor tricycle operators in Kumasi, Ghana, harbour respiratory pathogens; a public health threat. *PLoS ONE*, 18(4 APRIL), e0284985. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284985>

Cabrejos-Cardena, U., De-la-Torre, G. E., Dobaradaran, S., & Rangabhashiyam, S. (2023). An ecotoxicological perspective of microplastics released by face masks. *Journal of Hazardous Materials*, 443(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130273>

Fan, Y. Van, Jiang, P., Hemzal, M., & Klemeš, J. J. (2021). An update of COVID-19 influence on waste management. *Science of the Total Environment*, 754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142014>

Hantoko, D., Li, X., Pariatamby, A., Yoshikawa, K., Horttanainen, M., & Yan, M. (2021). Challenges and practices on waste management and disposal during COVID-19 pandemic. *Journal of Environmental Management*, 286(February), 112140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112140>

Karris, G., Savva, I., Kakalis, E., Bairaktaridou, K., Espinosa, C., Smith, M. S., Botsidou, P., Moschous, S., Voulgaris, M. D., Peppas, E., Panayides, P., Hadjistyllis, H., & Iosifides, M.

(2023). First sighting of a pelagic seabird entangled in a disposable COVID-19 facemask in the Mediterranean Sea. *Mediterranean Marine Science*, 24(1), 50–55.

<https://doi.org/10.12681/mms.31918>

Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Li, J., Roychand, R., & Zhang, G. (2021). Preliminary evaluation of the feasibility of using polypropylene fibres from COVID-19 single-use face masks to improve the mechanical properties of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126460>

Notten, P., Gower, A., & Lewis, Y. (2022). Single-use face masks and their alternatives: Recommendations from Life Cycle Assessments. United Nations Environment Programme (UNEP). www.lifecycleinitiative.org/library/single-use-face-masks-and-their-alternatives-recommendations-from-life-cycle-assessments/

Patrício Silva, A. L., Prata, J. C., Walker, T. R., Duarte, A. C., Ouyang, W., Barcelò, D., & Rocha-Santos, T. (2021). Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. *Chemical Engineering Journal*, 405(August 2020), 126683.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126683>

Prata, J. C., Silva, A. L. P., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). COVID-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics. *Environmental Science and Technology*, 54(13), 7760–7765. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02178>

Rodríguez, N. B., Formentini, G., Favi, C., & Marconi, M. (2021a). Engineering design process of face masks based on circularity and life cycle assessment in the constraint of the covid-19 pandemic. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094948>

Rodríguez, N. B., Formentini, G., Favi, C., & Marconi, M. (2021b). Environmental implication of personal protection equipment in the pandemic era: LCA comparison of face masks typologies. *Procedia CIRP*, 98, 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.108>

Saberian, M., Li, J., Kilmartin-Lynch, S., & Boroujeni, M. (2021). Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase. *Science of the Total Environment*, 769, 145527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145527>

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

2. ANÁLISE SISTEMÁTICA DO AUMENTO DO CONSUMO E DESCARTE DE POLÍMEROS DE EPIS DURANTE A PANDEMIA COVID-19 E PRINCIPAIS ASPECTOS AMBIENTAIS

Este capítulo corresponde à avaliação do cenário de consumo de EPIs durante a pandemia Covid-19, de forma a fornecer elementos científicos que corroborem com a necessidade de ações de redução dos impactos ambientais na produção de respiradores PFF2 sem válvula.

Parte deste capítulo foi publicado no evento científico ENEGEP 2023, sob o título “*Analysis of increased consumption and disposal of PPE polymers during the COVID-19 pandemic and possible environmental impacts*”. DOI: [10.14488/enegep2023_tn_wpg_407_2001_46327](https://doi.org/10.14488/enegep2023_tn_wpg_407_2001_46327)

Resumo: O aumento do consumo de EPIs como máscaras, protetores faciais, óculos de segurança e luvas para combate à pandemia da Covid-19 aumentou a geração de resíduos poliméricos. Neste cenário, estudos focados nos aspectos ambientais, vinculados à gestão de resíduos poliméricos, durante e após a pandemia da Covid-19 são essenciais. Portanto, neste trabalho foi realizada uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) – para identificar o cenário global de consumo de EPI durante a pandemia, bem como a geração de resíduos poliméricos pós-consumo a partir de EPI. As estimativas indicam a geração de 244,2 kg/s de resíduos de máscaras cirúrgicas em todo o mundo. Embora o aumento da geração de resíduos poliméricos tenha afetado a gestão de resíduos, a reciclagem de resíduos poliméricos foi suspensa devido a restrições técnicas e de segurança, fazendo com que os resíduos fossem enviados para aterros sanitários. Foram levantados os possíveis principais aspectos ambientais decorrentes do descarte inadequado de máscaras e luvas, como forma de fornecer suporte científico para que ações de mitigação possam ser tomadas. Entre eles estão a poluição ambiental, aumento de microplásticos nas águas, contaminação de águas, contaminação de alimentos e redução, ou mesmo eliminação, da reciclagem em alguns locais, gerando conseqüentemente aumento no consumo de polímeros virgens.

Palavras-chave: Consumo. Covid-19. EPI. Aspecto ambiental. Impacto ambiental. Polímero. Polipropileno. Resíduo.

Abstract: The increased consumption of PPE such as masks, face shields, safety glasses and gloves to combat the Covid-19 pandemic has increased the generation of polymeric waste. In this scenario, studies focused on environmental aspects, linked to the management of polymeric waste, during and after the Covid-19 pandemic are essential. Therefore, in this work a Systematic Bibliographic Review (RBS) was carried out – to identify the global scenario of PPE consumption during the pandemic, as well as the generation of post-consumer polymeric waste from PPE. Estimates indicate the generation of 244.2 kg/s of surgical mask waste worldwide. Although the increase in generation of polymeric waste has affected waste management, recycling of polymeric waste has been suspended due to technical and safety restrictions, causing waste to be sent to landfills. The possible main environmental aspects arising from the inappropriate disposal of masks and gloves were raised, as a way of providing scientific support so that mitigation actions can be taken. Among them are environmental pollution, increase in microplastics in water, water contamination, food contamination and reduction, or even elimination, of recycling in some places, consequently generating an increase in the consumption of virgin polymers.

Keywords: Consumption. Covid-19. PPE. Environmental aspect. Environmental impact. Polymer. Polypropylene. Waste.

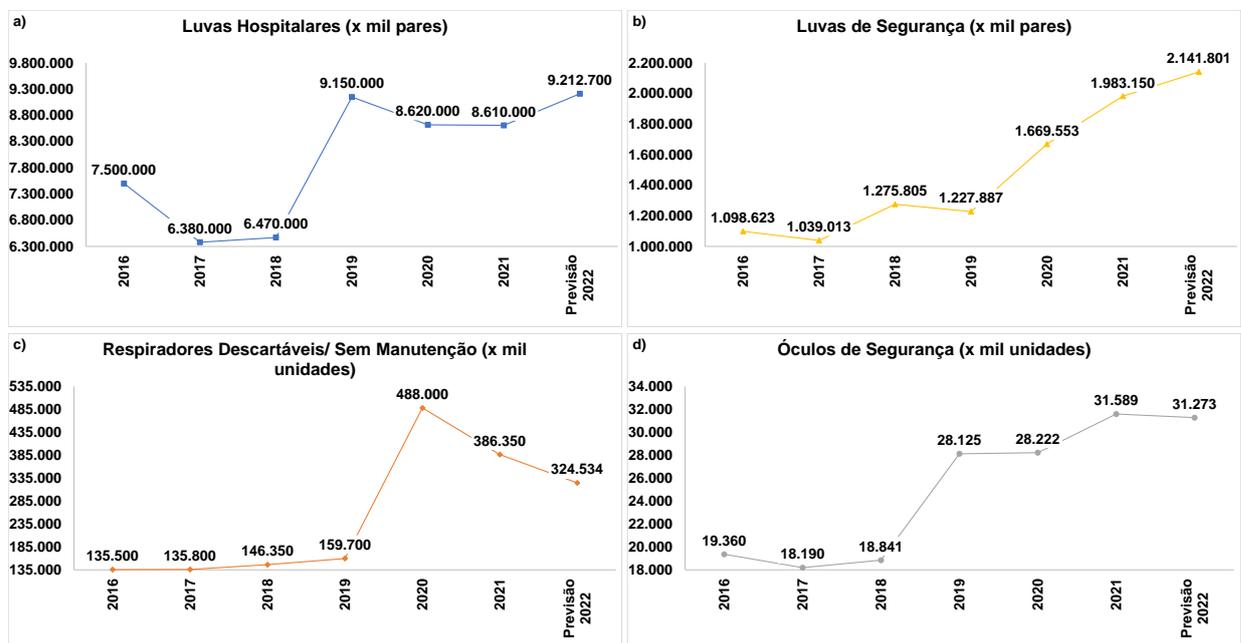
2.1. INTRODUÇÃO

A pandemia Covid-19 se espalhou rapidamente pelo mundo, especialmente em países como os Estados Unidos, Índia, Brasil e Rússia (Zhao *et al.* 2021). De acordo com dados da Organização Mundial da Saúde (OMS), o número global de pessoas contaminadas pela Covid-19 até 31 de dezembro de 2023 foi de 773.819.856, com 7.010.568 mortes (WHO, 2024). Considerando os dados do Brasil até 30 de dezembro de 2023, houve 38.210.864 pessoas contaminadas pela Covid-19 e 708.638 óbitos (Ministério da Saúde, Brasil, 2024).

Devido à necessidade de proteção contra o SARS-CoV-2 (vírus causador da Covid-19), o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) tornou-se necessário, principalmente nos momentos de ápice da contaminação. Hantoko *et al.* (2021) e Cabrejos-Cardena *et al.* (2023) ressaltam que, no cotidiano das pessoas, devido às recomendações de proteção, bilhões de EPIs foram produzidos e usados diariamente. Dentre as principais ferramentas de proteção contra a Covid-19 estão máscaras, protetores faciais, óculos de segurança, luvas, e aventais, em sua maioria produzidos com diferentes polímeros (Rodríguez *et al.* 2021a).

Conforme Figuras 2a-d, no mercado brasileiro, pode ser verificado que os consumos (unidades) de EPIs durante a pandemia (2019 a 2022) foram mais elevados que os 3 anos anteriores à pandemia (2016 a 2018). Para as luvas hospitalares foi verificado um aumento mensal médio de 31,2%; para as luvas de segurança, 54,3%; para os respiradores descartáveis/sem manutenção, 144,0%; para os óculos de segurança, 58,5%.

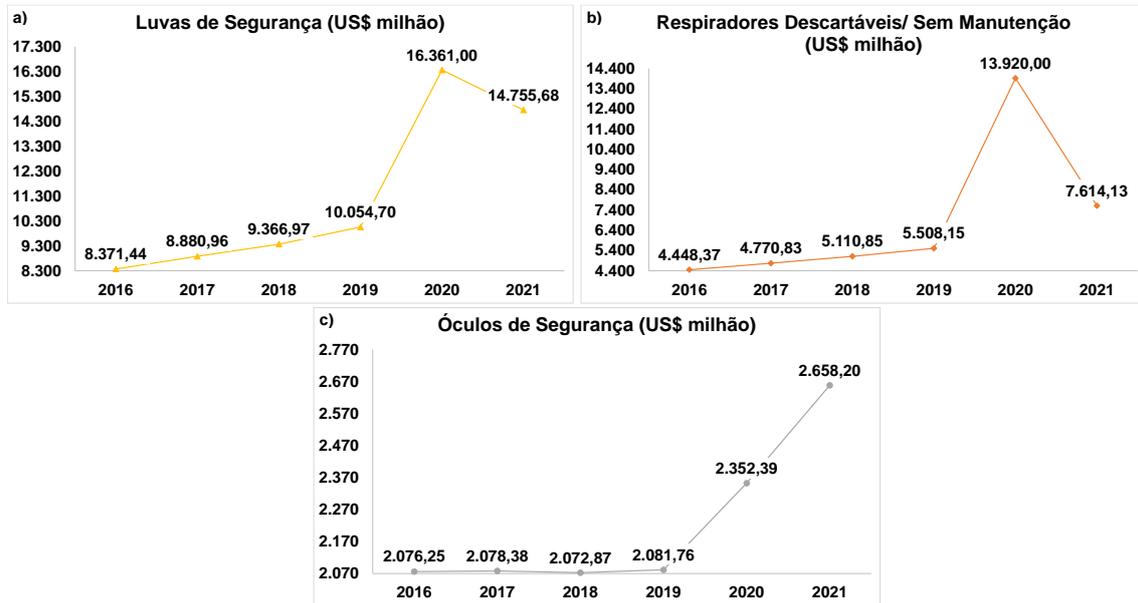
Figura 2: Histórico de vendas nacionais de EPIs: a) Luvas Hospitalares (pares); b) Luvas de Segurança (pares); c) Respiradores Descartáveis/ Sem Manutenção (unidades); d) Óculos de Segurança (unidades).



