



RELATÓRIO DE PROJETO

Avaliação do Ciclo de Vida Comparativa de Big Bag



Março de 2023

Versão 4.0

Índice

Índice.....	2
Controle de versão	4
Lista de Abreviaturas	4
Lista de Figuras e Tabelas	5
Sobre a ACV Brasil	7
Sumário Executivo	8
Objetivo e Escopo	9
A. Objetivo	9
B. Escopo	10
Função, Unidade Funcional e Fluxo de Referência	10
Descrição dos Produtos estudados	11
Sistemas dos produtos e Fronteiras	14
Procedimentos de Alocação e Fim de Vida	16
Categorias e Método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida	19
Pressupostos e Limitações	19
Qualidade dos dados e Sensibilidade	20
Análise Crítica	21
Inventário do Ciclo de Vida	22
Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida	23
Análises de Sensibilidade	27
Análises de Cenários	27
Resultados	28
A. Perfil ambiental dos big bags de PP	28
Big bag 100% PP virgem	28
Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem	31
B. Resultados Comparativos (cenário base)	35
Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem versus Big bag 100% PP virgem	35
Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem versus Big bag 100% PET-PCR	38
Big bag 100% PP virgem versus Big bag 100% PET virgem	42
Big bag 100% PP virgem versus Big bag 100% PET-PCR	45
Análise comparativa entre as opções de big bags	47
C. Análises de Sensibilidade	48
Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem versus Big bag 100% PP virgem	53

Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem versus Big bag 100% PET-PCR.....	54
Big bag 100% PP virgem versus Big bag 100% PET virgem	55
Big bag 100% PP virgem versus Big bag 100% PET-PCR	56
D. Análises de Cenários.....	57
Aplicações e Conclusões	62
A. Aplicações	62
B. Conclusões	63
Referências Bibliográficas	66
Anexo A – Apresentação de Método Recomendado	68
Anexo B – Matriz de Pedigree	70
Anexo C – Análise da Qualidade dos Dados	71
Anexo D – Descritivo de dados utilizados	73
Anexo E – Resultados Fator A = 1	78

Controle de versão

Versão	Data	Descrição
1.0	30/09/2022	Versão final para aprovação da Embrasa
2.0	17/03/2023	1ª versão revisada para aprovação da KPMG
3.0	24/03/2023	2ª versão revisada para aprovação da KPMG
4.0	29/03/2023	Versão final aprovada pela KPMG

Lista de Abreviaturas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

AICV - Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem

CML - Chain Management by Life Cycle Assessment

EC - European Commission

ILCD - International Reference Life Cycle Data System

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO - International Organization for Standardization

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MME - Ministério de Minas e Energia

MPOG - Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão

NBR - Norma Brasileira

PCR - Resina pós-consumo

PET - Polietileno tereftalato

PP - Polipropileno

SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry

UNEP - United Nations Environment Programme

Lista de Figuras e Tabelas

Figura 1. Sistemas de produto sob comparação	9
Figura 2. Relação das características de comparação dos objetos do estudo	10
Figura 3. Esquema representativo dos sistemas de produto de big bags	15
Figura 4. Exemplo de ilustração sobre como lidar com pesos e créditos da reciclagem	17
Figura 5. Quadro explicativo das categorias de impacto e em nível de inventário consideradas.....	24
Figura 6. Resultados e análise de contribuição para uma unidade de big bag com 100% PP virgem.....	29
Figura 7. Resultados e análise de contribuição para uma unidade de big bag com 50% PP-PCR e 50% PP virgem	32
Figura 8. Resultados e análise de contribuição da produção de 1 kg de resina reciclada de PP (Fator A = 0,50)	32
Figura 9. Análise comparativa da produção de big bag com 50% PP-PCR e big bag com 100% PP virgem	36
Figura 10. Análise comparativa da produção de big bag com 50% PP-PCR e big bag com 100% PP virgem para categoria de impacto Mudanças Climáticas	37
Figura 11. Análise comparativa da produção de big bag com 50% PP virgem e 50% PP-PCR e big bag com 100% PET-PCR	39
Figura 12. Análise comparativa da produção de big bag com 50% PP virgem e 50% PP-PCR e big bag com 100% PET-PCR para categoria de impacto Mudanças Climáticas.....	40
Figura 13. Análise comparativa das resinas PCR de PP e de PET para a categoria Mudanças de Climáticas (Fator A = 0,50)	40
Figura 14. Resultados e análise de contribuição para uma unidade de big bag com 100% PET-PCR	41
Figura 15. Análise comparativa da produção de big bag com 100% PP virgem e big bag com 100% PET virgem.....	43
Figura 16. Análise comparativa da produção de big bag com 100% PP virgem e big bag com 100% PET virgem para categoria de impacto Mudanças Climáticas	43
Figura 17. Análise comparativa das resinas virgem de PP e PET para a categoria Mudanças Climáticas	44
Figura 18. Resultados e análise de contribuição para uma unidade de big bag com 100% PET virgem	44
Figura 19. Análise comparativa da produção de big bag com 100% PP virgem e big bag com 100% PET-PCR ...	46
Figura 20. Análise comparativa da produção de big bag com 100% PP virgem e big bag com 100% PET-PCR virgem para categoria de impacto Mudanças Climáticas	46
Figura 21. Análise comparativa das quatro alternativas de big bags avaliadas neste estudo de ACV (Fator A = 0,50)	48
Figura 22. Análise comparativa para Mudanças Climáticas das quatro alternativas de big bags avaliadas neste estudo de ACV (Fator A = 0,50)	48
Figura 23. Análise de sensibilidade da variação da distância de coleta dos resíduos pós-consumo de PP – resultados para o big bag 50% PP-PCR	49
Figura 24. Análise de sensibilidade da variação da distância de coleta dos resíduos pós-consumo de PET – resultados para o big bag 100% PET-PCR.....	50
Figura 25. Análise de sensibilidade da variação da distância de coleta dos resíduos pós-consumo de PP e PET – influência para categoria Mudanças Climáticas	50
Figura 26. Indicadores de consumo de eletricidade da reciclagem do PP (big bags) e do PET (garrafas)	51
Figura 27. Análise de sensibilidade considerando a variação no consumo de eletricidade no processo de reciclagem do PP – big bag 50% PP-PCR	51
Figura 28. Análise de sensibilidade da variação do consumo de eletricidade na reciclagem dos big bags pós-consumo de PP e resultados para Mudanças Climáticas.....	52
Figura 29. Análise comparativa da produção de big bag com 50% PP-PCR e big bag com 100% PP virgem (método EF).....	53
Figura 30. Análise de sensibilidade do método de AICV para análise comparativa 1	54
Figura 31. Análise comparativa da produção de big bag com 50% PP virgem e 50% PP-PCR e big bag com 100% PET-PCR (método EF)	54
Figura 32. Análise de sensibilidade do método de AICV para análise comparativa 2	55
Figura 33. Análise comparativa da produção de big bag com 100% PP virgem e big bag com 100% PET virgem (método EF).....	55
Figura 34. Análise de sensibilidade do método de AICV para análise comparativa 3	56
Figura 35. Análise comparativa da produção de big bag com 100% PP virgem e big bag com 100% PET-PCR (método EF).....	57
Figura 36. Análise de sensibilidade do método de AICV para análise comparativa 4	57

Figura 37. Análise de sensibilidade da variação do conteúdo reciclado - resultados para o big bag 50% PP-PCR	58
Figura 38. Análise de sensibilidade da variação do conteúdo reciclado - resultados para o big bag 100% PET-PCR	59
Figura 39. Análise de sensibilidade da variação do conteúdo reciclado (Fator A = 0,50) – influência para categoria Mudanças Climáticas	59
Figura 40. Análise de sensibilidade da variação da taxa de reciclagem - resultados para os big bags de PP	60
Figura 41. Análise de sensibilidade da variação da taxa de reciclagem - resultados para os big bags de PET	60
Figura 42. Análise de sensibilidade da variação da taxa de reciclagem – influência para categoria Mudanças Climáticas	60
Figura 43. Análise de sensibilidade da variação do conteúdo reciclado – influência para categoria Mudanças Climáticas, incluindo cenário hipotético de produção de big bag com 100% PP-PCR	61
Tabela 1. Aspectos diversos sobre os sistemas de produto	13
Tabela 2. Origem dos dados para o big bag de PP virgem e reciclado (cenário base)	14
Tabela 3. Origem dos dados para o big bag de PET utilizados neste estudo (cenário base).....	14
Tabela 4. Faixas de classificação da qualidade dos dados	20
Tabela 5. Perfil ambiental de uma unidade de big bag com capacidade de 1000kg (análise comparativa 1).....	38
Tabela 6. Perfil ambiental de uma unidade de big bag com capacidade de 1000kg (análise comparativa 2).....	42
Tabela 7. Perfil ambiental de uma unidade de big bag com capacidade de 1000kg (análise comparativa 3).....	45
Tabela 8. Perfil ambiental de uma unidade de big bag com capacidade de 1000kg (análise comparativa 4).....	47
Tabela 9. Relação dos indicadores e níveis de qualidade da Matriz de Pedigree considerado	70
Tabela 10. Análise da qualidade dos dados para o big bag 100% PP virgem	71
Tabela 11. Análise da qualidade dos dados para o big bag 50% PP virgem e 50% PP-PCR	71
Tabela 12. Análise da qualidade dos dados para o big bag 100% PET virgem	72
Tabela 13. Análise da qualidade dos dados para o big bag 100% PET-PCR	72
Tabela 14. Quadro descritivo da produção do big bag 100% PP virgem. Refere-se à 1 unidade de big bag.	73
Tabela 15. Quadro descritivo da produção do big bag 50% PP virgem e 50% PP-PCR. Refere-se à 1 unidade de big bag.	74
Tabela 16. Quadro descritivo da produção do big bag 100% PET-PCR. Refere-se à 1 unidade de big bag.....	75
Tabela 17. Quadro descritivo da produção do big bag 100% PET virgem. Refere-se à 1 unidade de big bag.	76
Tabela 18. Quadro descritivo da produção da resina reciclada de PP-PCR. Refere-se à 1 kg de resina.	76
Tabela 19. Quadro descritivo da produção da resina reciclada de PET-PCR - dados baseados em [Gileno, 2020]. Refere-se à 1 kg de resina.	77
Tabela 20. Perfil ambiental de uma unidade de big bag com capacidade de 1000kg (Fator A = 1).....	78