Fonte: Adaptado de ANIMASEG (2023).

Já para o mercado global, Figuras 3a-c, pode ser verificado que os faturamentos (não há dados unitários) durante a pandemia (2019 a 2021) foram mais elevados que os 3 anos anteriores à pandemia (2016 a 2018). Neste caso, considerando os triênios citados, os aumentos nos faturamentos foram de 54,7% para as luvas de segurança, 88,7% para os respiradores descartáveis/sem manutenção e 13,9% para os óculos de segurança.

Figura 3 Histórico de vendas globais de EPIs: a) Luvas de Segurança (US\$ milhão); b) Respiradores Descartáveis/ Sem Manutenção (US\$ milhão); c) Óculos de Segurança (US\$ milhão).



Fonte: Adaptado de (ANIMASEG, 2023).

De modo geral, os dados apresentados por ANIMASEG (2023) corroboram com os dados apresentados na revisão bibliográfica realizada neste trabalho, evidenciando o aumento de consumo dos EPIs, principalmente para os respiradores. Os autores Liang *et al.* (2021) estimam que o aumento no consumo de máscaras faciais e luvas cirúrgicas chegue a 20% até 2025, comparando-se ao consumo antes da pandemia.

As máscaras do tipo N (95, 99 e 100), FFP (1, 2 e 3) e PFF (1, 2 e 3), por exemplo, que possuem a maior proteção contra a Covid-19, são produzidas com polipropileno (PP) e Poli (tereftalato de etileno) (PET) (Patrício Silva *et al.* 2021). Além disso, diversos outros modelos de máscaras descartáveis utilizam polietileno (PE), PP e PET. Outros polímeros amplamente usados na produção de EPIs são poliácrlonitrila (PAN), poliuretano (PU), látex e vinil (Ammendolia *et al.* 2021).

O aumento da demanda por EPIs levou ao aumento da produção de produtos poliméricos. Ao longo da pandemia de Covid-19, a China ampliou em 12 vezes a sua produção de máscaras faciais, chegando a 116 milhões de unidades diárias. Kannan *et al.* (2023) indicam ainda que, em 2020, cerca de 1,56 bilhões de máscaras faciais chegaram ao oceanos.

Por outro lado, o aumento da produção e do consumo de EPIs durante a pandemia de Covid-19 levou ao aumento da geração de resíduos poliméricos. Em Wuhan (cidade onde se

iniciou a Covid-19), por exemplo, os hospitais produziram mais de 240 t/dia de resíduos de PUU no pico da pandemia, uma quantidade seis vezes maior que a habitual (Adyel, 2020).

Conforme discutido por Klemeš *et al.* (2020), o gerenciamento de resíduos poliméricos é um meio importante de evitar que os resíduos agravem a poluição ambiental. No entanto, a pandemia de Covid-19 trouxe alterações significativas nos sistemas de gestão de resíduos em todo o mundo (Zand & Heir, 2021), fazendo com que os aspectos e impactos ambientais atrelados ao aumento da geração de resíduos ficassem em segundo plano frente à preservação da vida (Patrício Silva *et al.*, 2020). Além disso, sistemas como o de saúde, por exemplo, se viram sobrecarregados com o aumento sem precedentes da produção de resíduos poliméricos (Klemeš, Fan, Tan, & Jiang, 2020). Segundo o trabalho de Klemeš *et al.* (2020), apesar de a reciclagem energética ser a opção mais adequada dentre as opções de tratamento de resíduos hospitalares, as preocupações com emissões atmosféricas geraram obstáculos para o uso generalizado da incineração.

A preocupação com os aspectos ambientais causados pela pandemia Covid-19 foi levantada por diversos autores (Ankit *et al.*, 2021; Patrício Silva *et al.*, 2021; Rume & Islam, 2020). Embora alguns estudos tenham explorado possíveis soluções para o descarte de EPIs (Patrício Silva *et al.*, 2020), os possíveis aspectos ambientais do aumento do descarte de materiais poliméricos provenientes de EPIs usados durante a pandemia de Covid-19 ainda não são totalmente conhecidos, apesar de serem frequentemente observados.

Sabe-se que a poluição gerada pelos materiais poliméricos mobiliza governos, empresas e comunidades (Vanapalli *et al.* 2021). Em 2017, a poluição dos oceanos causada pelos resíduos poliméricos foi considerada pela Organização das Nações Unidas (ONU) como uma crise mundial. Nesse contexto, o estudo dos aspectos ambientais atrelados aos resíduos poliméricos, é fundamental para redução dos impactos potencializados pela pandemia Covid-19. Assim, este trabalho teve como objetivo identificar os aspectos ambientais atrelados ao aumento do consumo e descarte de polímeros de EPIs pós-consumo durante a pandemia Covid-19. Além disso, busca também fornecer subsídios científicos para a avaliação de quais ações de mitigação podem ser realizadas.

2.2. METODOLOGIA

Neste trabalho, a metodologia empregada foi a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) de artigos científicos. Com isso, buscou-se avaliar as contribuições já realizadas, de forma a compreender os aspectos ambientais atrelados ao aumento de descarte de polímeros de EPIs

pós-consumo. As bases de pesquisa usadas neste trabalho foram *Web of Science* e *Scopus*, devido à conhecida reputação nos meios acadêmicos e seus extensos bancos de dados.

Para a RBS foram consideradas as etapas propostas por Tranfield, Denyer e Smart (2003): fase 0 – definição pela RBS para direcionar o estudo proposto; fase 1 – desenvolvimento das questões de pesquisa a serem estudadas; fase 2 – desenvolvimento de protocolos de pesquisa incluindo termos, combinação de termos e critérios de seleção; fase 3 – realização das pesquisas avaliando, classificando e incluindo/excluindo artigos; fase 4 – seleção dos artigos; fase 5 – avaliação da qualidade das informações contidas nos artigos selecionados; fase 6 e 7 – extração, compilação e análise dos dados contidos nos artigos selecionados.

De maneira a auxiliar na RBS e classificação dos artigos utilizou-se o software Iramuteq (versão 0.7 alpha 2) que realiza uma análise estatística em textos buscando as palavras de maior repetição (substantivos, verbos, adjetivos e advérbios) (de Oliveira *et al.*, 2022). Para isso, foi realizada uma análise qualitativa dos artigos selecionados a partir de seus resumos, que compuseram o corpus original organizado em um único arquivo. No software, os segmentos de texto (corpus) foram analisados, conforme classificação hierárquica descendente (CHD), em função da frequência de ocorrência dos vocabulários (verbos, adjetivos e nomes comuns) nos resumos inseridos no corpus.

2.2.1. Questões de Pesquisa

O objetivo da RBS foi identificar os aspectos ambientais atrelados ao aumento de consumo de EPIs. Assim, para auxiliar nesse processo, foram elaboradas as seguintes Questões de Pesquisa (QP):

- QP1 - Qual é o cenário global de consumo de EPIs de base polimérica na pandemia Covid-19?
- QP2 - Qual é o cenário global de geração de resíduos poliméricos de EPIs pós-consumo na pandemia Covid-19?
- QP3 - Quais são os aspectos ambientais atrelados ao aumento da geração de resíduos poliméricos de EPIs pós-consumo durante a pandemia Covid-19?

2.2.2. Termos de Pesquisa

Considerando cada questão de pesquisa (QP), foram realizadas consultas nas bases científicas com os Termos de Pesquisa (TP) a seguir. Assim, a TP1 está relacionada com a QP1, a TP2 com a QP2 e a TP3 com a QP3. Para isso, os termos utilizados em ambas as bases são os mesmos, exceto as diferenças de formatação exigidas em cada base. Os termos modificados são apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, para as bases Web of Science e Scopus.

Tabela 1: Termos de pesquisa utilizados na base *Web of Science*.

TP	Termo
1	<p>(TS=((<i>ppe*</i> OR "<i>personal protective equipment*</i>") AND (<i>covid*</i> OR <i>pandemic*</i> OR <i>sars*</i> OR <i>coronavirus*</i>) AND (<i>*plastic*</i> OR <i>polymer*</i>))) AND IDIOMA: (<i>English</i>) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (<i>Article</i>)</p> <p>Tempo estipulado: 2020-2023. Índices: SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI.</p>
2	<p>(TS=((<i>ppe*</i> OR "<i>personal protective equipment*</i>") AND (<i>covid*</i> OR <i>pandemic*</i> OR <i>sars*</i> OR <i>coronavirus*</i>) AND (<i>*plastic*</i> OR <i>polymer*</i>) AND (<i>waste*</i> OR <i>garbage*</i> OR <i>rubbish*</i> OR <i>trash*</i> OR <i>debris*</i> OR <i>discard*</i>))) AND IDIOMA: (<i>English</i>) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (<i>Article</i>)</p> <p>Tempo estipulado: 2020-2023. Índices: SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI.</p>
3	<p>(TS=((<i>ppe*</i> OR "<i>personal protective equipment*</i>") AND (<i>covid*</i> OR <i>pandemic*</i> OR <i>sars*</i> OR <i>coronavirus*</i>) AND (<i>*plastic*</i> OR <i>polymer*</i>) AND (<i>waste*</i> OR <i>garbage*</i> OR <i>rubbish*</i> OR <i>trash*</i> OR <i>debris*</i> OR <i>discard*</i>) AND (<i>pollution*</i> OR <i>environment*</i> OR "<i>environmental impact*</i>"))) AND IDIOMA: (<i>English</i>) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (<i>Article</i>)</p> <p>Tempo estipulado: 2020-2023. Índices: SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI.</p>

Fonte: elaboração própria

Tabela 2: Termos de pesquisa utilizados na base *Scopus*.

TP	Termo
1	<p>(<i>TITLE-ABS-KEY (ppe*) OR TITLE-ABS-KEY ("personal protective equipment*") AND TITLE-ABS-KEY (covid*) OR TITLE-ABS-KEY (pandemic*) OR TITLE-ABS-KEY (sars*) OR TITLE-ABS-KEY (coronavirus*) AND TITLE-ABS-KEY (*plastic*) OR TITLE-ABS-KEY (polymer*)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020))</i></p>
2	<p>(<i>TITLE-ABS-KEY (ppe*) OR TITLE-ABS-KEY ("personal protective equipment*") AND TITLE-ABS-KEY (covid*) OR TITLE-ABS-KEY (pandemic*) OR TITLE-ABS-KEY (sars*) OR TITLE-ABS-KEY (coronavirus*) AND TITLE-ABS-KEY (*plastic*) OR TITLE-ABS-KEY (polymer*) AND TITLE-ABS-KEY (waste*) OR TITLE-ABS-KEY (garbage*) OR TITLE-ABS-KEY (rubbish*) OR TITLE-ABS-KEY (trash*) OR TITLE-ABS-KEY (debri*) OR TITLE-ABS-KEY (discard*)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))</i></p>
3	<p>(<i>TITLE-ABS-KEY (ppe*) OR TITLE-ABS-KEY ("personal protective equipment*") AND TITLE-ABS-KEY (covid*) OR TITLE-ABS-KEY (pandemic*) OR TITLE-ABS-KEY (sars*) OR TITLE-ABS-KEY (coronavirus*) AND TITLE-ABS-KEY (*plastic*) OR TITLE-ABS-KEY (polymer*) AND TITLE-ABS-KEY (waste*) OR TITLE-ABS-KEY (garbage*) OR TITLE-ABS-KEY (rubbish*) OR TITLE-ABS-KEY (trash*) OR TITLE-ABS-KEY (debri*) OR TITLE-ABS-KEY (discard*) AND TITLE-ABS-KEY (pollution*) OR TITLE-ABS-KEY (environment*) OR TITLE-ABS-KEY ("environmental impact*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))</i></p>

Fonte: elaboração própria

2.2.3. Critérios de Inclusão

De forma a facilitar a seleção dos artigos científicos a serem avaliados, os critérios a seguir foram definidos para que o artigo fosse incluído na RBS.

- Artigos científicos completos;

- Artigos publicados entre 2020 e 2023;
- Artigos publicados no idioma inglês.

2.2.4. Critérios de Exclusão

Os critérios de exclusão utilizados neste trabalho estão listados a seguir:

- Documentos apresentados em congresso ou similares;
- Resumos de eventos científicos;
- Artigos focados em procedimentos médicos e veterinários;
- Artigos que não forneçam informações atreladas às QP. Estas informações foram avaliadas no Título, Resumo e Palavras-Chave;
- Artigos não disponíveis para *download*.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após ajustes dos termos específicos para cada base de dados, realizou-se a pesquisa de artigos científicos. Para os TP1, relacionado à QP1, houve o maior número de artigos científicos em ambas as bases, totalizando 1.359 artigos. Após a eliminação de artigos duplicados entre as bases, chegou-se a um total de 929 artigos. À medida que os TP2 e TP3 tornaram-se mais específicos, a quantidade de artigos encontrados foi diminuindo, chegando a um total de, respectivamente, 221 e 171 artigos para as QP2 e QP3, após eliminação de duplicidades. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Quantitativos de artigos científicos identificados em cada base de dados.