Sobre a ACV Brasil

A ACV Brasil nasce dos interesses comuns de profissionais e pesquisadores em contribuir ao processo de desenvolvimento da sociedade e da economia, em busca de patamares mais sustentáveis. Alcança-se isso com a realização de estudos que orientem mudanças em processos produtivos, na direção do uso racional de recursos e de padrões de consumo justos e em conformidade com a capacidade de oferta dos ecossistemas.

A atuação da ACV Brasil abrange o ciclo de vida de produtos e serviços. A empresa é parceira da PRé Sustainability, desenvolvedora do software SimaPro®, líder em Avaliação do Ciclo de Vida, bem como da ifu Hamburg GmbH, desenvolvedora do Umberto®. Acompanha ainda o desenvolvimento do Life Cycle Initiative, da UNEP e da SETAC.

Mais informações podem ser encontradas em www.acvbrasil.com.br.

Este relatório foi preparado pela ACV Brasil e todas as questões devem ser encaminhadas à empresa, utilizando-se os seguintes contatos:

ACV Brasil

acvbrasil@acvbrasil.com.br

+55 41 3044 5977

Sumário Executivo

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é reconhecida internacionalmente como uma poderosa técnica para avaliar o impacto ambiental potencial de um produto ou serviço. Ela pode também prestar-se ao suporte à tomada de decisão e auxiliar na comparação entre dois ou mais materiais, produtos ou serviços.

A técnica de ACV é baseada no pensamento do ciclo de vida e leva em consideração todos os processos e fluxos ambientais, desde a extração da matéria-prima até a disposição final. No Brasil, a ACV tem auxiliado as indústrias na tomada de decisões para melhoria de processos, produtos e serviços, podendo até chegar ao consumidor final por meio das declarações de impacto ambiental de produtos.

Seguindo esta tendência e alinhada com o zelo pela qualidade do meio ambiente e desenvolvimento de produtos mais sustentáveis, a **Embrasa** promove este estudo de ACV comparativo buscando identificar a melhor solução ambiental, por categoria de impacto, de big bag. Os sistemas de produtos considerados para esta análise incluem big bags fabricados com resina virgem e/ou reciclada, considerando quatro formulações¹: (i) **50% PP reciclado (PCR)** e **50% PP virgem**; (ii) **100% PP virgem**; (iii) **100% PET reciclado (PCR)** e (iv) **100% PET virgem**. Atualmente, somente as duas primeiras formulações são produzidas pela Embrasa.

O modelo de ciclo de vida é concebido de modo estruturado, visando possibilitar a identificação da contribuição de cada etapa da cadeia de valor para o total de impactos ambientais gerados. Dados primários foram coletados para os big bags, desde a obtenção da matéria-prima virgem e reciclada², etapas de transporte e fabricação. Estas informações foram obtidas a partir de um Formulário de Coleta de Dados e outros documentos eletrônicos.

Para todos os sistemas de produto, dados secundários foram utilizados para representar os estágios de transporte até clientes e o cenário de fim de vida das embalagens. O envase foi excluído dos sistemas de produto em estudo. Essa omissão não afeta o resultado da comparação, pois pode-se razoavelmente presumir que tais estágios ocorrem de modo similar para os quatro tipos de embalagem sob análise.

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) abrange as seguintes categorias: Mudanças Climáticas, Depleção da Camada de Ozônio, Acidificação, Eutrofização, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade, Oxidação Fotoquímica, Inorgânicos Inaláveis, Recursos Minerais, Combustíveis Fósseis, Ocupação do Solo e Uso de Água. Trata-se de uma compilação de métodos de AICV, que possui alicerces em modelos científicos bastante renomados e aceitos internacionalmente, como IPCC, CML e USETox.

Os resultados de qualquer ACV dão-se em função de muitos parâmetros, incluindo hipóteses e limitações. Assim, os valores finais e as conclusões deste estudo somente devem ser utilizados seguindo o contexto e limitações apresentados neste Relatório.

¹ PP: Polipropileno. PET: Polietileno tereftalato. PCR: Resina pós-consumo.

² Com exceção para a reciclagem do PET, para qual foram utilizados dados secundários, obtidos da literatura.

Objetivo e Escopo

A. Objetivo

Conforme requisitos de qualidade da ABNT NBR ISO 14040 [ABNT, 2009a], o objetivo de um estudo de ACV deve declarar:

- i. A aplicação pretendida,
- ii. As razões para a execução do estudo,
- iii. O público-alvo, e
- iv. A existência ou inexistência da intenção de se utilizar os resultados para afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

Os resultados da ACV serão aplicados na comunicação da melhor solução ambiental, por categoria de impacto, entre as seguintes alternativas de formulação de big bags: (i) 50% PP reciclado (PCR) e 50% PP virgem; (ii) 100% PP virgem; (iii) 100% PET reciclado (PCR) e (iv) 100% PET virgem. Atualmente, somente as duas primeiras formulações são produzidas pela Embrasa.

A razão para conduzir o estudo é conhecer de maneira mais aprofundada os potenciais impactos dos sistemas de produto avaliados comparativamente (Figura 1), para o Brasil, considerando como base o ano de 2021. Além disso, este estudo possui como objetivo identificar as principais oportunidades de melhoria do perfil ambiental dos big bags fabricados a partir de resinas virgem e recicladas de PP e de PET³, principalmente, para a categoria Mudanças Climáticas.

Pretende-se usar os resultados para afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente, cujo público alvo é representado por colaboradores e clientes da Embrasa. Os resultados da ACV objetivam a avaliação comparativa dos sistemas de produto, a seguir:

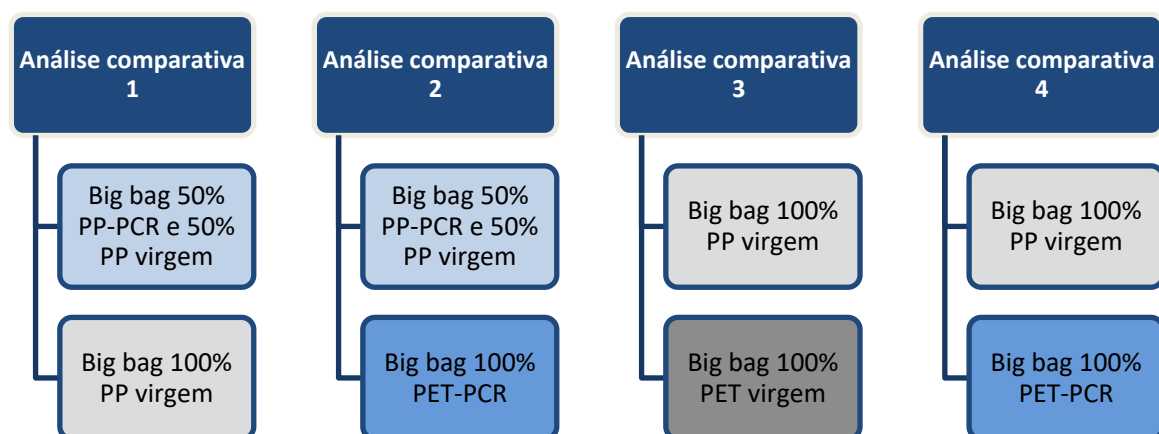


FIGURA 1. SISTEMAS DE PRODUTO SOB COMPARAÇÃO

³ Dados primários foram obtidos para a produção dos big bags de PP e dados secundários foram utilizados para representar a produção dos big bags de PET.

B. Escopo

A forma como a avaliação será concebida perfaz, portanto, quatro sistemas de produto, considerando as diferentes formulações de big bags sob análise: (i) 50% PP reciclado (PCR) e 50% PP virgem; (ii) 100% PP virgem; (iii) 100% PET reciclado (PCR) e (iv) 100% PET virgem.

Função, Unidade Funcional e Fluxo de Referência

Considera-se como função dos sistemas de produto analisados embalar e permitir o transporte de produtos de diversos mercados de atuação, respeitando-se determinadas características técnicas para a preservação do produto, como nível de durabilidade e resistência. A unidade funcional refere-se assim ao intuito de viabilizar a embalagem e transporte de determinados tipos de produtos, conforme exposto na Figura 2. Os fluxos de referência seguem a relação da quantidade de produtos suficientes para cumprir a unidade funcional.

Big Bags	
FUNÇÃO	Embalar e permitir o transporte de produtos de diversos mercados de atuação (fertilizantes, sementes e grãos, químicos e petroquímicos, mineração e alimentício), no Brasil, considerando como base o ano de 2021
UNIDADE FUNCIONAL	Embalar e permitir o transporte de 1000 kg de produto de diversos mercados de atuação (fertilizantes, sementes e grãos, químicos e petroquímicos, mineração e alimentício), no Brasil, considerando como base o ano de 2021
FLUXOS DE REFERÊNCIA	- 1 Big bag, com capacidade de 1000 kg, com 50% PP reciclado (PCR) e 50% PP virgem - 1 Big bag, com capacidade de 1000 kg, com 100% PP virgem - 1 Big bag, com capacidade de 1000 kg, com 100% PET reciclado (PCR) - 1 Big bag, com capacidade de 1000 kg, com 100% PET virgem

FIGURA 2. RELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE COMPARAÇÃO DOS OBJETOS DO ESTUDO

Descrição dos Produtos estudados

BIG BAG FABRICADO A PARTIR DE RESINAS VIRGEM E RECICLADA DE PP

Massa unitária: 1,71 kg de PP virgem e/ou reciclado (PCR)

Materiais: polipropileno virgem e/ou reciclado (PCR)

Escopo geográfico: Brasil

EXTRAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA: A nafta é a principal matéria-prima utilizada para a fabricação do propeno, sendo obtida a partir do refino do petróleo. O Brasil importa grande parte da nafta utilizada na produção dos petroquímicos, o maior volume possui como origem países africanos, e o volume restante é obtido principalmente de países europeus e das américas.

CRAQUEAMENTO E POLIMERIZAÇÃO: A nafta chega até a indústria do plástico por cabotagem e também graças ao modal rodoviário. E assim, o craqueamento torna-se responsável por entregar hidrocarbonetos menos complexos como o propeno ao processo industrial seguinte. Usualmente, as unidades de craqueamento estão integradas com as plantas de polimerização, que, com o emprego de diversos químicos, formarão cadeias poliméricas a partir dos monômeros resultantes dos *crackers*. O polipropileno é então transportado via caminhões para a indústria de embalagens.

RECICLAGEM DAS RESINAS PÓS-CONSUMO: A cadeia da reciclagem inicia-se com a coleta dos big bags descartados e transporte até as recicladoras. O processo mecânico de reciclagem consiste na picagem dos big bags em pequenas tiras, as quais são submetidas ao sistema de lavagem para remoção de impurezas. Após a secagem, ocorre a extrusão do material na forma de pellets (pequenos segmentos plásticos). Os rejeitos resultantes do processo de reciclagem são destinados para disposição final em aterro, o efluente gerado é tratado e o lodo resultante também segue para disposição final em aterro.

TRANSFORMAÇÃO: O polímero (virgem e reciclado) chega aos transformadores na forma de pellets, que serão aquecidos até a temperatura ideal para serem extrudados em filamentos de PP. Neste processo, alguns aditivos são incorporados na formulação⁴. A concepção da embalagem possui variadas configurações para atender às necessidades dos diversos mercados de atuação: fertilizantes, sementes e grãos, químicos e petroquímicos, mineração e alimentício.

DISTRIBUIÇÃO E ENVASE: Estando finalizados, os big bags são agrupados em pallets, com o uso de filmes termoencolhíveis ou fitilhos, e preparadas para a distribuição aos diferentes mercados. Feito o envase, novo processo de transporte até o cliente final.

DISTRIBUIÇÃO, USO E DESCARTE: Ao cumprir a função de acondicionar determinado produto, os big bags podem ser reutilizados até que se tornem inservíveis ou descartados logo após o seu uso. Os big bags descartados podem ser reciclados ou integradas ao cenário de resíduos comum do Brasil, o qual compreende a disposição final em aterros e lixão.

⁴ Os aditivos utilizados estão descritos no Anexo D. Em geral, eles são utilizados para colorir ou atribuir alguma propriedade específica aos produtos plásticos.

BIG BAG FABRICADO A PARTIR DE RESINAS VIRGEM E RECICLADA DE PET

Massa unitária: 1,71 kg de PET virgem e/ou reciclado (PCR)

Materiais: polietileno tereftalato virgem e/ou reciclado (PCR)

Escopo geográfico: Brasil

EXTRAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA: A nafta é a principal matéria-prima utilizada para a fabricação do eteno e do ácido tereftálico purificado (PTA)⁵, sendo obtida a partir do refino do petróleo.

CRAQUEAMENTO E POLIMERIZAÇÃO: A nafta chega até a indústria do plástico por cabotagem e também graças ao modal rodoviário. E assim, o craqueamento torna-se responsável por entregar hidrocarbonetos menos complexos como o eteno e o para-xileno ao processo industrial seguinte. O PET é produzido em duas fases, sendo a principal via química a esterificação direta do PTA com etileno glicol (EG)⁶. Na primeira fase, o PET amorfo é obtido pela polimerização no estado líquido, obtendo-se o monômero bis-2-hidroxietil-tereftalato (BHET). Este monômero é transferido para a polimerização onde ocorre a policondensação líquida. O polímero amorfo é retirado do polimerizador, resfriado, solidificado, granulado e então armazenado. Na segunda fase, recorre-se a uma segunda etapa de polimerização, utilizando a pós-condensação no estado sólido, a fim de aumentar a viscosidade. A resina é então embalada e transportada via caminhões para a indústria de embalagens.

RECICLAGEM DAS RESINAS PÓS-CONSUMO: A cadeia da reciclagem inicia-se com a coleta e triagem das embalagens descartadas, principalmente garrafas, e transporte até as recicladoras. O processo mecânico de reciclagem consiste na transformação das garrafas pós-consumo em *flakes*, o que inclui etapas de lavagem e trituração. Após a secagem, ocorre a extrusão do material na forma de pellets (pequenos segmentos plásticos). Os rejeitos resultantes do processo de reciclagem são destinados para disposição final em aterro, o efluente gerado é tratado e o lodo resultante também segue para disposição final em aterro.

TRANSFORMAÇÃO: O polímero (virgem e reciclado) chega aos transformadores na forma de pellets, que serão aquecidos até a temperatura ideal para serem extrudados em filamentos de PET. A concepção da embalagem possui variadas configurações para atender às necessidades dos diversos mercados de atuação.

DISTRIBUIÇÃO E ENVASE: Estando finalizados, os big bags são agrupados em pallets, com o uso de filmes termoencolhíveis ou fitilhos, e preparadas para a distribuição aos diferentes mercados. Feito o envase, novo processo de transporte até o cliente final.

DISTRIBUIÇÃO, USO E DESCARTE: Ao cumprir a função de acondicionar determinado produto, os big bags podem ser reutilizados até que se tornem inservíveis ou descartados logo após o seu uso. Os big bags descartados podem ser reciclados ou integradas ao cenário de resíduos comum do Brasil, o qual compreende a disposição final em aterros e lixão.

⁵ O PTA tem sua origem a partir da oxidação do para-xileno.

⁶ O PET também pode ser produzido a partir da transesterificação do dimetil tereftalato (DMT) com EG. No entanto, esta segunda rota não foi considerada neste estudo. A rota de produção do PET disponível na base de dados ecoinvent v3.8 considera a esterificação direta do PTA com etileno glicol, principal meio de obtenção do PET atualmente.

De forma resumida, a Tabela 1 traz maiores detalhes acerca dos sistemas de produto, que perfazem o **Cenário Base** do estudo e que possuem as mesmas propriedades técnicas, como nível de durabilidade e resistência. Apesar da ausência de estimativa sobre índice de perdas e desperdício de matérias durante o armazenamento e transporte, pode-se presumir que as quatro alternativas de big bass avaliadas possuem comportamentos iguais sobre esses aspectos.

TABELA 1. ASPECTOS DIVERSOS SOBRE OS SISTEMAS DE PRODUTO

Características	Big bag de PP virgem e reciclado	Big bag de PP virgem	Big bag de PET reciclado	Big bag de PET virgem
Composição	49% PP virgem 45% PP-PCR 6% Aditivos	90% PP virgem 10% Aditivos	100% PET-PCR	100% PET virgem
Natureza	Não-renovável			
Capacidade	1000 kg			
Impressão	Não considerada ⁷			
Massa total	1,7074 kg			
Reciclagem pós-consumo ⁸	23,1%			
Destinação Final ⁹	Cenário de resíduos sólidos do Brasil: 60,2% disposição final adequada (aterros sanitários) e 39,8% disposição final inadequada (aterros controlados e lixões).			

A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam a origem dos dados para os sistemas de produto. Os dados primários e os dados secundários foram conectados com a base de dados ecoinvent v3.8, com exceção dos dados da produção da resina virgem de PP (conectada com a base de dados ecoinvent v3.1)¹⁰. Informações adicionais sobre origem e conexões com a base de dados são apresentadas no Anexo D.

⁷ O processo de impressão foi desconsiderado, pois é semelhante para os quatro tipos de big bags avaliados.

⁸ Com base nos dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem [CEMPRE, 2020].