TP	Web of Science	Scopus	Total	Unificação
1	495	864	1.359	929
2	168	193	361	221
3	133	149	282	171

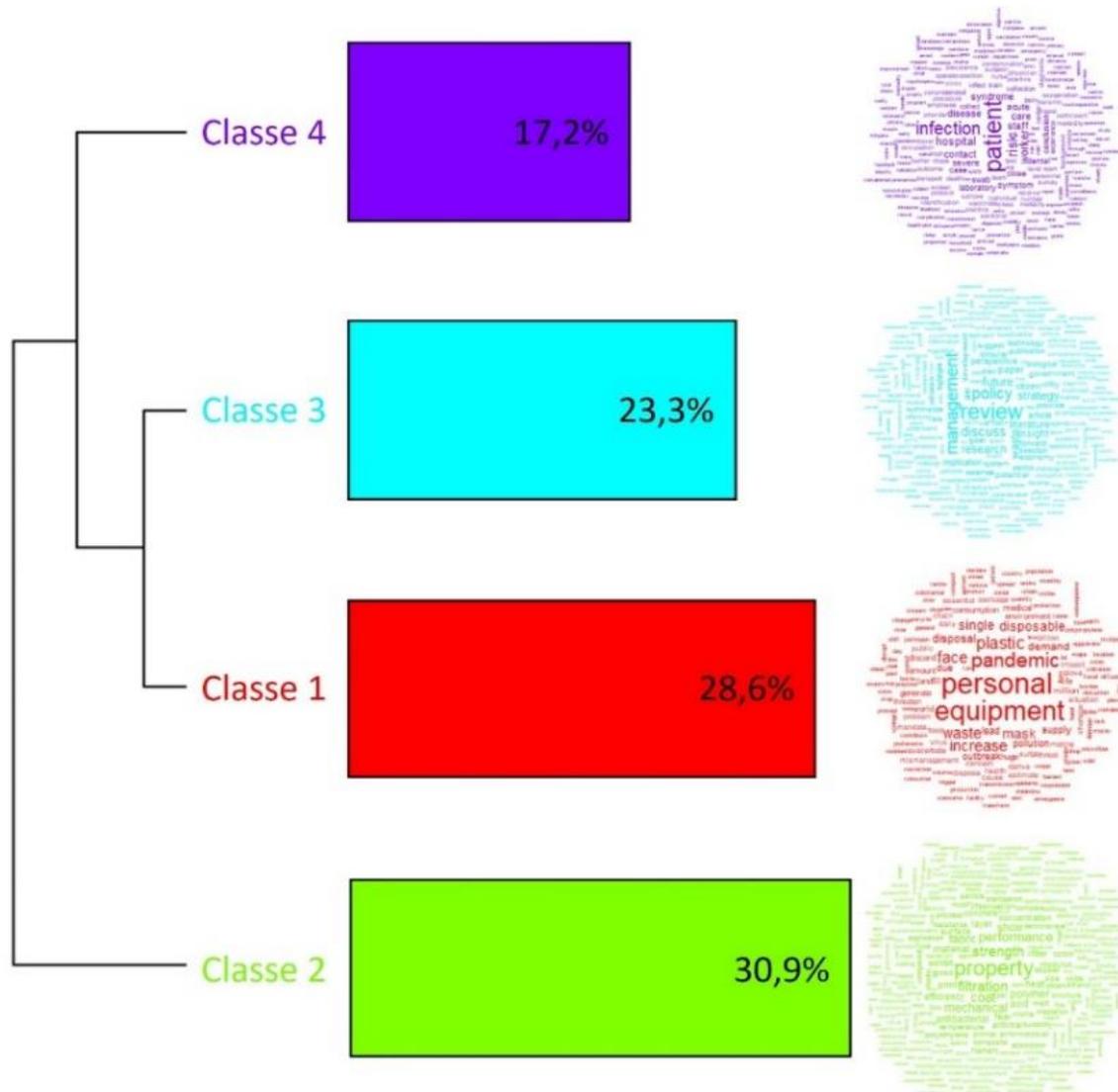
Fonte: elaboração própria

Os artigos obtidos na busca realizada foram então analisados, de forma a aplicar os critérios de exclusão (item 2.2.4). Com isso, chegou-se ao total de 322 artigos que atendem à TP1, 186 artigos atendem à TP2 e 155 artigos atendem à TP3.

Os resultados indicaram que os artigos foram classificados em 4 classes sendo que a classe 1 corresponde a 28,6% dos artigos, a classe 2 corresponde a 30,9% dos artigos, a classe 3 corresponde a 23,3% dos artigos e a classe 4 a 17,2% dos artigos.

Na Figura 5 foi identificada que da classe 2, com maior concentração dos artigos, se derivam todas as outras classes e, nesta classe 2, estão concentrados artigos que abordam temas relacionados à performance dos EPIs. A classe 4, derivada da classe 2, concentra artigos relacionados com controles de riscos de contaminação. A classe 1, derivada das classes 4 e 2, concentra artigos relacionados com aumento dos resíduos de EPIs. A classe 3, também derivada das classes 4 e 2, concentra artigos relacionados com gestão de resíduos poliméricos.

Figura 5: Classificação hierárquica descendente dos resumos dos artigos seleccionados.



Fonte: elaboração própria a partir do software Iramuteq.

Estes resultados mostram que os artigos selecionados na RBS abordam temas relacionados ao aumento de resíduos poliméricos na pandemia, principalmente de EPIs na forma de máscaras faciais, e revelam a importância do gerenciamento destes resíduos. As demais ocorrências apresentam decréscimo sutil sem chamar a atenção para nenhum outro grupo.

Em relação à RBS, a seguir são apresentados os resultados verificados nos artigos selecionados conforme as QP específicas.

2.3.1. QP1 – Qual é o cenário global de consumo de EPIs de base polimérica na pandemia Covid-19?

Dentre os EPIs de base polimérica, os de maior ocorrência nos trabalhos avaliados foram as máscaras N95 e PFF2 (similares), máscaras cirúrgicas (descartáveis) e luvas. Ao se avaliar os resultados dos trabalhos selecionados, há um consenso no consumo a nível global. Isso se deve ao fato de que o artigo “*Covid-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics*” de Prata *et al.* (2020) teve grande aceitação pelos pesquisadores, tendo sido citado em 467 artigos distintos, conforme base de dados WoS. Nesse artigo, publicado em 12 de junho de 2020, estimou-se um consumo mensal de 129 bilhões de máscaras e 65 bilhões de luvas após finalização do lockdown. Dey *et al.* (2023), publicaram em 18 de setembro de 2022 que, durante a pandemia Covid-19, estimou-se um consumo de 24,37 bilhões de máscaras/ano no Reino Unido e que, China e Japão, relataram ter utilizado 14,8 milhões de máscaras/dia.

Contudo, ao se verificar as projeções de consumos apontadas em uma mesma localidade e no período de 2020 a 2021, não houve um consenso das quantidades identificadas nos artigos estudados. A exemplo disso, apenas para máscaras, as projeções de consumo nos EUA apresentaram uma amplitude de cerca de 1,4 bilhões/mês, na Itália a amplitude foi de cerca de 216,7 milhões/mês e em Teerã a amplitude ficou em 30,4 milhões/mês (Tabela 4). Para a padronização dos dados foi considerado que cada mês possui, em média, 30,42 dias (365 dias dividido por 12 meses).

De qualquer maneira, mesmo considerando as menores projeções apontadas nos artigos descritos, o consumo é expressivo e demonstra um cenário de alta demanda de EPIs de base polimérica devido à pandemia Covid-19. Apesar disso, Liang *et al.* (2021) sugerem que a demanda mundial por EPIs continuará crescendo após a pandemia Covid-19, chegando a um aumento de 20% até 2025, comparando-se ao consumo antes da pandemia.

Tabela 4: Projeções de consumos de máscaras em uma mesma localidade no período de 2020 a 2021.

		Maior projeção (und./mês)	Menor projeção (und./mês)	Diferenças (und./mês)
EUA	Máscaras N95	1.520.833.333 ¹	125.000.000 ²	1.395.833.333
Itália	Máscaras em geral	1.216.666.667 ³	1.000.000.000 ⁴	216.666.667
Teerã		167.291.667 ⁵	136.875.000 ⁶	30.416.667

Fonte: elaboração própria. 1 – Adaptado de (Manero *et al.*, 2020); 2 – Adaptado de (Zhao, Zhe *et al.*, 2020); 3 – Adaptado de (Liang *et al.*, 2021); 4 – Prata *et al.* (2020); 5 – Adaptado de (Liang *et al.*, 2021); 6 – Adaptado de Zand e Heir (2021).

2.3.2. QP2 – Qual é o cenário global de geração de resíduos poliméricos de EPIs pós-consumo na pandemia Covid-19?

Mohamadi *et al.* (2023), citam em seu trabalho realizado na Ilha de Kish, Golfo Pérsico, uma grande variedade de EPIs encontrados no litoral da ilha. Nessa amostragem, os autores citam ter encontrado, em média, 0,0002 EPI/m² sendo 79,5% máscaras, 10,8% luvas e 9,7% outros materiais associados à pandemia.

Considerando o aumento no consumo de máscaras, e que a maioria dos EPIs usados durante a pandemia de Covid-19 foram do tipo descartável, é natural que a geração de resíduos poliméricos tenha sofrido impactos significativos. Iheanacho *et al.* (2023) citaram que o descarte de EPIs usados representa um desafio para a gestão de resíduos sólidos e Haque *et al.* (2021), publicaram em 07 de novembro de 2020, que na província de Hubei, China, houve um aumento de 600% na geração de resíduos e, em Wuhan, China, a capacidade operacional de incineração diária em 49 t/dia, foi ultrapassada rapidamente devido a geração de cerca de 240 t/dia de resíduos médicos perigosos.

Especificamente sobre resíduos de EPIs, Haque *et al.* (2021) relataram que em Bangladesh foram descartados, entre 26 de março e 25 de abril de 2020, 1.592 t de máscaras cirúrgicas (52,3 t/ dia) e 3.039 t de luvas (99,9 t/ dia). Hantoko *et al.* (2021), com dados de 21 de janeiro de 2021, projetaram a geração global de resíduos considerando o consumo de 1,6 máscaras cirúrgicas/dia/habitante de área urbana com peso de 3 g/unidade (Tabela 5). Dessa forma, Hantoko *et al.*, (2021) demonstraram que, em nível global, houve projeções de geração

de 21.098 t/dia de resíduos poliméricos provenientes apenas de máscaras cirúrgicas. Somente o continente asiático foi responsável pela geração de 53,6% desses resíduos, o que se deve à sua alta população, considerando que os autores (Hantoko *et al.*, 2021) utilizaram como base de cálculo o volume populacional de cada continente.

Dey *et al.* (2023) citaram, em 18 de setembro de 2022, que a geração de resíduos de polipropileno (PP) provenientes de EPIs usados foram de aproximadamente 2.500 t/semana na Índia, 600 t/semana nos EUA e 40 t/semana na Austrália. Os autores Shammi, Behal e Tareq (2021) citaram que o governo de Bangladesh forneceu 1,5 milhões de unidades de EPIs diversos para os profissionais da área da saúde, equivalente a 24.825 t de resíduos poliméricos. Segundo Liang *et al.* (2021), na Itália, aproximadamente 0,6% do Resíduo Sólido Urbano (RSU) eram compostos por máscaras e luvas usadas. Das projeções identificadas, não foram evidenciados cenários relacionados a outros EPIs, como protetores faciais, óculos de segurança, aventais e sapatos.

Tabela 5: Projeções de geração de resíduos de máscaras cirúrgicas por continente.

Continentes	População	População		Máscaras Utilizadas/ dia (und.)	Resíduos de Máscaras Gerados (t/ dia)	Contribuição (%)
		Urbana (%)	Rural (%)			
Ásia	4.628.322.315	50,9	49,1	3.769.305.693	11.308	53,6
América	1.024.400.636	84,0	16,0	1.373.926.606	4.122	19,5
África	1.358.208.732	43,8	56,2	951.832.679	2.855	13,5
Europa	747.882.582	74,5	25,5	891.476.038	2.674	12,7
Oceania	42.567.863	67,8	32,2	46.177.618	139	0,7
Global	7.801.382.128	56,4	43,6	7.032.718.634	21.098	-

Fonte: Adaptado de (Hantoko *et al.*, 2021).

Dessa maneira, considerando os dados apresentados por Hantoko *et al.* (2021), houve projeções de que, no mínimo, 244,2 kg de máscaras cirúrgicas, de base polimérica, foram descartadas a cada segundo no planeta (21.098.000 Kg divididos por 86.400 s em um dia) durante da pandemia Covid-19.

2.3.3. QP3 – Quais são os aspectos ambientais atrelados ao aumento da geração de resíduos poliméricos de EPIs pós-consumo durante a pandemia Covid-19?

O hábito do uso de EPIs para proteção contra a Covid-19 criou um novo conceito de poluição: a “poluição por EPI” (Haque *et al.*, 2021). No porto de Bushehr, Iran, foram detectadas 1.578 máscaras e 804 luvas em apenas 43,6 m². Em Toronto, Canadá, foram detectados 1.306 EPIs em apenas 245 m² (Akhbarizadeh *et al.*, 2021). No trabalho de De-la-Torre *et al.* (2021) é citado que em Lima, Peru, foram detectados 138 EPIs ao longo de 11 praias avaliadas em 12 semanas. Em outro trabalho, comparando os cenários entre Argentina e Peru, De-la-Torre *et al.* (2022) relataram ter detectado na Argentina, 43 EPIs em 15 pontos de amostragem, com máscaras faciais e luvas representando cada uma 48,8% dos descartes e apenas um protetor facial. Já no Peru, detectaram 462 EPIs em 36 pontos de amostragem, com máscaras faciais representando 94,5% do todo, protetores faciais 2,9%, e luvas representando 2,0% dos descartes.

Mergulhadores franceses detectaram luvas e máscaras nas águas costeiras da França e, na cidade de Hong Kong, foram detectadas máscaras nas areias das praias. Como 80 a 90% dos resíduos encontrados nas águas são provenientes de atividades terrestres, é inevitável que a falha no gerenciamento de resíduos faz com que EPIs pós-consumo cheguem ao mesmo destino (Haque *et al.*, 2021; Iheanacho *et al.*, 2023). De acordo com os autores Maal-bared *et al.* (2021), foram detectados altos níveis do coronavírus em águas de rios.

Outro aspecto ambiental do descarte inadequado de EPIs nas águas é a degradação em microplásticos (Benson *et al.*, 2021; De-la-Torre & Aragaw, 2021; Liang *et al.*, 2021). Akhbarizadeh *et al.* (2021) e Ray *et al.*, (2022) citam que os EPIs pós-consumo podem se transformar em microplásticos em menos de um ano. Os microplásticos são pedaços de polímeros com tamanho menor que 5 mm gerados pela fragmentação e degradação de materiais poliméricos produzidos pelas intempéries. Devido ao seu tamanho e ao fato de poderem adsorver poluentes e propagarem microrganismos, os microplásticos podem afetar a cadeia alimentar com potencial bioacumulação nos humanos. Dessa forma, o aumento da poluição por EPI potencializa o risco direto de contaminação do solo, águas superficiais, águas subterrâneas e alimentos (Akhbarizadeh *et al.*, 2021; Binda *et al.*, 2021; Iheanacho *et al.*, 2023; Patrício Silva *et al.*, 2020).

Considerando os riscos para a saúde pública, durante a pandemia Covid-9, a Agência Ambiental Portuguesa recomendou que os EPIs potencialmente contaminados, usados pelo cidadão comum, fossem selados e colocados no lixo não reciclável. Nos Estados Unidos, os

programas de reciclagem foram reduzidos. Dessa forma, os processos de incineração e de aterro foram priorizados em detrimento da reciclagem (Patrício Silva *et al.*, 2021).

Somado ao cenário de redução das reciclagens, em muitos locais os resíduos domésticos ainda foram destinados para lixões contribuindo para a poluição ambiental, intensificada pelo aumento da geração de resíduos poliméricos devido ao aumento do consumo de EPIs. Os autores Arduso *et al.* (2021) citaram que, mesmo havendo significativas melhorias nos cenários de destinação de resíduos domésticos, alguns países da América Sul não possuíam sistemas de destinação sustentáveis ao se considerar a deficiência da destinação em 2019 (Tabela 6), demonstrando que em alguns países como Venezuela e Peru destinava-se mais de 40% dos resíduos para lixões.

No trabalho de Mejjad *et al.* (2021) os autores estudaram a incineração de máscaras pós-consumo em Marrocos. Nesse estudo, os autores identificaram que a incineração de cerca de 8,108 bilhões de máscaras possuem o potencial de geração de 64,23 GWh de energia elétrica. Contudo, conforme Zand e Heir (2021) a incineração desses resíduos foi prejudicada pelo aumento dos custos quanto às adaptações nos processos de logística reversa e sistemas de queima e filtragem.

Tabela 6: Destinação de resíduos domésticos em países da América do Sul.

País	Lixão	Aterro Sanitário	Aterro Controlado	Outros
Venezuela	45,6%	12,9%	40,9%	0,5%
Peru	45,3%	43,5%	10,6%	0,6%
Argentina	24,6%	64,7%	9,9%	0,8%
Brasil	24,5%	59,9%	20,2%	0,3%
Paraguai	23,4%	36,4%	40,2%	0,0%
Equador	20,5%	30,2%	46,3%	2,9%
Uruguai	18,1%	3,8%	68,2%	9,8%
Colômbia	12,5%	81,8%	4,1%	1,5%
Bolívia	10,6%	44,7%	16,4%	28,2%
Chile	4,0%	81,1%	13,8%	0,7%

Fonte: Adaptado de Arduso *et al.* (2021).

2.3.4. Conclusões

Verificou-se um aumento significativo no consumo de EPIs durante a pandemia COVID-19, mesmo considerando as divergências entre as projeções de consumo (por exemplo, a diferença de 1.216,7% entre o maior e o menor consumo projetado de respiradores N95 nos EUA (Tabela 4)). Conseqüentemente, a geração de resíduos também aumentou substancialmente. Conforme descrito no item 2.3.2, estimou-se que houve a geração de 21.098 t/dia de resíduos de máscaras cirúrgicas durante a pandemia. Assim, dentre os possíveis aspectos ambientais atrelados ao aumento do consumo de EPI na pandemia, conforme item 2.3.3, estão a poluição ambiental, o aumento de microplásticos na água, a contaminação da água e de alimentos, a redução ou eliminação da reciclagem, conseqüentemente, aumentando o consumo de polímeros virgens.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da limitação da pesquisa, em concentrar os estudos em apenas um local, devido à pulverização de trabalhos em locais diversos, a realização da RBS trouxe resultados importantes. Este trabalho revelou que, durante a pandemia, houve uma demanda de bilhões de máscaras e luvas a nível global, com a geração de cerca de 244,2 Kg de resíduos poliméricos/segundo, apenas de máscaras cirúrgicas, equivalente a 81.400 máscaras cirúrgicas sendo descartadas por segundo, considerando o peso unitário de 3 g.

Verificou-se ainda que a opção mais viável para os resíduos poliméricos, devido às necessidades sanitárias, foi a destinação para aterros sanitários em detrimento da reciclagem. Foram mapeados os principais aspectos ambientais atrelados ao aumento de consumo de EPIs de base polimérica durante a pandemia Covid-19, destacando-se poluição ambiental, aumento dos microplásticos nas águas, contaminação de águas, contaminação de alimentos e redução, ou até mesmo eliminação, de reciclagem em países como Portugal e EUA, conseqüentemente gerando aumento no consumo de polímeros virgens. Isto revela que o aumento na geração de resíduos de EPIs pós-consumo, impulsionado pela pandemia Covid-19, gera e ainda irá gerar por muitos anos desafios ambientais significativos para a população global.

A conscientização para o descarte correto dos EPIs pós-consumo, conforme orientações específicas dos órgãos responsáveis, de forma a não contaminar/poluir locais públicos, e o uso eficaz dos EPIs, de forma a não consumir mais do que o necessário, são medidas fundamentais para a redução dos impactos ambientais atrelados aos aspectos ambientais do aumento de

consumo de materiais. Portanto, estudos futuros devem focar na redução de impactos ambientais atrelados à manufatura e ao consumo de EPIs de base polimérica como, por exemplo, o estudo realizado no capítulo 3 desta dissertação.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adyel, T. M. (2020). Accumulation of plastic waste during COVID-19. *Science*, 369(6509), 1314–1315. <https://doi.org/10.1126/science.abd9925>

Akharizadeh, R., Dobaradaran, S., Nabipour, I., Tangestani, M., Abedi, D., Javanfekr, F., Jeddi, F., & Zendehtoodi, A. (2021). Abandoned Covid-19 personal protective equipment along the Bushehr shores, the Persian Gulf: An emerging source of secondary microplastics in coastlines. *Marine Pollution Bulletin*, 168(February), 112386. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112386>

Ammendolia, J., Saturno, J., Brooks, A. L., Jacobs, S., & Jambeck, J. R. (2021). An emerging source of plastic pollution: Environmental presence of plastic personal protective equipment (PPE) debris related to COVID-19 in a metropolitan city. *Environmental Pollution*, 269, 116160. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116160>

ANIMASEG. (2023). Indicadores do Mercado Brasileiro de Equipamentos de Proteção Individual 2022. 72. <https://animaseg.com.br/pdf/indicadores-epi-2022.pdf>

Ankit, Kumar, A., Jain, V., Deovanshi, A., Lepcha, A., Das, C., Bauddh, K., & Srivastava, S. (2021). Environmental impact of COVID-19 pandemic: more negatives than positives. *Environmental Sustainability*, 4(3), 447–454. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00159-9>

Ardusso, M., Forero-López, A. D., Buzzi, N. S., Spetter, C. V., & Fernández-Severini, M. D. (2021). COVID-19 pandemic repercussions on plastic and antiviral polymeric textile causing pollution on beaches and coasts of South America. *Science of the Total Environment*, 763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144365>

Benson, N. U., Basse, D. E., & Palanisami, T. (2021). COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon*, 7(2), e06343. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06343>

Binda, G., Bellasi, A., Spanu, D., Pozzi, A., Cavallo, D., & Bettinetti, R. (2021). Evaluating the environmental impacts of personal protective equipment use by the general population during the COVID-19 pandemic: A case study of lombardy (northern Italy). *Environments - MDPI*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS8040033>

Cabrejos-Cardena, U., De-la-Torre, G. E., Dobaradaran, S., & Rangabhashiyam, S. (2023). An ecotoxicological perspective of microplastics released by face masks. *Journal of Hazardous Materials*, 443(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130273>

de Oliveira, R. P., Lohmann, G., & Oliveira, A. V. M. (2022). A systematic review of the literature on air transport networks (1973-2021). *Journal of Air Transport Management*, 103(September 2021), 102248. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102248>

De-la-Torre, G. E., & Aragaw, T. A. (2021). What we need to know about PPE associated with the COVID-19 pandemic in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 163(October 2020), 111879. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111879>

De-la-Torre, G. E., Dioses-Salinas, D. C., Pizarro-Ortega, C. I., Fernández Severini, M. D., Forero López, A. D., Mansilla, R., Ayala, F., Castillo, L. M. J., Castillo-Paico, E., Torres, D. A., Mendoza-Castilla, L. M., Meza-Chuquizuta, C., Vizcarra, J. K., Mejía, M., De La Gala, J. J. V., Ninaja, E. A. S., Calisaya, D. L. S., Flores-Miranda, W. E., Rosillo, J. L. E., ... Santillán, L. (2022). Binational survey of personal protective equipment (PPE) pollution driven by the COVID-19 pandemic in coastal environments: Abundance, distribution, and analytical characterization. *Journal of Hazardous Materials*, 426, 128070. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128070>

De-la-Torre, G. E., Rakib, M. R. J., Pizarro-Ortega, C. I., & Dioses-Salinas, D. C. (2021). Occurrence of personal protective equipment (PPE) associated with the COVID-19 pandemic along the coast of Lima, Peru. *Science of the Total Environment*, 774, 145774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145774>

Dey, S., Anand, U., Kumar, V., Kumar, S., Ghorai, M., Ghosh, A., Kant, N., Suresh, S., Bhattacharya, S., Bontempi, E., Bhat, S. A., & Dey, A. (2023). Microbial strategies for degradation of microplastics generated from COVID-19 healthcare waste. *Environmental Research*, 216, 114438. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114438>

Hantoko, D., Li, X., Pariatamby, A., Yoshikawa, K., Horttanainen, M., & Yan, M. (2021). Challenges and practices on waste management and disposal during COVID-19 pandemic. *Journal of Environmental Management*, 286(February), 112140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112140>

Haque, M. S., Uddin, S., Sayem, S. M., & Mohib, K. M. (2021). Coronavirus disease 2019 (COVID-19) induced waste scenario: A short overview. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104660. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104660>

Iheanacho, S., Ogbu, M., Ekpenyong, J., Tabi, E., Iheanacho, A., Bhuyan, M. S., & Ogunji, J. (2023). COVID-19 Waste as Source of Microplastics in the Environment: Implication for Aquatic Species, Human, and Remediation Measures - A Review. *Pollution*, 9(2), 591–614. <https://doi.org/10.22059/POLL.2022.347858.1601>

Klemeš, J. J., Fan, Y. Van, Tan, R. R., & Jiang, P. (2020). Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127(April), 109883. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109883>

Liang, Y., Song, Q., Wu, N., Li, J., Zhong, Y., & Zeng, W. (2021). Repercussions of COVID-19 pandemic on solid waste generation and management strategies. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 15(6). <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1407-5>

Maal-Bared, R., Brisolará, K., Munakata, N., Bibby, K., Gerba, C., Sobsey, M., Schaefer, S., Swift, J., Gary, L., Sherchan, S., Babatola, A., Bastian, R., Olabode, L., Reimers, R., & Rubin, A. (2021). Implications of SARS-CoV-2 on current and future operation and management of wastewater systems. *Water Environment Research*, 93(4), 502–515. <https://doi.org/10.1002/wer.1446>

Manero, A., Smith, P., Koontz, A., Dombrowski, M., Sparkman, J., Courbin, D., & Chi, A. (2020). Leveraging 3D printing capacity in times of crisis: Recommendations for COVID-19 distributed manufacturing for medical equipment rapid response. *International Journal of*

Environmental Research and Public Health, 17(13), 1–17.