⁹ Com base no Panorama de Resíduos Sólidos [ABRELPE, 2022]. O cenário de reuso não foi considerado neste estudo, pois considera-se que todos os sistemas de produtos avaliados teriam taxas iguais de reuso.

¹⁰ O estudo da Braskem foi concluído em 2017 e, portanto, elaborado com a base de dados ecoinvent v3.1. Até o momento, não há previsão para atualização do estudo para uma base mais recente. No entanto, não se espera uma alteração significativa dos resultados, já que o processo de produção do PP é bem consolidado.

TABELA 2. ORIGEM DOS DADOS PARA O BIG BAG DE PP VIRGEM E RECICLADO (CENÁRIO BASE)

Estágios do Produto	Big bags de PP virgem e reciclado
Produção da resina virgem de PP	Dados primários fornecidos pela Braskem, referentes ao ano base 2017 e conectados com a base de dados ecoinvent v3.1 ¹⁰ . Os dados incluem desde a extração de petróleo até a obtenção da resina de PP, incluindo as etapas de transporte.
Produção da resina reciclada de PP	Dados primários coletados em uma recicladora responsável pelo fornecimento de resina reciclada para Embrasa, referentes ao ano base 2021 e conectados com a base de dados ecoinvent v3.8.
Produção dos aditivos	A composição dos aditivos foi obtida nas Fichas de Segurança de Produtos Químicos (FISPQs) e as substâncias reportadas foram conectados com a base de dados ecoinvent v3.8.
Transporte das resinas de PP e dos aditivos	Dados primários das distâncias entre os fornecedores até a Embrasa, referentes ao ano base 2021 e conectados com a base de dados ecoinvent v3.8.
Produção do big bag de PP	Dados primários da formulação dos big bags e dos consumos de energia elétrica e água reportados pela Embrasa (Artur Nogueira, SP), referentes ao ano base 2021 e conectados com a base de dados ecoinvent v3.8.
Transporte até consumidor final	Adotou-se a distância média de 250 km para distribuição dos big bags até o local de envase.

TABELA 3. ORIGEM DOS DADOS PARA O BIG BAG DE PET UTILIZADOS NESTE ESTUDO (CENÁRIO BASE)

Estágios do Produto	Big bags de PET virgem e reciclado
Produção da resina virgem de PET	Dados secundários obtidos na base de dados ecoinvent v3.8. Os dados incluem desde a extração de petróleo até a obtenção da resina de PET, incluindo as etapas de transporte.
Produção da resina reciclada de PET	Dados secundários reportados por [Gileno, 2020], referentes ao processo de reciclagem do Brasil, conectados com a base de dados ecoinvent v3.8.
Transporte das resinas de PET	Dados primários das distâncias entre o potencial fornecedor de PET virgem e reciclado até a Embrasa, conectados com a base de dados ecoinvent v3.8.
Produção do big bag de PET	Dados primários da formulação dos big bags e dos consumos de energia elétrica e água estimados pela Embrasa (Artur Nogueira, SP), referentes ao ano base 2021 e conectados com a base de dados ecoinvent v3.8.
Transporte até consumidor final	Adotou-se a distância média de 250 km para distribuição dos big bags até o local de envase.

Sistemas dos produtos e Fronteiras

A Figura 3 representa os sistemas de produto que objetivam a produção de diferentes opções de big bags, seguindo a fronteira do berço ao túmulo. Destaca-se que os encargos ambientais associados ao envase e uso foram excluídos devido à similaridade entre os sistemas de produto.

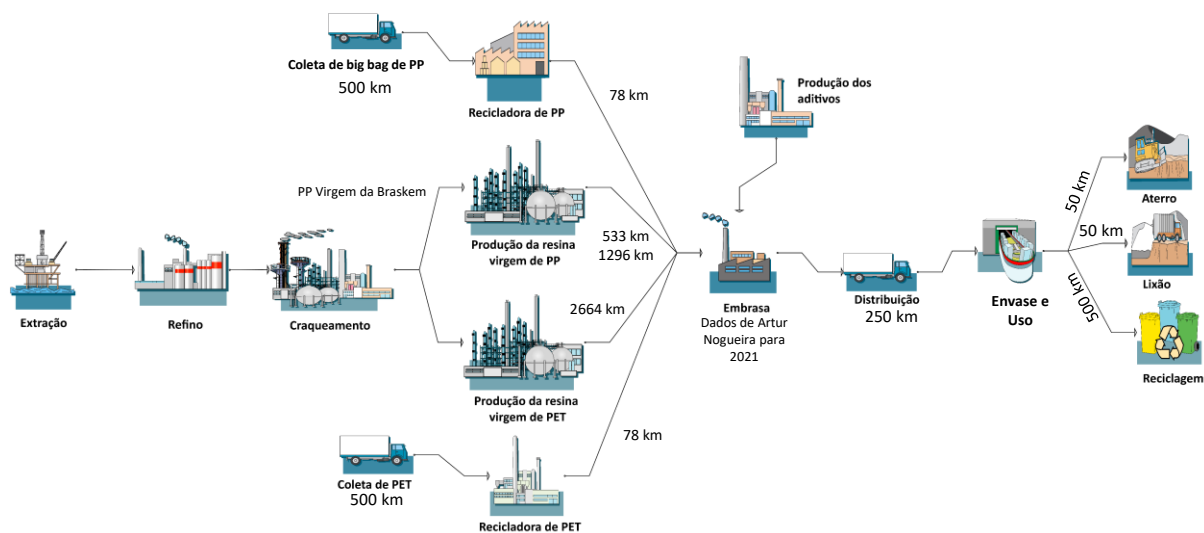


FIGURA 3. ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS SISTEMAS DE PRODUTO DE BIG BAGS¹¹

As distâncias indicadas na figura acima foram obtidas a partir das seguintes premissas:

- Distância de 500 km estimada para a coleta dos resíduos pós-consumo de PP e PET e transporte até as recicladoras. Atualmente, a distância média de coleta dos big bags de PP é de 150 km. No entanto, estima-se que futuramente o raio de coleta aumente, podendo alcançar distâncias entre 1000 e 1500 km. Segundo [Gileno, 2020], a distância média de transporte dos fardos de PET até as recicladoras é de 750 km. Este estudo adotou a distância de 500 km para a coleta dos resíduos de PP e PET a fim de considerar o cenário mais conservador para o PP, já que dados secundários estão sendo utilizados para o PET.
- A Embrasa possui dois fornecedores diferentes de PP, cujas distâncias são de 533 km e 1296 km. As duas distâncias foram consideradas, de acordo com a quantidade de PP obtida de cada localização. Vale ressaltar que ambos os fornecedores comercializam a resina produzida pela Braskem.
- A distância de transporte da resina virgem de PET até a Embrasa (2664 km) foi estima considerando a localização do produtor atual de PET na região Nordeste do Brasil.
- O transporte da resina reciclada (PCR) de PP até a Embrasa é de 78 km, assumiu-se a mesma distância para o transporte de resina reciclada (PCR) de PET.
- A distância de distribuição do big bag até o envase foi estimada em 250 km.

¹¹ Apesar de não ilustradas na Figura, todas as etapas de transportes entre a extração do petróleo e obtenção das resinas de PP e de PET também são consideradas no estudo.

- A distância entre o local de uso até o cenário de disposição final (aterros e lixão) foi estimada em 50km. Para a distância até a reciclagem, assumiu-se a mesma distância da coleta dos big bags de PP (500 km).

Procedimentos de Alocação e Fim de Vida

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14044, alocação é a repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto [ABNT, 2009b].

Preferencialmente, evita-se o uso de alocações por meio da divisão dos processos elementares a serem alocados em dois ou mais subprocessos e coleta dos dados de entrada e saída relacionados a esses subprocessos [ABNT, 2009b]. Assim, seguindo indicações normativas, os dados foram coletados junto à Embrasa em nível de processo elementar evitando-se, portanto, procedimentos de alocação de coprodutos.

Na modelagem do ciclo de vida das resinas virgens, o procedimento de alocação foi necessário nos processos de craqueamento da nafta e gás natural. Além do propeno e eteno, o craqueamento da nafta produz benzeno, butadieno, tolueno, xilenos, buteno e outros compostos. Já o craqueamento do gás natural, produz apenas eteno e propeno. A proporção de cada uma dessas frações foi baseada em dados primários da Braskem para a resina de PP e dados secundários da base de dados ecoinvent v3.8 para o PET. O procedimento de alocação foi realizado em base mássica para os produtos principais de acordo com as recomendações da [PlasticsEurope, 2017].

Para a etapa de fim de vida, os procedimentos de alocação muitas vezes são inevitáveis. O processo de reciclagem ou reuso das embalagens evita, em certa extensão, a produção de materiais virgens, mesmo computando-se a menor qualidade dos reciclados. Neste estágio do ciclo de vida, dois sistemas mesclam-se: aquele sob escopo deste Relatório e outro que acaba por utilizar o material pós-consumo. É preciso decidir, portanto, a qual deles serão relacionados os créditos e pesos do processo de reciclagem e em qual percentual, como pode ser visto no exemplo abaixo (Figura 4).