<https://doi.org/10.3390/ijerph17134634>

Mejjad, N., Cherif, E. K., Rodero, A., Krawczyk, D. A., Kharraz, J. El, Moumen, A., Laqbaqbi, M., & Fekri, A. (2021). Disposal behavior of used masks during the covid-19 pandemic in the moroccan community: Potential environmental impact. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph18084382>

Mohamadi, S., Madadi, R., Rakib, M. R. J., De-la-Torre, G. E., & Idris, A. M. (2023). Abundance and characterization of personal protective equipment (PPE) polluting Kish Island, Persian Gulf. *Science of The Total Environment*, 854, 158678.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158678>

Ministérios da Saúde. (2024). Covid-19 no Brasil. Ministério da saúde Website.

https://infoms.saude.gov.br/extensions/covid-19_html/covid-19_html.html

Patrício Silva, A. L., Prata, J. C., Walker, T. R., Campos, D., Duarte, A. C., Soares, A. M. V. M., Barcelò, D., & Rocha-Santos, T. (2020). Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of the Total Environment*, 742, 140565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140565>

Patrício Silva, A. L., Prata, J. C., Walker, T. R., Duarte, A. C., Ouyang, W., Barcelò, D., & Rocha-Santos, T. (2021). Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. *Chemical Engineering Journal*, 405(August 2020), 126683.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126683>

Prata, J. C., Silva, A. L. P., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020a). COVID-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics. *Environmental Science and Technology*, 54(13), 7760–7765. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02178>

Prata, J. C., Silva, A. L. P., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020b). COVID-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics. *Environmental Science & Technology*, 54(13), 7760–7765. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02178>

Ray, S. S., Lee, H. K., Huyen, D. T. T., Chen, S. S., & Kwon, Y. N. (2022). Microplastics waste in environment: A perspective on recycling issues from PPE kits and face masks during the COVID-19 pandemic. *Environmental Technology and Innovation*, 26, 102290.

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102290>

Rodríguez, N. B., Formentini, G., Favi, C., & Marconi, M. (2021). Environmental implication of personal protection equipment in the pandemic era: LCA comparison of face masks typologies. *Procedia CIRP*, 98, 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.108>

Rume, T., & Islam, S. M. D. U. (2020). Environmental effects of COVID-19 pandemic and potential strategies of sustainability. *Heliyon*, 6(9), e04965.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04965>

Shammi, M., Behal, A., & Tareq, S. M. (2021). The Escalating Biomedical Waste Management to Control the Environmental Transmission of COVID-19 Pandemic: A

Perspective from Two South Asian Countries. *Environmental Science and Technology*, 55(7), 4087–4093. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05117>

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

Vanapalli, K. R., Sharma, H. B., Ranjan, V. P., Samal, B., Bhattacharya, J., Dubey, B. K., & Goel, S. (2021). Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 750, 141514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141514>

WHO. (2024). WHO Coronavirus WHO Coronavirus. Who Website. <https://covid19.who.int/>

Yudell, M., Roberts, D., DeSalle, R., & Tishkoff, S. (2020). NIH must confront the use of race in science. *Science*, 369(6509), 1314–1315. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABD9925>

Zand, A. D., & Heir, A. V. (2021). Environmental impacts of new Coronavirus outbreak in Iran with an emphasis on waste management sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(1), 240–247. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01123-1>

Zhao, H., Liu, H. Q., Wei, G., Wang, H., Zhu, Y., Zhang, R., & Yang, Y. (2021). Comparative life cycle assessment of emergency disposal scenarios for medical waste during the COVID-19 pandemic in China. *Waste Management*, 126, 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.034>

Zhao, Z., Zhang, Z., Lanzarini-Lopes, M., Sinha, S., Rho, H., Herckes, P., & Westerhoff, P. (2020). Germicidal Ultraviolet Light Does Not Damage or Impede Performance of N95 Masks upon Multiple Uses. *Environmental Science and Technology Letters*, 7(8), 600–605. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00416>

3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE RESPIRADORES PFF2 SEM VÁLVULA PRODUZIDOS COM MISTURA DE POLIPROPILENO VIRGEM E RECICLADO

Este capítulo apresenta propostas para a redução dos impactos ambientais atrelados ao consumo de respiradores PFF2 sem válvulas. Assim, são propostas possibilidades de redução dos impactos ambientais atrelados ao respirador PFF2 sem válvula, extensamente consumido e descartado erroneamente durante a pandemia Covid-19. Com isso, há a intenção de se reduzir os impactos ambientais de possíveis novos aumentos no consumo destes produtos.

Resumo: Os impactos ambientais estão ligados aos padrões de produção e consumo. Assim, a pandemia da Covid-19 deixou clara a interdependência entre sociedade, produção, padrões de consumo e meio ambiente. Uma das principais características da pandemia é o uso de máscaras faciais para impedir a propagação da doença. Assim, a mitigação dos impactos ambientais dos produtos que são consumidos gera interesse em métodos que quantifiquem esses impactos. Com isso, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) subsidia i) identificação de melhorias do desempenho ambiental de produtos; ii) informação para tomadores de decisão; iii) categorias de desempenho ambiental; iv) *marketing*. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo a realização de um ACV focado nos respiradores PFF2 sem válvula, objetivando oportunidades para a redução dos impactos ambientais do aumento do consumo de EPIs como os observados durante a pandemia Covid-19. Na ACV, conforme protocolos padrão do OpenLCA, base de dados AGRIBALYSE_V301, base dados ECOINVENT v3.7.1 e metodologia de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H), foram considerados cinco cenários com proporções diferentes de polipropileno de reciclagem secundária para a manufatura do respirador PFF2 sem válvula. Dentre as 18 opções de categorias de impacto, são apresentadas em maiores detalhes as categorias de impacto aquecimento global e consumo de água. Os resultados preliminares sugerem que ao se utilizar 10% de polipropileno reciclado poderá ocorrer o menor impacto ambiental quanto a emissões de gases de efeito estufa (GEE) e menor consumo de água para geração de energia elétrica. Adicionalmente, sugere-se futuros estudos de ACV com uso de polipropileno nacional, águas pluviais, energia eólica ou solar e alumínio reciclado.

Palavras-chave: ACV. Impacto ambiental. PFF. Polímero. Polipropileno.

Abstract: Environmental impacts are linked to production and consumption patterns. Thus, the Covid-19 pandemic made clear the interdependence between society, production, consumption patterns and the environment. One of the main features of the pandemic is the use of face masks to prevent the spread of the disease. Thus, mitigating the environmental impacts of products that are consumed generates interest in methods that quantify these impacts. With this, the Life Cycle Assessment (LCA) supports i) identification of improvements in the environmental performance of products; ii) information for decision makers; iii) environmental performance categories; iv) marketing. Therefore, this work aimed to carry out an LCA focused on valveless FFP2 respirators, aiming at opportunities to reduce the environmental impacts of the increased consumption of PPE as those observed during the Covid-19 pandemic. In the LCA, according to OpenLCA standard protocols, AGRIBALYSE_V301 database, ECOINVENT v3.7.1 database and ReCiPe 2016 Midpoint (H) calculation methodology, five scenarios were considered with different proportions of secondary recycling polypropylene for the manufacture of the FFP2 respirator without valve. Among the 18 impact category options, the global warming and water consumption impact categories are presented in greater detail. Preliminary results suggest that when using 10% recycled polypropylene there might be a lower environmental impact in terms of greenhouse gases (GHG) emissions and lower water consumption for generating electricity. Additionally, future LCA studies are suggested using national polypropylene, rainwater, wind or solar energy and recycled aluminum.

Keywords: LCA. Environmental impact. FFP. Polymer. Polypropylene.

3.1. INTRODUÇÃO

Os polímeros são materiais tão fundamentais quanto o aço, a madeira e o cimento e, devido ao seu uso em larga escala, a preocupação com sua destinação pós consumo se torna cada vez mais relevante (Chen *et al.*, 2019). Segundo Landim *et al.* (2016), a maioria dos polímeros utilizados no nosso cotidiano têm origem sintética, sendo produzidos através de monômeros obtidos a partir da nafta extraída pelo refino do petróleo. Portanto, a redução do consumo de polímeros virgens se torna um grande passo em direção à sustentabilidade.

Nesse contexto, a atual pandemia da Covid-19 deixou clara a interdependência entre sociedade, produção, padrões de consumo e meio ambiente (Sanyé-Mengual & Sala, 2022). Uma das principais características da pandemia foi o uso de máscaras faciais para impedir a

propagação da doença. Snigdha *et al.* (2023) afirmaram que nas atividades dos profissionais da saúde, as máscaras e luvas foram os EPIs mais utilizados.

As características principais das máscaras mais usadas durante a pandemia Covid-19 estão descritas na Figura 6, e observa-se que as máscaras mais eficientes no combate à pandemia (respirador PFF e máscara cirúrgica) possuem como insumo principal o polipropileno, um polímero sintético. De-la-Torre *et al.* (2022) afirmaram que, durante análises por microscopia eletrônica por varredura (MEV), foram identificados diversos tipos de polímeros, principalmente polipropileno, poliamida, tereftalato de polietileno e poliéster em amostras de EPIs usados, encontradas no meio ambiente.

Figura 6: Características principais das máscaras mais utilizadas na pandemia Covid-19.

	Máscara Cirúrgica	Máscara Lavável	Respirador PFF
			
Principal Insumo	Polipropileno	Algodão	Polipropileno
Insumos secundários	Algodão, Alumínio e Borracha Sintética	Algodão e Borracha Sintética	Alumínio e Borracha Sintética

Fonte: Adaptado de Allison *et al.*, 2021; Notten *et al.*, 2022; Rodríguez, Formentini, Favi, & Marconi, 2021b, 2021a.

De acordo com Notten *et al.*, (2022), os problemas ambientais associados ao aumento do consumo e geração de resíduos das máscaras são, cada vez mais, destacados em trabalhos acadêmicos. Neste cenário, a reciclagem de polímeros utilizados para confecção de EPIs é uma alternativa interessante para reduzir os impactos ambientais causados pelo aumento do consumo e descarte de polímeros durante a pandemia.

Conforme Landim *et al.* (2016), há diferentes tipos de reciclagem de polímeros, i) primária: o material do processo produtivo é reaproveitado pela própria empresa geradora do resíduo que é proveniente de ajustes de máquinas, reprova de peças etc.; ii) secundária: os materiais a serem reciclados, em geral coletados por cooperativas de reciclagem, passam por triagem e por processos de transformação e regranulação; iii) terciária: o polímero sofre uma reação química que gera um novo produto petroquímico e de fonte reciclada; iv) quaternária: o polímero é queimado gerando aproveitamento da energia proveniente da queima, tanto em forma de energia térmica como de energia elétrica.

O uso da ACV pode fornecer meios para comparação, avaliação e destaque de pontos críticos dentre as opções de reciclagem (Horodytska *et al.*, 2020; Khoo, 2019). Tabatabaei *et al.* (2021) citam que as avaliações de impactos ambientais através da ACV, da produção inicial até o fim de vida útil, tornam-se um requisito ambiental crítico. Tendo visto a relevância da ACV para a avaliação de impactos ambientais potenciais, é compreensível que Chen *et al.*, 2019 e Horodytska *et al.*, 2020, tenham citado diversos exemplos de ACV focados em polímeros, tais como: processos de reciclagem, compatibilidade entre o polímero virgem e o reciclado, reciclagem de filmes poliméricos pós-consumo doméstico, reciclagem de filmes poliméricos industriais descartados e estudos sobre o uso de mistura de polímeros provenientes de resíduos eletroeletrônicos. No estudo de X. Zhao *et al.* (2022), após realização de ACV de reciclagem de EPIs usados, os autores sugeriram a construção de estações de tratamento especializadas na reciclagem energética de EPIs usados.

O Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) define a ACV como uma técnica quantitativa que mensura os possíveis impactos ambientais da fabricação e utilização de um produto ou serviço. Sua abordagem considera a extração das matérias-primas, a produção, distribuição, consumo, disposição final e reciclagem/reuso. Seus resultados numéricos possibilitam comparações entre produtos semelhantes, contribuindo com a promoção de melhorias nos processos produtivos (ACV.IBICT, 2023). Conforme os autores Patrício Silva *et al.* (2021) e Zhao *et al.* (2021), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método eficiente para avaliar os impactos ambientais dos processos, atividades ou produtos durante todo seu ciclo de vida, fornecendo a melhor estrutura para a avaliação de impactos como emissão de gases de efeito estufa (GEE), emissão de produtos químicos perigosos e consumo de energia. Conforme a ABNT (2014), a ACV pode subsidiar i) a identificação de melhorias do desempenho ambiental de produtos; ii) a informação para tomadores de decisão visando, por exemplo, planejamento estratégico, prioridades em projetos ou reprojeto de produtos e processos; iii) categorias de desempenho ambiental; iv) *marketing*.

Contudo, as incertezas geradas nas comparações de ACV prejudicam a confiabilidade dos dados para avaliação final. Tais incertezas, podem ser classificadas de acordo com: i) os parâmetros: relacionadas com erro de medição, variabilidade ou escassez de dados; ii) o cenário: escolhas na definição e construção dos cenários; iii) o modelo: modelos matemáticos para expressar a realidade, como fatores de emissão. Assim, a sistemática de análise de sensibilidade, ou seja, uma avaliação dos efeitos de escolha de métodos e dados nos resultados da ACV, são fundamentais para a conclusão final da ACV (Bueno, 2014; Cherubini, 2015; Silva, 2012).

Com isso, este trabalho teve como objetivo a realização de uma ACV simulando cinco cenários diferentes de mistura de polipropileno virgem com polipropileno reciclado originário de reciclagem secundária para a produção de respiradores PFF2 sem válvula, visando quantificar a redução, ou não, dos impactos ambientais gerados pela produção de respiradores PFF2. Conforme a ANVISA (2023), na base de legislações da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) não há legislações que proíbam o uso de material reciclado na produção de respiradores PFF, apenas legislações de especificações técnicas. Desta forma, este trabalho também teve como objetivo fornecer embasamento científico para as partes interessadas na manufatura de respiradores e processos similares.

3.2. METODOLOGIA

Para a realização da ACV, a partir de dados secundários, utilizou-se o *software* OpenLCA, base de dados AGRIBALYSE_V301 e ECOINVENT v3.7.1, metodologia de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H) e, como unidade funcional, a produção de 1.000 respiradores do tipo PFF2 sem válvula e sem embalagens.

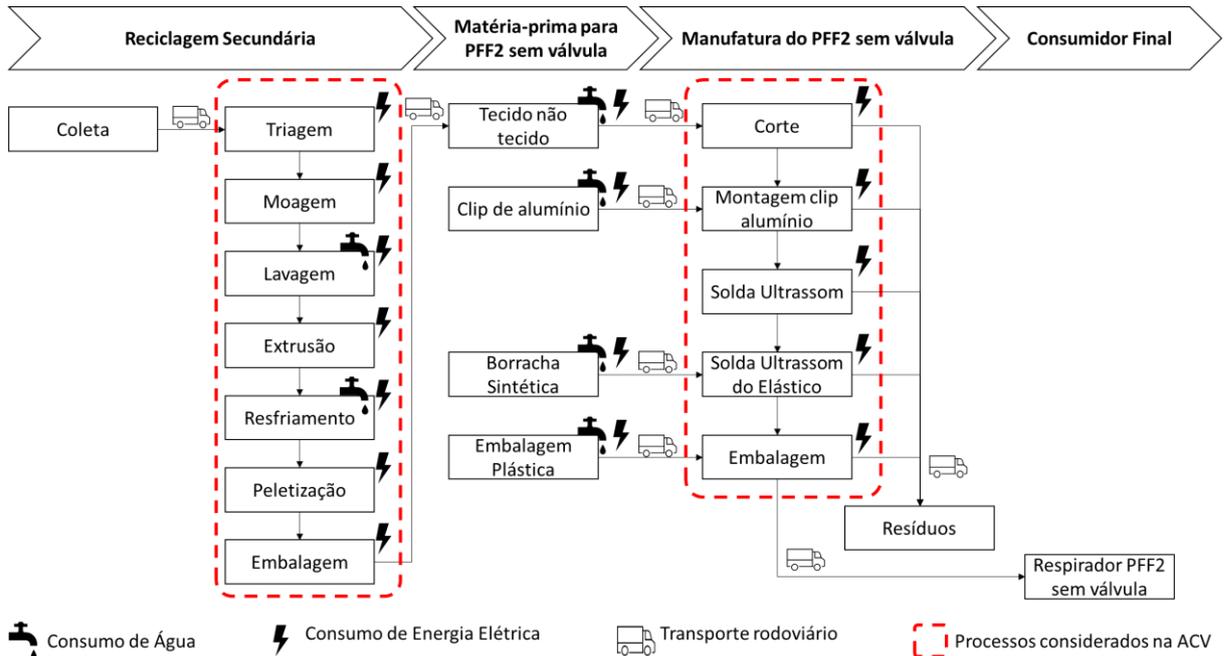
3.2.1. Objetivo e escopo da ACV

O estudo de ACV realizado neste trabalho considerou 5 cenários de mistura de polipropileno (PP) virgem com polipropileno de reciclagem secundária para a produção de respiradores PFF2, sendo: a) 100% polipropileno virgem; b) 90% polipropileno virgem e 10% de polipropileno reciclado; c) 80% polipropileno virgem e 20% de polipropileno reciclado; d) 70% polipropileno virgem e 30% de polipropileno reciclado; e) 60% polipropileno virgem e 40% de polipropileno reciclado; f) 50% polipropileno virgem e 50% de polipropileno reciclado.

3.2.2. Limites do estudo

Neste estudo de ACV foi considerada a abordagem *cradle to gate* como limite do estudo. Como a única modificação sugerida é no consumo de PP virgem, ou seja, sem sugestões de modificações nas demais matérias-primas, nos processos de transporte de matérias-primas, transporte de produto acabado, nas formas ou tipos de embalagens, estas etapas do ciclo de vida do respirador PFF2 sem válvula não foram considerados. A Figura 7 representa o fluxo do processo e limites de estudo considerados na ACV.

Figura 7: Fluxo do processo e limites do estudo.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.3. Unidade funcional

A unidade funcional utilizada foi a produção de mil respiradores do tipo PFF2 sem válvula.

3.2.4. Inventário

As quantidades e materiais utilizados nos respiradores PFF2 sem válvula foram compilados com base em dados secundários, e estão apresentados na Tabela 7. Considerando que o processo de reciclagem secundária gera um incremento no consumo de água e energia, acrescentou-se esses consumos, conforme quantidades de PP reciclado para cada cenário. Para todos os demais consumos, foram consideradas as informações constantes das bases de dados AGRIBALYSE_V301 e ECOINVENT v3.7.1.

Tabela 7: Materiais utilizados no respirador PFF2 sem válvula em cada cenário.

Insumos para uma unidade de respirador	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D	Cenário E	Cenário F
PP virgem (g)	5,00 ¹	4,50	4,00	3,50	3,00	2,50
PP reciclado (g)	-	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
Energia (KWh/ Kg)	-	0,000245 ²	0,00049 ²	0,000735 ²	0,00098 ²	0,001225 ²
Água (L/ Kg)	-	0,0002 ²	0,0004 ²	0,0006 ²	0,0008 ²	0,001 ²
Borracha (g)	3,00 ¹	3,00 ¹	3,00 ¹	3,00 ¹	3,00 ¹	3,00 ¹
Alumínio (g)	0,95 ¹	0,95 ¹	0,95 ¹	0,95 ¹	0,95 ¹	0,95 ¹

Fonte: Elaboração própria. 1 – Adaptado de (Boix Rodríguez *et al.*, 2021; Rodríguez *et al.*, 2021b, 2021a); 2 – Adaptado de (Silva & Moita Neto, 2016).

3.2.5. Categorias de Impacto

A metodologia de cálculo utilizada, ReCiPe 2016 Midpoint, gerou resultados para 18 categorias de impacto sendo: i) acidificação terrestre; ii) aquecimento global; iii) consumo de água; iv) destruição do ozônio estratosférico; v) ecotoxicidade de água doce; vi) ecotoxicidade marinha; vii) ecotoxicidade terrestre; viii) escassez de recursos fósseis; ix) escassez de recursos minerais; x) eutrofização de água doce; xi) eutrofização marinha; xii) formação de ozônio, ecossistemas terrestres; xiii) formação de ozônio, saúde humana; xiv) formação de partículas finas; xv) radiação ionizante; xvi) toxicidade cancerígena humana; xvii) toxicidade humana não cancerígena; xviii) uso da terra.

Contudo, para este trabalho, foram detalhadas as categorias de aquecimento global e consumo de água, devido estas serem as categorias de impacto que apresentaram consideráveis acréscimos em pelo menos um dos fluxos que compõem o resultado da categoria de impacto.

3.2.6. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada utilizando dados pré-existentes nas bases AGRIBALYSE_V301 e ECOINVENT v3.7.1, alterando a fonte de energia elétrica, consumida pelo processo de reciclagem do PP, de hidrelétrica de alta tensão ofertada no mercado brasileiro para energia eólica de alta tensão ofertada no mercado global. A escolha da alteração na energia

se deu por ser o parâmetro de maior similaridade entre os demais parâmetros dos cenários avaliados.

3.2.7. Cálculo de redução dos impactos

Considerando as projeções de consumo de respiradores durante a pandemia Covid-19 e os resultados obtidos com a ACV, foi simulada a redução nos impactos ambientais através da implementação do uso de polipropileno reciclado na produção de respiradores PFF2 sem válvula. Para o cálculo considerou-se a seguinte fórmula: $\text{Redução} = [\text{Projeção de consumo (und.)} \times (\text{Emissões do cenário escolhido}/1000)] - [\text{Projeção de consumo (und.)} \times (\text{Emissões do Cenário A}/1000)]$.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Interpretações da ACV

Na Tabela 8 está apresentado um resumo das reduções dos impactos ambientais para os cenários propostos. Em todas as categorias de impacto houve reduções entre os cenários, ou seja, para cada categoria de impacto. No cenário F houve redução em relação ao cenário E, houve também redução em todas as categorias de impacto do cenário D para o cenário E, e assim sucessivamente.

Essas reduções dos impactos são facilmente compreendidas devido ao aumento do uso de material reciclado (de 10% no cenário B, para 50% no cenário F), reduzindo as necessidades de extração, refino e transportes do petróleo e seus derivados. Esta afirmação corrobora com o trabalho de Harding *et al.*, (2007), no qual os autores afirmaram que a diminuição dos impactos atrelados à produção de PP se deve à redução da necessidade de petróleo bruto, tanto para a produção de energia quanto para a produção da unidade de monômero de propileno.

Analisando apenas os resultados gerais das categorias de impacto poder-se-ia indicar o cenário F como a melhor opção para a redução de impactos ambientais no processo produtivo. Contudo, como citado por de Horodytska *et al.*, (2020), o aumento da proporção de uso de polímero reciclado está intrinsicamente relacionado com a aplicação final do produto. Os autores citaram como exemplo a produção de sacos plásticos para lixo, que podem conter 100% de material reciclado. No entanto, conforme a necessidade de maior resistência ou impermeabilidade, deve-se avaliar tecnicamente a proporção de polímero reciclado. Ou seja, a

proporção de utilização de polímero reciclado é maior conforme os requisitos de aplicação final são menores. Dessa maneira, buscou-se avaliar dentre os 5 cenários, se nas opções com menor proporção de material reciclado, haveria subsídios para escolha destes.

Tabela 8: Redução das categorias de impactos para cada cenário proposto.