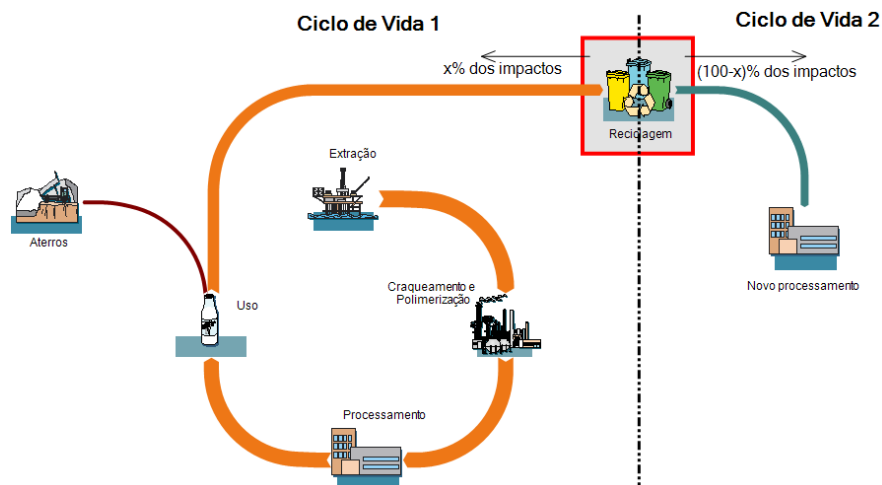


FIGURA 4. EXEMPLO DE ILUSTRAÇÃO SOBRE COMO LIDAR COM PESOS E CRÉDITOS DA RECICLAGEM

As diretrizes gerais das Regras de Categoria de Pegada Ambiental de Produtos (PEFCR, na sigla em inglês)¹² utiliza uma equação especial para tais casos [EC, 2018], denominada Fórmula de Pegada Circular. A fórmula abaixo considera parâmetros como fatores de alocação para pesos e créditos, qualidade de material reciclado e a reciclagem em sistemas antecessores e respectivos efeitos.

$$MR^{13} = (1 - R_1)E_V + R_1 * \left(AE_{reciclado} + (1 - A)E_V * \frac{Q_{Sin}}{Q_P} \right) + (1 - A)R_2 * (E_{reciclagemFdV} - E_V^* \frac{Q_{Sout}}{Q_P})$$

em que:

R_1 representa a proporção de conteúdo de reciclado presente no material de entrada do primeiro sistema.

E_V representa emissões específicas e consumo de recursos (por unidade de análise) provenientes da produção do material virgem.

A representa o fator de alocação de pesos e créditos entre provedor e beneficiário de materiais reciclados (explicação mais adiante).

$E_{reciclado}$ representa emissões específicas e consumo de recursos (por unidade de análise) provenientes do processo de reciclagem do conteúdo de reciclado no primeiro sistema, incluindo coleta, triagem e etapas de transporte.

Q_{sin} representa a qualidade do material secundário que entra no segundo sistema, i.e. a qualidade do material reciclado no ponto de substituição (definido como 1, significando não ocorrerem perdas devido à baixa qualidade. Pode variar de 0 a 1).

Q_p representa a qualidade do material primário, i.e. a qualidade do material virgem (definida como 1, significando não ocorrerem perdas devido à baixa qualidade. Pode variar de 0 a 1).

¹² Almejando promover maior nível de harmonização entre estudos, Regras de Categoria de Pegada Ambiental de Produtos (PEFCR) foram desenvolvidas pela União Europeia com o consenso de cientistas e empresas.

¹³ MR = Material Recycling.

R_2 representa a proporção de conteúdo de reciclado que será usado no material do segundo sistema.

$E_{reciclagemFdv}$ representa emissões específicas e consumo de recursos (por unidade de análise) provenientes da reciclagem no fim de vida do primeiro sistema, incluindo coleta, triagem e etapas de transporte.

E_v^* representa emissões específicas e consumo de recursos (por unidade de análise) provenientes da produção do material a ser substituído no segundo sistema pelos recicláveis do primeiro.

Q_{Sout} representa a qualidade do material secundário que sai do primeiro sistema, i.e. a qualidade do material reciclável no ponto de substituição (se definido como 0,5¹⁴, significa ocorrerem perdas devido à baixa qualidade. Pode variar de 0 a 1).

Impactos devidos à fase de fim de vida são assim estimados a partir da soma dos termos da equação acima e do perfil ambiental dos resíduos remanescentes não desviados de aterros ou tratamentos similares.

De acordo com [EC, 2018], há uma configuração pré-determinada de parâmetros a serem usados na Fórmula de Pegada Circular, sendo que muitos dos quais são fixados em estudos de Pegada Ambiental de Produtos da União Europeia. O fator A, por exemplo, para plásticos é definido como 0,5, representando um equilíbrio entre oferta e demanda de materiais reciclados. Estabelecê-lo exatamente na média dos extremos é o mesmo que supor que pesos e créditos da reciclagem são igualmente divididos entre o ciclo de vida usando o material recém-reciclado e aquele que originou o resíduo recuperado.

Para papel de embalagem, considera-se um cenário em que há uma oferta de recicláveis menor que a demanda, resultando em um fator de 0,2. Além dos valores supramencionados, há também o patamar de 0,8, indicando alta oferta de recicláveis, mas baixa demanda.

Na situação de que exista reciclagem na destinação do produto já reciclado (segundo ciclo de vida), há que se estabelecer a abordagem de limite (cut-off). Do contrário, no cálculo dos resultados, seriam gerados loopings indefinidos de créditos e pesos associados ao primeiro ciclo de vida, o que pode influenciar os números finais.

No cenário base, os seguintes valores foram adotados:

- $R_1 = 0; 0,50$ ou 1
Valor definido de acordo com o conteúdo de resina reciclada na composição do big bag.
- $R_2 = 0,231$
Taxa de reciclagem para os plásticos em geral no Brasil [CEMPRE, 2020].

¹⁴ Este fator, também chamado de *downgrade factor*, será alterado para os diferentes materiais e em Análises de Sensibilidade (quando necessário).

- **A = 0,50**

Valor padrão para o PP e PET de acordo com [EC, 2018]. Os resultados obtidos a partir do fator A igual a 1 (cut-off) são apresentados como informação adicional no Anexo E.

- **$Q_{\text{sout}}/Q_p = 0,9$ para PP e 1 para PET**

Valores padrão de acordo com [EC, 2018]. Para o PET, valor é definido como 1 devido ao processo de pós-condensação no estado sólido (SSP).

Categorias e Método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

De acordo com o objetivo e escopo do estudo, entende-se que a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) deva avançar até a caracterização fornecendo os indicadores de categoria (perfil ambiental) para ambos os produtos sob análise.

Assim, foi utilizado um método compilado pela ACV Brasil, que contempla as categorias: Mudanças Climáticas (kg CO₂ eq.), Depleção da Camada de O₃ (kg CFC-11 eq.), Inorgânicos Inaláveis (kg PM_{2,5} eq.), Oxidação Fotoquímica (kg NMVOC eq.), Acidificação (kg de SO₂ eq.), Uso da Água (m³), Ocupação do Solo (m².a), Recursos Minerais (kg de Sb eq.), Eutrofização (kg de PO₄--- eq.), Combustíveis Fósseis (MJ), Toxicidade Humana Câncer|Não Câncer (CTUh) e Ecotoxicidade (CTUe).

Esta compilação é uma combinação entre métodos renomados como CML, ILCD, USETox, ReCiPe e IPCC. Ressalta-se que o emprego de mais de um método de AICV é previsto e bastante comum em estudos do gênero. Doravante, esta compilação de categorias será denominada “Método de AICV”. Mais informações podem ser encontradas no Anexo A – Apresentação de Método Recomendado.

Pressupostos e Limitações

Com o intuito de proporcionar transparência às avaliações em discussão, destacam-se as suposições e limitações, abaixo:

- Para qualquer informação ausente em todos os sistemas de produto, foi utilizada a base de dados ecoinvent v3.8, adaptando-se, sempre que possível, dados da matriz elétrica para o país de referência. O Anexo D apresenta mais informações sobre a origem dos dados e as conexões com a base de dados.
- Acidentes ambientais não são contabilizados.
- Aspectos sociais não são considerados na ACV ambiental.
- Poluição visual e ruídos não são considerados.
- A avaliação considera apenas os sistemas dos produtos avaliados, outros aspectos relacionados à organização e infraestrutura da empresa não são considerados.

- vi. Nenhum fator de caracterização de emissões de longo prazo é considerado, haja vista a alta incerteza atrelada a tais informações.

Qualidade dos dados e Sensibilidade

Diversas estimativas efetuadas ao longo da modelagem do ciclo de vida possuem determinado nível de incerteza. Pode-se, portanto, avaliar a influência de mudanças significativas nos valores destas escolhas sobre os resultados globais.

Para avaliação da qualidade dos dados, foi utilizada uma abordagem simplificada da Matriz de Pedigree, a qual inclui uma avaliação qualitativa de indicadores de qualidade de dados.

No método utilizado neste estudo, cada processo elementar é classificado de acordo com cinco características: confiança, representatividade, correlação temporal, correlação geográfica e correlação tecnológica.

Tais características são divididas em cinco níveis de qualidade com pontuações entre 1 e 5. Nesse sentido, um conjunto de cinco indicadores de pontuação é atribuído individualmente para fluxos de entrada e saída (exceto para o referido produto).