Categoria de Impacto	Unidade	B	C	D	E	F
Escassez de recursos fósseis	Kg oil eq	-5,7%	-11,3%	-17,0%	-22,6%	-28,3%
Aquecimento global	Kg CO ₂ eq	-4,7%	-9,3%	-14,0%	-18,6%	-23,3%
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	Kg NO _x eq	-4,4%	-8,8%	-13,1%	-17,5%	-21,9%
Formação de ozônio, saúde humana	Kg NO _x eq	-4,3%	-8,7%	-13,0%	-17,3%	-21,7%
Acidificação terrestre	Kg SO ₂ eq	-3,6%	-7,2%	-10,8%	-14,4%	-18,0%
Formação de partículas finas	Kg PM2.5 eq	-2,88%	-5,8%	-8,6%	-11,5%	-14,4%
Toxicidade cancerígena humana	Kg 1,4-DCB	-2,2%	-4,3%	-6,5%	-8,7%	-10,8%
Ecotoxicidade terrestre	Kg 1,4-DCB	-1,7%	-3,4%	-5,1%	-6,8%	-8,5%
Eutrofização marinha	Kg N eq	-1,2%	-2,4%	-3,6%	-4,8%	-6,0%
Eutrofização de água doce	Kg P eq	-0,8%	-1,7%	-2,5%	-3,3%	-4,2%
Uso da terra	m ² a crop eq	-0,6%	-1,3%	-1,9%	-2,6%	-3,2%
Toxicidade não cancerígena humana	Kg 1,4-DCB	-0,6%	-1,3%	-1,9%	-2,5%	-3,2%
Ecotoxicidade marinha	Kg 1,4-DCB	-0,5%	-1,0%	-1,4%	-1,9%	-2,4%
Ecotoxicidade de água doce	Kg 1,4-DCB	-0,4%	-0,9%	-1,3%	-1,7%	-2,1%
Escassez de recursos minerais	Kg Cu eq	-0,3%	-0,7%	-1,0%	-1,3%	-1,6%
Destruição do ozônio estratosférico	Kg CFC11 eq	-0,3%	-0,6%	-0,9%	-1,2%	-1,5%
Consumo de água	m ³	-0,2%	-0,4%	-0,7%	-0,9%	-1,1%
Radiação ionizante	KBq Co-60 eq	-0,1%	-0,2%	-0,4%	-0,5%	-0,6%

Fonte: Elaboração própria.

Após as análises dos dados apresentados pelo OpenLCA verificou-se que, dentre todos os fluxos que compõem cada categoria de impacto, nos fluxos emissão de dióxido de carbono, emissão de metano, água para energia hidrelétrica e emissões de efluentes houve aumento dos impactos do cenário A até o F. Na Tabela 9, estão apresentadas as porcentagens de aumento dos fluxos.

Tabela 9: Proporções de aumento dos impactos em relação ao cenário A.

Categoria de Impacto	Fluxo	B	C	D	E	F
Aquecimento Global (Kg)	Dióxido de carbono	43,5%	86,9%	130,4%	173,9%	217,4%
	Metano, biogênico	6,8%	13,6%	20,3%	27,1%	33,9%
Consumo de Água (m ³)	Água para hidrelétrica	221,0%	441,9%	662,9%	883,8%	1.104,8%
	Emissões de efluentes	220,5%	441,0%	661,5%	882,0%	1.102,5%

Fonte: Elaboração própria.

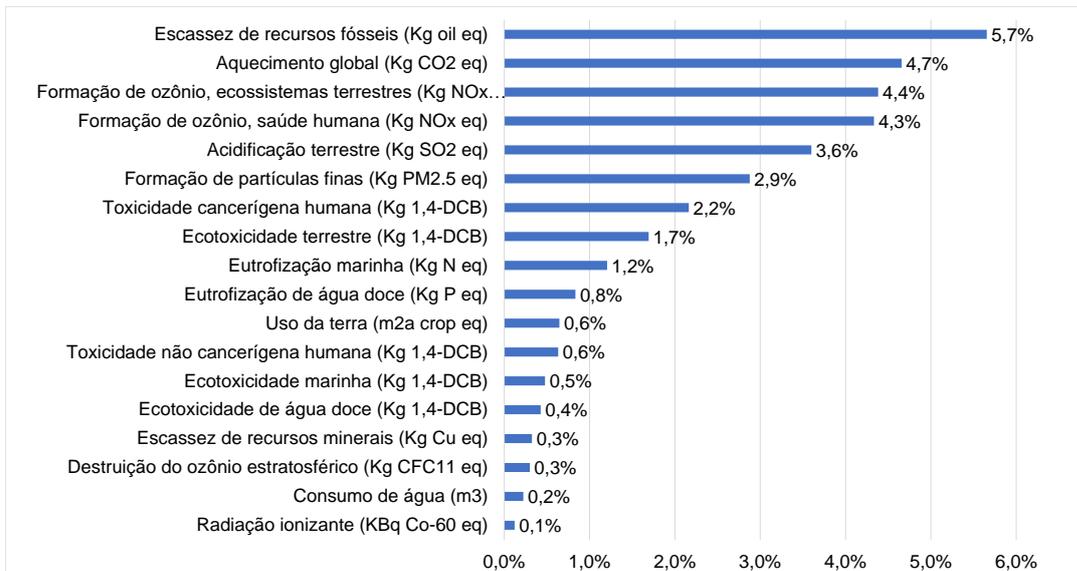
De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2022, 56,8% da energia elétrica produzida no Brasil utilizou fonte hídrica; 12,8% gás natural; 10,6% eólica; 8,2% biomassa e 11,6% demais fontes (EPE, 2022). Dessa maneira, com o aumento proporcional de consumo de energia elétrica proveniente do processo de reciclagem, há um aumento no consumo de água para geração de energia hidrelétrica.

Conforme os autores Abe *et al.*, (2005) e Dias & Santos (2024), a decomposição da matéria orgânica nos reservatórios das hidrelétricas gera metano e dióxido de carbono. Portanto, aumentando o consumo de energia hidrelétrica, aumenta-se as emissões de metano e dióxido de carbono expostos.

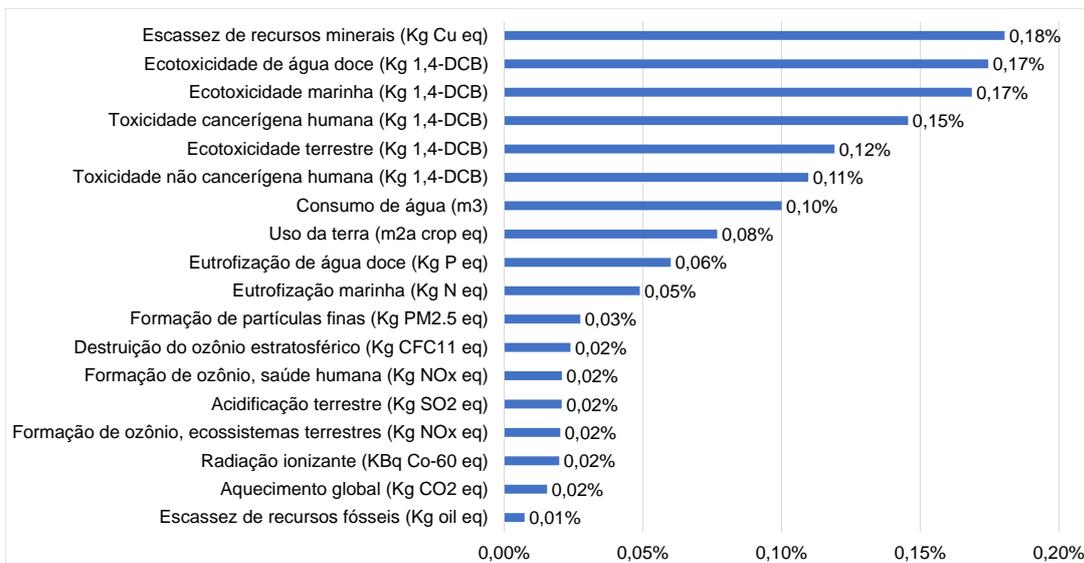
Quanto ao aumento no fluxo emissões de efluentes, um dos fluxos utilizados na composição da categoria de impacto consumo de água, considerando que o processo de reciclagem consome cerca de 0,4 L/Kg (Silva & Moita Neto, 2016), o incremento de água atrelado ao aumento do uso de PP reciclado, explica os números verificados na Tabela 9.

Com isso e considerando a necessidade de avaliação quanto às exigências técnicas do respirador frente à proporção de polipropileno reciclado, conforme exposto por Horodytska *et al.* (2020), sugere-se que o melhor cenário para redução de impactos ambientais é o cenário B. Dessa forma, na Figura 8, são apresentadas porcentagens de reduções para cada categoria no cenário B.

Na análise de sensibilidade, considerando o cenário B, ao mudar a fonte de energia elétrica (conforme 3.2.6), adicionada devido ao processo de reciclagem do PP, foi identificado que houve baixa influência nos resultados das categorias de impacto aumentando entre 0,01 e 0,18% os impactos ambientais (Figura 9). Para os demais cenários (do C ao F) não se fez necessária a análise de sensibilidade considerando que a diferença é apenas em relação à quantidade de energia consumida. Assim, a análise de sensibilidade demonstrou que os resultados das categorias de impacto não apresentaram alterações relevantes, independente da fonte de energia utilizada.

Figura 8: Reduções dos impactos ambientais no cenário B.

Fonte: Elaboração própria.

Figura 9: Aumentos nas categorias de impacto com mudança de matriz elétrica no cenário B.

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2 Projeção de redução dos impactos ambientais frente ao consumo de respiradores na pandemia COVID-19

De acordo com Teixeira *et al.* (2023), não foram evidenciados trabalhos científicos citando o consumo de respiradores PFF2 sem válvulas, apenas N95, de composição e pesos similares. Assim, para o respirador N95, os autores citaram uma projeção de consumo, nos EUA, na ordem de 125 milhões de unidades/mês entre 2020 e 2021. Conforme apresentado no

item 3.3.1, o melhor cenário para redução de impactos ambientais é o cenário B. Com isso, foi calculada a redução dos impactos ambientais, na produção do respirador PFF2, Tabela 10.

Tabela 10: Projeção de redução dos impactos ambientais do cenário B segundo estimativa de consumo de respiradores nos EUA.

Categoria de Impacto	Cenário A		Cenário B		Redução
	Emissões a cada 1.000 PFF2 ¹	Emissões para 125 milhões de N95 ao mês	Emissões a cada 1.000 PFF2	Emissões para 125 milhões de N95 ao mês	
Escassez de recursos fósseis (Kg oil eq)	1,3846x10 ¹	1,7307x10 ⁶	1,3063x10 ¹	1,6329x10 ⁶	9,7868x10 ⁴
Aquecimento global (Kg CO2 eq)	2,3027x10 ¹	2,8783x10 ⁶	2,1955x10 ¹	2,7443x10 ⁶	1,3402x10 ⁵
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres (Kg NOx eq)	5,5731x10 ⁻²	6,9664x10 ³	5,3290x10 ⁻²	6,6612x10 ³	3,0523x10 ²
Formação de ozônio, saúde humana (Kg NOx eq)	5,1600x10 ⁻²	6,4500x10 ³	4,9364x10 ⁻²	6,1705x10 ³	2,7948x10 ²
Acidificação terrestre (Kg SO2 eq)	7,4323x10 ⁻²	9,2904x10 ³	7,1647x10 ⁻²	8,9559x10 ³	3,3443x10 ²
Formação de partículas finas (Kg PM2.5 eq)	3,0655x10 ⁻²	3,8319x10 ³	2,9773x10 ⁻²	3,7216x10 ³	1,1024x10 ²
Toxicidade cancerígena humana (Kg 1,4-DCB)	8,8665x10 ⁻¹	1,1083x10 ⁵	8,6747x10 ⁻¹	1,0843x10 ⁵	2,3980x10 ³
Ecotoxicidade terrestre (Kg 1,4-DCB)	3,5765x10 ¹	4,4706x10 ⁶	3,5160x10 ¹	4,3949x10 ⁶	7,5676x10 ⁴
Eutrofização marinha (Kg N eq)	5,2288x10 ⁻⁴	6,5360x10 ¹	5,1658x10 ⁻⁴	6,4572x10 ¹	7,8827x10 ⁻¹
Eutrofização de água doce (Kg P eq)	4,4298x10 ⁻³	5,5373x10 ²	4,3928x10 ⁻³	5,4911x10 ²	4,6202
Uso da terra (m2a crop eq)	2,9048x10 ⁻¹	3,6310x10 ⁴	2,8860x10 ⁻¹	3,6075x10 ⁴	2,3465x10 ²
Toxicidade não cancerígena humana (Kg 1,4-DCB)	1,4514x10 ¹	1,8142x10 ⁶	1,4422x10 ¹	1,8027x10 ⁶	1,1466x10 ⁴
Ecotoxicidade marinha (Kg 1,4-DCB)	1,0468	1,3085x10 ⁵	1,0418	1,3022x10 ⁵	6,2548x10 ²
Ecotoxicidade de água doce (Kg 1,4-DCB)	8,0592x10 ⁻¹	1,0074x10 ⁵	8,0248x10 ⁻¹	1,0031x10 ⁵	4,2988x10 ²
Escassez de recursos minerais (Kg Cu eq)	5,8843x10 ⁻²	7,3554x10 ³	5,8652x10 ⁻²	7,3315x10 ³	2,3932x10 ¹
Destruição do ozônio estratosférico (Kg CFC11 eq)	6,3097x10 ⁻⁶	7,8871x10 ⁻¹	6,2908x10 ⁻⁶	7,8634x10 ⁻¹	2,3627x10 ⁻³
Consumo de água (m3)	2,3681x10 ⁻¹	2,9601x10 ⁴	2,3628x10 ⁻¹	2,9535x10 ⁴	6,6303x10 ¹
Radiação ionizante (KBq Co-60 eq)	8,7309x10 ⁻¹	1,0914x10 ⁵	8,7203x10 ⁻¹	1,0900x10 ⁵	1,3249x10 ²

Fonte: Elaboração própria. 1 – Teixeira *et al.* (2023).