Assim, os dados serão classificados em três níveis de qualidade, a saber, baixa, média e alta. Somando-se os valores atribuídos de acordo com matriz pedigree, obtém-se a seguinte estrutura para a gama de dados utilizados, conforme [Weidema e Wesnaes, 1996]:

TABELA 4. FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS

Nível de Qualidade dos dados	Somatório de índices
Baixo	De 19 a 25
Médio	De 12 a 18
Alto	De 5 a 11

A qualidade dos dados utilizados nos modelos computacionais é também aferida, até certo grau, por meio das Análises de Sensibilidade efetuadas no estudo, pois almejam identificar variações abruptas nos resultados quando da alteração dos parâmetros definidos.

Utilizando-se a Matriz de Pedigree e a Análise de Sensibilidade, pretende-se minimizar os efeitos decorrentes da assimetria na qualidade dos dados. Esta avaliação deve ser interpretada e refletida nas conclusões do estudo. O Anexo C apresenta a análise da qualidade dos dados dos sistemas de produto avaliados neste estudo.

Análise Crítica

A análise crítica é o processo que visa assegurar a consistência entre uma avaliação do ciclo de vida e os princípios e requisitos das normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, com o objetivo de facilitar o entendimento e aumentar a credibilidade da ACV.

A análise crítica interna deste estudo ocorreu em duas fases: após a definição do objetivo e do escopo e na disponibilização do relatório final. O processo interno visou assegurar que (i) os métodos utilizados para conduzir a ACV são consistentes com as normas mencionadas anteriormente e possuem validade científica e técnica; (ii) os dados utilizados são apropriados e razoáveis em relação ao objetivo do estudo; (iii) as interpretações refletem as limitações identificadas e o objetivo do estudo, e (iv) o relatório é transparente e consistente.

A análise crítica deste estudo foi realizada por Tiago Barreto Rocha, especialista interno e membro da empresa condutora do estudo (ACV Brasil), e a verificação externa do relatório final, considerando os requisitos das normas ABNT NBR 14040 e 14044, foi realizada pela KPMG Auditores Independentes Ltda. O Relatório de Análise Crítica está disponível ao final deste relatório.

Inventário do Ciclo de Vida

A qualidade de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida está intrinsecamente relacionada à qualidade dos dados coletados, que deve ser avaliada considerando aspectos de: confiabilidade, representatividade e correlação temporal, geográfica e tecnológica.

Para modelagem do sistema de produção dos big bags de PP virgem e reciclado, foram utilizados dados primários coletados pela Embrasa, considerando as formulações dos big bags, os consumos de energia elétrica e água no processo de extrusão. A Embrasa também intermediou a coleta de dados primários da produção das resinas virgens e recicladas de PP, através de consultas aos fornecedores destas matérias-primas.

A biblioteca de inventários ecoinvent v3.8 foi utilizada para representar os processos produtivos dos materiais auxiliares (aditivos, por exemplo), etapas de transporte e eletricidade. A biblioteca de inventários mencionada é internacionalmente reconhecida pela quantidade e qualidade dos seus dados. Sabe-se que, na ausência de inventários nacionais, a substituição por dados internacionais pode acarretar indefinições a determinados espectros dos resultados. Entretanto, acredita-se que a consistência e precisão do ecoinvent tornam esta opção admissível. Além disto, embora esta biblioteca seja de origem europeia, ela também contém informações representando muitas regiões do mundo, inclusive da América do Sul. Por exemplo, está incluída a rede elétrica brasileira mista.

Os dados coletados pela Embrasa foram reportados em documentos eletrônicos, na forma de planilhas¹⁵. Para validação dos dados recebidos em planilha eletrônica, foram feitas análises das unidades e balanços de massa. Não foi aplicado critério de corte para os inventários. Não houve necessidade de regras mais detalhadas para agregação dos dados.

Para a modelagem do sistema de produção dos big bags de PET virgem e reciclado, foram utilizados dados secundários. A formulação dos big bags, consumos de água e de energia elétrica para produção foram informados pela Embrasa, com base nas especificações técnicas dos equipamentos. Dados da produção do PET virgem foram obtidos na base de dados ecoinvent v3.8 e os dados da reciclagem do PET foram baseados no estudo elaborado por [Gileno, 2020].

O Anexo D apresenta o detalhamento dos dados de inventário e conexões com a base de dados ecoinvent v3.8 para os dois sistemas de produto sob análise.

¹⁵ O conjunto de dados de inventário da produção da resina virgem de PP foi fornecido pela Braskem no formato de um dataset *System*, a fim de garantir a confidencialidade dos dados.

Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

A Avaliação do Impacto classifica e combina, pelo tipo de impacto que um aspecto causa no meio ambiente, os fluxos de materiais, energia e emissões que entram e saem de cada sistema de produção.

O método de AICV utilizado para quantificar o impacto ambiental dos sistemas de produtos em análise é o Método AICV exposto em

Categorias e Método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida. Como informado, ele é uma compilação entre diversos modelos conceituados em estudos do ramo como CML, IPCC, ReCiPe, ILCD e USETox. A Figura 5 expõe o método empregado no estudo.

A abordagem do Método AICV é orientada ao ponto intermediário no mecanismo ambiental, ou seja, ao impacto antes da produção de um efeito que afete a Saúde Humana ou a Qualidade do Ecossistema, por exemplo. Esta etapa intermediária de modelos de AICV é caracterizada pelas Categorias de Impacto.

Para cada categoria, existe um elemento de caracterização definido, servindo como base comparativa para os demais fluxos. Desta forma, uma emissão identificada no ICV é convertida em uma contribuição para este “problema ambiental”, multiplicando-a por um fator de equivalência, denominado fator de caracterização, que é exatamente a comparação entre o elemento escolhido e o potencial de impacto do fluxo em questão. Tome-se como exemplo o CO₂, tem-se ele como base de comparação para as Mudanças Climáticas e faz-se a conversão das demais substâncias causadoras deste efeito em equivalentes de CO₂, por meio deste procedimento comparativo.

Não foi realizado, portanto, nenhum agrupamento de categorias de impacto.

FIGURA 5. QUADRO EXPLICATIVO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO E EM NÍVEL DE INVENTÁRIO CONSIDERADAS

MÉTODO AICV (categorias relacionadas a emissões)	
MUDANÇAS CLIMÁTICAS (kg CO ₂ eq)	As Mudanças Climáticas estão relacionadas ao impacto de emissões, denominadas emissões de gases de efeito estufa, no forçamento radiativo da atmosfera. Os fatores de caracterização (em kg equivalentes de dióxido de carbono (CO ₂)/kg de emissão) são expressos como potencial de aquecimento global para um horizonte de tempo de 100 anos a partir de [IPCC, 2007], que representa modelo robusto e bem documentado e alcança alto grau de consenso entre a comunidade científica, sendo recomendado pelo <i>Handbook</i> do ILCD [ILCD 2011].
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE O₃ (kg CFC-11 eq)	Representa o impacto na atmosfera da Terra, que leva à decomposição de moléculas de ozônio naturalmente presentes, perturbando o equilíbrio molecular na estratosfera. A consequência desse desequilíbrio é que uma maior quantidade de radiação UV-B atinge a superfície da Terra, causando danos a recursos naturais e à saúde humana. Os fatores de caracterização são aplicados nesta categoria com base em [WMO 2010], um método robusto, atualizado e amplamente aceito pela comunidade científica, sendo também recomendado pelo <i>Handbook</i> do ILCD [ILCD 2011]. Os fatores definem potenciais de depleção do ozônio (ODP) de diferentes gases (kg equivalente de CFC-11/kg de emissão).
ACIDIFICAÇÃO (kg SO ₂ eq)	A acidificação afeta ecossistemas aquáticos e terrestres, alterando o equilíbrio ácido-básico através da entrada de substâncias acidificantes. O Potencial de Acidificação (expresso como kg equivalentes de dióxido de enxofre (SO ₂)/kg de emissão) é aplicado aqui como o fator de caracterização, com base em [CML, 2001]. O método CML é bem documentado e inclui as substâncias mais importantes para a acidificação. Fatores de caracterização genéricos são utilizados, com base em [Heijungs, 1992] e atualizações de [Hauschild e Wenzel, 1998].
EUTROFIZAÇÃO (kg PO ₄ --- eq)	Eutrofização inclui os impactos devido a níveis excessivos de macronutrientes em ecossistemas. Compostos contendo nitrogênio e fósforo estão entre os mais eutrofizantes. A eutrofização deve ser diferenciada em função do meio intermediário em que ocorre. O potencial de eutrofização de emissões para o ar e para a água é usado como fator de caracterização, com base em [CML, 2001].

FIGURA 5. QUADRO EXPLICATIVO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO E EM NÍVEL DE INVENTÁRIO CONSIDERADAS (CONT.)

MÉTODO AICV (categorias relacionadas a emissões)	
TOXICIDADE HUMANA CÂNCER E NÃO CÂNCER (CTUh)	Toxicidade humana inclui impactos das emissões para o ar, água e solo que ameaçam a saúde humana. A toxicidade depende do destino ambiental das substâncias, da exposição dos seres humanos à substância e dos efeitos causados por essas substâncias para os seres humanos. Para essa categoria, a toxicidade ainda é dividida em efeitos tóxicos que causam câncer e efeitos tóxicos, mas não causadores de câncer. Esta categoria inclui impactos de agentes tóxicos, com base em dados obtidos a partir de estudos de laboratório. Fatores de caracterização são de USEtox [Rosenbaum <i>et al.</i>, 2008], expressos como CTU (escores de impacto de toxicidade em humanos em unidades tóxicas comparativas) que proporcionam o aumento estimado da morbidade na população humana global por unidade de massa de uma substância química emitida. Este método é robusto, bem documentado, transparente e apresenta escopo global, sendo também recomendado pelo Handbook do ILCD [ILCD 2011].
ECOTOXICIDADE (CTUe)	A ecotoxicidade inclui impactos gerados por emissões para o ar, água e solo que ameaçam a saúde das espécies. A toxicidade depende do destino ambiental das substâncias, da exposição de espécies às substâncias e dos efeitos causados por essas substâncias à espécie. Os fatores de caracterização são retirados também de USEtox [Rosenbaum <i>et al.</i>, 2008] e expresso em unidades tóxicas comparativas (CTU), fornecendo uma estimativa da fração potencialmente afetada de espécies integrada ao longo do tempo e do volume por unidade de massa de uma substância química emitida.
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA (kg NMVOC eq)	A formação de ozônio fotoquímico é a criação fotoquímica de substâncias reativas (principalmente de ozônio) que afetam a saúde humana e os ecossistemas. Este ozônio ao nível do solo é formado na atmosfera por óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, na presença de luz solar. São calculados potenciais de criação de ozônio fotoquímico para emissão de substâncias para o ar com base em [Van Zelm <i>et al.</i>, 2008] e expressos em kg equivalente de Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metano (NMVOC).
INORGÂNICOS INALÁVEIS (kg PM 2,5 eq)	Esta categoria abrange os efeitos de partículas finas primárias e secundárias, para as quais já foi demonstrada correlação com doenças respiratórias por estudos epidemiológicos. Partículas finas secundárias são quantificadas e agregadas com partículas finas primárias como PM 2,5 equivalentes (<i>Particulate Matter</i>). Os fatores de caracterização são aplicados a partir de [Humbert <i>et al.</i>, 2009].

FIGURA 5. QUADRO EXPLICATIVO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO CONSIDERADAS (CONT.)

MÉTODO AICV (categorias relacionadas a consumo)	
RECURSOS MINERAIS (kg Sb eq)	Este indicador de categoria de impacto está relacionado com a extração de minerais que entram no ecossistema. O fator de depleção dos recursos é determinado para cada extração de minerais (kg equivalentes de antimônio (Sb)/kg de extração) baseado nas suas reservas e taxa de extração. É obtido com base em [CML, 2001], método bem documentado e robusto, relativamente completo para depleção de minerais, sendo recomendado pelo Handbook do ILCD [ILCD 2011].
COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS (MJ)	Este indicador de categoria de impacto está relacionado com consumo de combustíveis fósseis que entram no ecossistema. O fator de consumo dos recursos é determinado para cada extração de combustíveis em MJ. É obtido com base em [CML, 2001], método bem documentado e robusto, relativamente completo para consumo de combustíveis fósseis, sendo recomendado pelo Handbook do ILCD [ILCD 2011].
MÉTODO RECOMENDADO (categorias a nível de inventário)	
OCUPAÇÃO DO SOLO (m ² .a)	A categoria de impacto Ocupação do Solo reflete a demanda por e a escassez para utilização de áreas disponíveis para exploração e desenvolvimento das atividades econômicas. Os fatores de caracterização, expressos em m ² .ano, são retirados do ReCiPe [Goedkoop <i>et al.</i> , 2009].
USO DA ÁGUA (m ³)	Considerando-se a diminuição da disponibilidade mundial de água doce e da escassez de água em muitas partes do mundo, extrair água em uma área muito seca pode causar danos significativos aos ecossistemas e à saúde humana. No entanto, até agora não há modelos disponíveis para exprimir os danos em nível de ponto final. Fatores em nível de inventário, apenas expressando a quantidade total de água utilizada, são tomados a partir do ReCiPe [Goedkoop <i>et al.</i> , 2009], representados em m ³ .

Os cálculos foram executados com SimaPro®, software líder em ACV. Nenhuma normalização ou ponderação de dados foi executada para que se evitassem comparações de impacto entre as categorias.

Análises de Sensibilidade

Análises de Sensibilidade exercem papel fundamental em estudos de ACV, pois contribuem para a minimização dos efeitos das incertezas, relacionadas a parâmetros ou mesmo dados, sobre os resultados. Dessa forma, foram realizadas duas análises de sensibilidade para verificar a influência das seguintes escolhas:

- I. Distância de transporte da coleta dos resíduos pós-consumo (PP e PET);
- II. Consumo de eletricidade na etapa de reciclagem dos big bags de PP;
- III. Método de avaliação de impacto do ciclo de vida.

Análises de Cenários

As análises de cenários têm o objetivo de avaliar o efeito de possíveis modificações em alguns parâmetros, as quais possuem menor probabilidade de ocorrer. Os cenários analisados foram os seguintes:

- I. Conteúdo de resina PCR na composição dos big bags de PP e de PET;
- II. Taxa de reciclagem dos big bags de PP e de PET.

Resultados

As informações fornecidas nesta seção devem ser usadas somente dentro dos limites de contexto deste estudo, considerando-se respectivas limitações como descrito no item Pressupostos e Limitações.

Deve-se enfatizar que os impactos descritos pela ACV são estimativas dos impactos potenciais em vez de medições diretas dos impactos reais.

Os tópicos apresentados abaixo estão segmentados em Perfil ambiental dos big bags de PP, Resultados Comparativos, Análises de Sensibilidade e Análises de Cenários. As Análises de Contribuição, material auxiliar para a compreensão deste Relatório, enfatizam as etapas do ciclo de vida que contribuem com 80% dos impactos para uma determinada categoria, conforme recomendado em [EC, 2018].

A. Perfil ambiental dos big bags de PP

Esta seção apresenta os resultados do estudo de ACV para os big bags produzidos pela Embrasa no ano base de 2021. O objetivo dos itens abaixo consiste em detalhar a análise de contribuição para cada uma das categorias de impacto avaliadas, a fim de indicar as principais oportunidades de melhoria no desempenho ambiental dos big bags considerando a perspectiva do ciclo de vida.

Big bag 100% PP virgem

A Figura 6 apresenta o perfil ambiental de uma unidade de big bag produzida com PP 100% virgem e aditivos, conforme descrito na Tabela 1. A Figura também apresenta a análise de contribuição, indicando os principais contribuintes para cada categoria de impacto avaliada.

De modo geral, nota-se que a produção do PP virgem¹⁶, produção dos aditivos e consumo de eletricidade na etapa de fabricação do big bag, são os principais responsáveis pelos impactos das categorias avaliadas. A reciclagem aparece destacada no eixo negativo do gráfico devido aos impactos evitados, pois ao reciclar o big bag evita-se a produção de resina virgem de PP.

¹⁶ A produção do PP virgem contempla os impactos ambientais desde a extração do petróleo até a obtenção da resina de PP, incluindo todas as etapas de transporte.

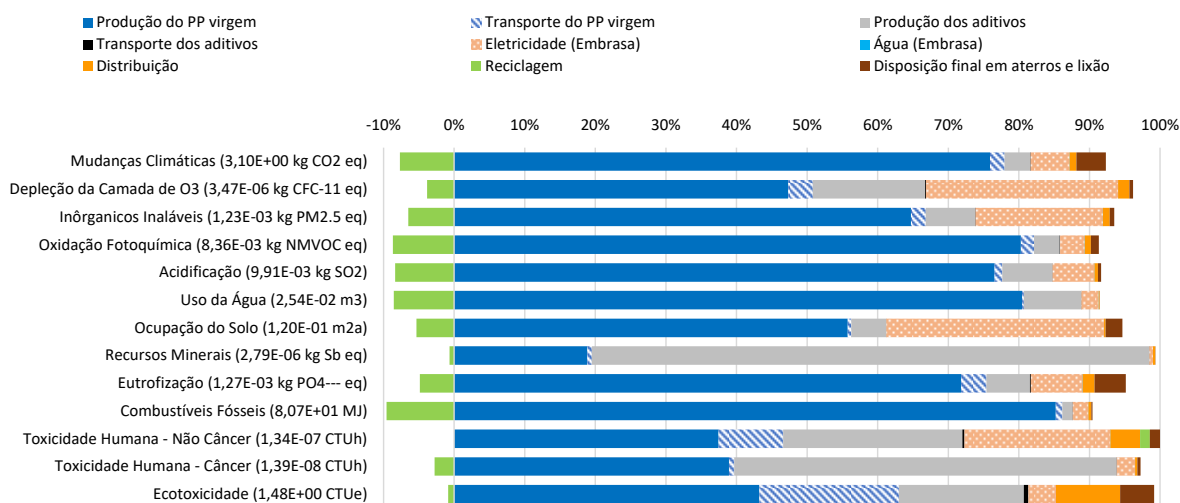


FIGURA 6. RESULTADOS E ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO PARA UMA UNIDADE DE BIG BAG COM 100% PP VIRGEM

A produção da resina virgem de PP contribui com quase 80% do impacto para **Mudanças Climáticas**, tendo como principais motivos a etapa de craqueamento da nafta para obtenção do propeno, além da produção da nafta a partir da extração e refino do petróleo¹⁷. Em contrapartida, a reciclagem do big bag promove a redução de aproximadamente 10% para esta categoria de impacto.