Dessa maneira, ao se implementar o cenário B na produção do respirador PFF2 sem válvula, frente a um consumo significativo como o ocorrido na pandemia Covid-19, seriam reduzidos mensalmente entre 2020 e 2021: i) Escassez de recursos fósseis em 97.868,35 Kg oil eq; ii) Aquecimento global em 134.018,74 Kg CO₂ eq; iii) Formação de ozônio, ecossistemas terrestres em 305,23 Kg NO_x eq; iv) Formação de ozônio, saúde humana em 279,48 Kg NO_x eq; v) Acidificação terrestre em 334,43 Kg SO₂ eq; vi) Formação de partículas finas em 110,24 Kg PM_{2,5} eq; vii) Toxicidade cancerígena humana em 2.397,98 Kg 1,4-DCB; viii) Ecotoxicidade terrestre em 75.676,10 Kg 1,4-DCB; ix) Eutrofização marinha em 0,79 Kg N eq; x) Eutrofização de água doce em 4,62 Kg P eq; xi) Uso da terra em 234,65 m²a crop eq; xii) Toxicidade não cancerígena humana em 11.466,35 Kg 1,4-DCB; xiii) Ecotoxicidade marinha em 625,48 Kg 1,4-DCB; xiv) Ecotoxicidade de água doce em 429,88 Kg 1,4-DCB; xv) Escassez de recursos minerais em 23,93 Kg Cu eq; xvi) Destruição do ozônio estratosférico em eq 0,0024 Kg CFC11; xvii) Consumo de água em 66,30 m³; xviii) Radiação ionizante em 132,49 KBq Co-60 eq.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do software OpenLCA, das base de dados AGRIBALYSE_V301 e ECOINVENT v3.7.1 e da metodologia de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H) se apresentou como uma importante e fundamental ferramenta para tomada de decisão quanto aos impactos ambientais de modificações em processos, serviços e produtos.

Contudo, apenas uma análise simplificada das categorias de impacto, sem uma análise técnica da viabilidade econômica e dos processos envolvidos na concepção da modificação avaliada, pode gerar resultados errôneos. Este estudo também evidenciou que uma avaliação detalhada dos fluxos constituintes das categorias de impacto pode contribuir para uma melhor tomada de decisão.

No entanto, ainda há dificuldades em se utilizar dados brasileiros para avaliações de ACV, fazendo com que parte das informações utilizadas considerem o mercado global e não local. No caso deste estudo, ao se considerar produções locais de água para consumo e de polipropileno virgem, os resultados das categorias podem gerar dados diferenciados ao se considerar, por exemplo: eliminação/redução de modais marítimos, consumo de energia hidrelétrica, tipo de combustível disponibilizado no mercado nacional etc.

Este estudo sugeriu que o melhor cenário ambiental para produção de respiradores PFF2 sem válvula, é o cenário B com a mistura de 90% de polipropileno virgem e 10% de

polipropileno reciclado, mas deve-se verificar tecnicamente os impactos na qualidade final do produto. É demonstrado ainda que, ao se implementar esse cenário, haveria a redução mensal da escassez de recursos fósseis em 5,7%, revelando a maior redução dentre as 18 categorias de impacto, pois deixaria de se consumir aproximadamente 97,9 t Oil eq. Outra importante conclusão desse estudo é que, neste cenário, haveria a redução de emissões de substâncias com potencial de toxicidade em cerca de 90,6 t 1,4-DCB (soma das reduções das categorias de impacto toxicidade cancerígena humana, ecotoxicidade terrestre, toxicidade não cancerígena humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade de água doce). Assim, futuras pesquisas devem ser realizadas considerando dados nacionais quanto a: polipropileno, águas pluviais, energia eólica ou solar e alumínio reciclado.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abe, D. S., Adams, D. D., Sidagis Galli, C. V., Sikar, E., & Tundisi, J. G. (2005). Sediment greenhouse gases (methane and carbon dioxide) in the Lobo-Broa Reservoir, São Paulo State, Brazil: Concentrations and diffuse emission fluxes for carbon budget considerations. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 10(4), 201–209. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2005.00277.x>

ABNT. (2014). ABNT NBR ISO 14040 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. In Associação Brasileira de Normas Técnicas (pp. 1–22).

ACV.IBICT. (2023). Avaliação do ciclo de vida. Website. <https://acv.ibict.br/>

ANVISA. (2023). Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Website. <https://www.gov.br/anvisa/pt-br>

Allison, A. L., Ambrose-Dempster, E., Bawn, M., Arredondo, M. C., Chau, C., Chandler, K., Dobrijevic, D., Aparasi, T. D., Hailes, H. C., Lettieri, P., Liu, C., Medda, F., Michie, S., Miodownik, M., Munro, B., Purkiss, D., & Ward, J. M. (2021). The impact and effectiveness of the general public wearing masks to reduce the spread of pandemics in the UK: a multidisciplinary comparison of single-use masks versus reusable face masks. *UCL Open Environment*, 3. <https://doi.org/10.14324/111.444/ucloe.000022>

Boix Rodríguez, N., Marconi, M., Favi, C., & Formentini, G. (2021). Eco-design actions to improve life cycle environmental performance of face masks in the pandemic era. *Proceedings of the Design Society*, 1(August), 1333–1342. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.133>

Bueno, C. (2014). Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil : Análise de Sensibilidade. 266. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-10112014-144911/pt-br.php>

Chen, Y., Cui, Z., Cui, X., Liu, W., Wang, X., Li, X. X., & Li, S. (2019). Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 146(December 2018), 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.011>

Cherubini, E. (2015). Incertezas na avaliação do ciclo de vida: um estudo de caso na suinocultura = Uncertainties in life cycle assessment: case study of swine production. 246. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/159405?show=full>

De-la-Torre, G. E., Dioses-Salinas, D. C., Pizarro-Ortega, C. I., Fernández Severini, M. D., Forero López, A. D., Mansilla, R., Ayala, F., Castillo, L. M. J., Castillo-Paico, E., Torres, D. A., Mendoza-Castilla, L. M., Meza-Chuquizuta, C., Vizcarra, J. K., Mejía, M., De La Gala, J. J. V., Ninaja, E. A. S., Calisaya, D. L. S., Flores-Miranda, W. E., Rosillo, J. L. E., ... Santillán, L. (2022). Binational survey of personal protective equipment (PPE) pollution driven by the COVID-19 pandemic in coastal environments: Abundance, distribution, and analytical characterization. *Journal of Hazardous Materials*, 426, 128070. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128070>

Dias, J. P. P., & Santos, M. A. (2024). Statistical modeling of diffusive CO₂ emissions before the creation of the SINOP hydroelectric reservoir, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 84, 1–11. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.255268>

EPE. (2022). Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021 - Relatório Final. 264. <http://www.epe.gov.br>

Harding, K. G., Dennis, J. S., von Blottnitz, H., & Harrison, S. T. L. (2007). 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*, 130(1), 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.02.012>

Horodytska, O., Kiritsis, D., & Fullana, A. (2020). Upcycling of printed plastic films: LCA analysis and effects on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122138>

Khoo, H. H. (2019). LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. *Resources, Conservation and Recycling*, 145(February), 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.010>

Landim, A. P. M., Bernardo, C. O., Martins, I. B. A., Francisco, M. R., Santos, M. B., & De Melo, N. R. (2016). Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. *Polimeros*, 26, 82–92. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1897>

Notten, P., Gower, A., & Lewis, Y. (2022). Single-use face masks and their alternatives: Recommendations from Life Cycle Assessments. United Nations Environment Programme (UNEP). www.lifecycleinitiative.org/library/single-use-face-masks-and-their-alternatives-recommendations-from-life-cycle-assessments/

Patrício Silva, A. L., Prata, J. C., Walker, T. R., Duarte, A. C., Ouyang, W., Barcelò, D., & Rocha-Santos, T. (2021). Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. *Chemical Engineering Journal*, 405(August 2020), 126683. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126683>

Rodríguez, N. B., Formentini, G., Favi, C., & Marconi, M. (2021a). Engineering design process of face masks based on circularity and life cycle assessment in the constraint of the covid-19 pandemic. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094948>

Rodríguez, N. B., Formentini, G., Favi, C., & Marconi, M. (2021b). Environmental implication of personal protection equipment in the pandemic era: LCA comparison of face masks typologies. *Procedia CIRP*, 98, 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.108>

Sanyé-Mengual, E., & Sala, S. (2022). Life Cycle Assessment support to environmental ambitions of EU policies and the Sustainable Development Goals. *Integrated Environmental Assessment and Management*, February. <https://doi.org/10.1002/ieam.4586>

Silva, D. A. L. (2012). Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil. *Avaliação Do Ciclo de Vida Da Produção Do Painel de Madeira MDP No Brasil*, 207. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-31072012-121351/pt-br.php>

Silva, E. A. da, & Moita Neto, J. M. (2016). Possibilidades de melhorias ambientais no processo de reciclagem do polietileno Possibilities for environmental improvements in the polyethylene recycling process. *Polímeros*, 26, 49–54. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1954>

Snigdha, Hiloidhari, M., & Bandyopadhyay, S. (2023). Environmental footprints of disposable and reusable personal protective equipment – a product life cycle approach for body coveralls. *Journal of Cleaner Production*, 394(October 2022), 136166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136166>

Tabatabaei, M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Yang, Y., Aghbashlo, M., Lam, S. S., Montgomery, H., & Peng, W. (2021). Exergy intensity and environmental consequences of the medical face masks curtailing the COVID-19 pandemic: Malign bodyguard? *Journal of Cleaner Production*, 313, 127880. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127880>

Teixeira, L. G., Prado, K. D. S. DO, & Paiva, J. M. F. DE. (2023). Analysis of increased consumption and disposal of ppe polymers during the COVID-19 pandemic and possible environmental impacts. https://doi.org/10.14488/enegep2023_tn_wpg_407_2001_46327

Zhao, H., Liu, H. Q., Wei, G., Wang, H., Zhu, Y., Zhang, R., & Yang, Y. (2021). Comparative life cycle assessment of emergency disposal scenarios for medical waste during the COVID-19 pandemic in China. *Waste Management*, 126, 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.034>

Zhao, X., Klemeš, J. J., & Fengqi You. (2022). Energy and environmental sustainability of waste personal protective equipment (PPE) treatment under COVID-19. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153(May 2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111786>

4. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O aumento significativo no consumo de EPIs para proteções contra a Covid-19 aumentou substancialmente a geração de resíduos poliméricos. Conforme descrito no item 2.3.2, estimou-se que houve a geração de 21.098 t/dia de máscaras cirúrgicas, que foram descartadas durante a pandemia. Com isso, dentre os aspectos ambientais atrelados ao aumento do consumo de EPI na pandemia, conforme item 2.3.3, estão: i) poluição ambiental; ii) aumento de microplásticos na água; iii) contaminação da água e de alimentos; iv) redução ou eliminação da reciclagem, gerando aumento no consumo de polímeros virgens.

Por outro lado, verificou-se que ações para reduções dos impactos ambientais necessitam de respaldo técnico, como os fornecidos pelo uso da ACV. Neste trabalho, o uso de polipropileno reciclado para a manufatura do respirador PFF2 sem válvula foi proposto como uma possível ação que poderia minimizar os impactos ambientais durante a pandemia Covid-19. Neste estudo, a utilização da ACV se apresentou como uma ferramenta importante para a tomada de decisão quanto aos resultados dos impactos ambientais dessa ação. Contudo, apenas a análise das categorias de impacto poderia gerar resultados errôneos ao passo que, nos fluxos das categorias de impacto, podem ocorrer aumentos nos impactos ambientais. Assim, com o uso da ACV e baseando-se no consumo de respiradores durante a pandemia Covid-19 foi demonstrado que com a implementação de 10% de polipropileno reciclado há potencial de redução mensal, por exemplo, no consumo de 98 ton Oil eq de recursos fósseis e de quase 91 ton 1,4-DCB em emissões de substâncias tóxicas.

Outro fator importante a ser considerado é que ainda há dificuldades em se utilizar dados brasileiros para a ACV, fazendo com que a maior parte das informações utilizadas considerem o mercado global e não o nacional. Portanto, novos estudos de ACV, considerando dados brasileiros no consumo de i) polipropileno; ii) águas pluviais; iii) energia eólica ou solar; iv) alumínio reciclado, podem gerar resultados diferenciados para as categorias de impacto.