Para a categoria **Depleção da Camada de Ozônio**, os três principais contribuintes são a produção da resina de PP virgem (47%), consumo de eletricidade na produção do big bag (27%) e produção do aditivo anti-UV (16%). A obtenção da nafta é o principal motivo para o impacto da resina virgem de PP. As emissões monóxido de dinitrogênio (N₂O) oriundas da geração de energia a partir de termelétricas a gás natural¹⁸ são as principais justificativas para o impacto do consumo de eletricidade. A composição do aditivo anti-UV não está disponível na FISPQ da matéria-prima utilizada pela Embrasa, portanto, este aditivo foi representado por um conjunto de dados de inventário¹⁹ que representa o impacto médio da produção de químicos de natureza inorgânica. Sendo assim, o impacto deste aditivo possui incertezas associadas, as quais poderão ser solucionadas em estudos futuros, desde que a empresa fornecedora revele a composição do anti-UV.

As emissões de material particulado (MP) e de dióxido de enxofre (SO₂) são as principais causas do impacto para **Inorgânicos Inaláveis**. Essas emissões estão associadas

¹⁷ Conforme mencionado anteriormente, os dados de inventário da produção da resina virgem de PP foram fornecidos pela Braskem no formato *System*, impossibilitando a análise de contribuição para garantir a confidencialidade dos dados. Desta forma, as interpretações a respeito da resina virgem de PP realizadas neste estudo foram baseadas na literatura (relatórios da *PlasticsEurope*, por exemplo).

¹⁸ As termelétricas a gás natural correspondem a aproximadamente 10% do grid de energia elétrica da região sudestes do Brasil, segundo o conjunto de dados disponível na base de dados ecoinvent v3.8.

¹⁹ Nomenclatura do dataset selecionado da base de dados ecoinvent v3.8: Chemical, inorganic {GLO}| market for chemical, inorganic | Cut-off, U.

com a obtenção e transporte da nafta utilizada na produção da resina virgem de PP (65%). Além disso, o consumo de eletricidade também contribui para esta categoria de impacto (18%), principalmente, devido às emissões de MP na cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar²⁰.

A produção da resina virgem de PP representa 80% do impacto da categoria **Oxidação Fotoquímica**, devido às emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) ocorridas na obtenção da nafta durante a extração e refino do petróleo. A obtenção da nafta também é a principal contribuinte para a categoria **Acidificação**, principalmente, por causa das emissões de dióxido de enxofre (SO₂), sendo que as emissões de NOx também contribuem para esta categoria de impacto.

O **Uso da Água** no processo de produção do big bag refere-se à água de reposição no sistema de resfriamento, cujo indicador é de apenas 0,00853 litros por unidade de big bag, enquanto o uso de água na cadeia de suprimentos e demais etapas do ciclo de vida totaliza 25,42 litros por unidade de big bag. A produção da resina virgem de PP contribui com 80% do Uso da Água.

A categoria **Ocupação do Solo** é influenciada pela produção do PP virgem (56%) e consumo de eletricidade (31%), principalmente, de fonte hidrelétrica.

A produção dos aditivos representa 79% do impacto para a categoria **Recursos Minerais**. O anti-UV²¹ é o principal contribuinte e, em menor proporção, há a influência do antifibrilante (composto por carbonato de cálcio) e do masterbatch branco (composto por dióxido de titânio). A produção da resina virgem de PP é a segunda principal contribuinte, representando 19% do impacto para esta categoria.

As emissões atmosféricas de óxidos de nitrogênio (NOx) são as principais contribuintes para a categoria **Eutrofização**. Essas emissões ocorrem na obtenção da nafta e, por isso, a produção da resina virgem de PP representa 72% do impacto para esta categoria. O consumo de eletricidade contribui com 7% do impacto, devido à cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar. A produção do anti-UV¹⁴ é responsável pela contribuição dos aditivos (6%) para esta categoria de impacto.

A produção da resina virgem de PP contribui com 85% do impacto da categoria de depleção de **Combustíveis Fósseis**, por causa do consumo de petróleo. Esta categoria apresenta o benefício mais significativo da reciclagem do big bag de PP.

²⁰ A cogeração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar corresponde a aproximadamente 5% do grid de energia elétrica da região sudeste do Brasil, segundo o conjunto de dados disponível na base de dados ecoinvent v3.8.

²¹ Vale lembrar que a produção do anti-UV foi representada por um conjunto de dados genérico, devido à ausência de informações sobre a composição deste aditivo.

As categorias de Toxicidade Humana e Ecotoxicidade apresentam menor grau de precisão, tanto devido às dificuldades de medição dos poluentes considerados nestas categorias quanto às incertezas relacionadas ao próprio modelo de avaliação de impacto ambiental. Por outro lado, não existem até o momento melhores modelos e bases de dados que possam ser utilizadas para estudos de ACV.

Considerando as limitações acima mencionadas, os principais contribuintes para a categoria **Toxicidade Humana|Não Câncer** são a produção da resina virgem de PP (37%), produção dos aditivos (25%) e consumo de eletricidade (21%). E para a categoria **Toxicidade Humana|Câncer**, os principais contribuintes são a produção dos aditivos (54%) e produção da resina virgem de PP (39%). Já para a categoria **Ecotoxicidade**, além da produção da resina virgem de PP (43%) e dos aditivos (18%), o transporte da resina virgem de PP até a Embrasa também é um importante contribuinte (20%).

O consumo de gás natural como matéria-prima para a produção da resina virgem de PP é a principal causa dos impactos para as categorias relacionadas com Toxicidade e Ecotoxicidade. A produção do anti-UV, antifibrilante e masterbatch branco é a principal causa da influência dos aditivos. A contribuição da eletricidade está relacionada com a cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar. E as emissões dos desgastes dos freios e pneus são as justificativas para contribuição do transporte para a categoria de Ecotoxicidade.

Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem

A Figura 7 apresenta o perfil ambiental de uma unidade de big bag produzida com 50% de PP-PCR, 50% de PP virgem e aditivos, conforme descrito na Tabela 1. A Figura também apresenta a análise de contribuição, indicando os principais contribuintes para cada categoria de impacto avaliada.

De modo geral, nota-se que a produção do PP virgem, produção do PP reciclado, produção dos aditivos e consumo de eletricidade na etapa de fabricação do big bag, são os principais responsáveis pelos impactos das categorias avaliadas. A reciclagem aparece destacada no eixo negativo do gráfico devido aos impactos evitados, pois ao reciclar o big bag evita-se a produção de resina virgem de PP.

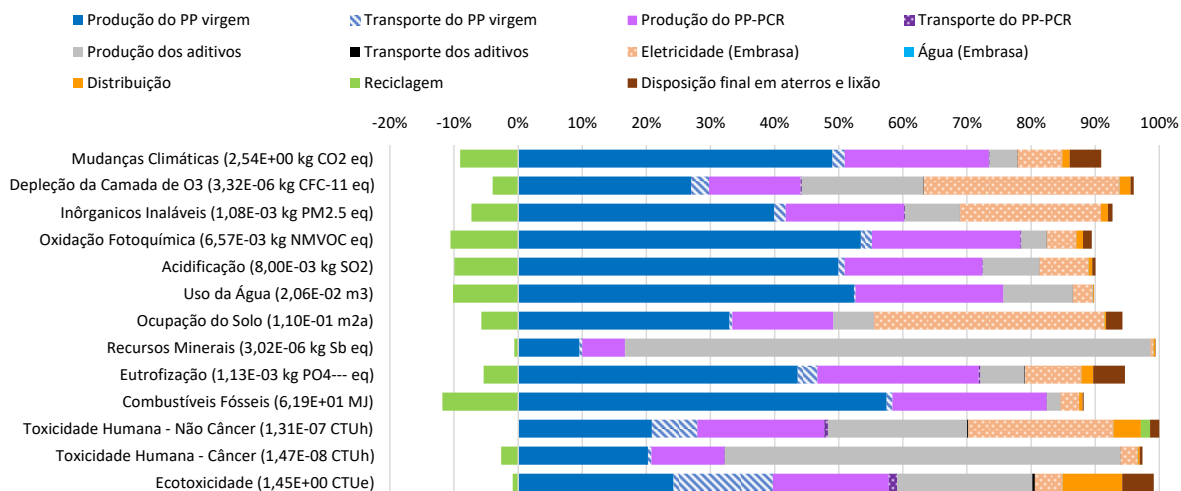


FIGURA 7. RESULTADOS E ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO PARA UMA UNIDADE DE BIG BAG COM 50% PP-PCR E 50% PP VIRGEM

É importante reforçar que segundo o fator de alocação escolhido para modelagem do PP-PCR ($A = 0,50$)²², os resultados do PP-PCR consideram 50% da produção da resina virgem de PP que originou a resina pós-consumo e 50% dos encargos ambientais da reciclagem, que incluem a coleta dos big bags pós-consumo, consumo de eletricidade e de água, tratamento de efluentes, transporte dos rejeitos e disposição final em aterro. Assim sendo, a Figura 8 ilustra a análise de contribuição para a produção de 1kg de resina reciclada de PP (PP-PCR), indicando que a produção do PP virgem é a principal contribuinte para a maioria das categorias de impacto.

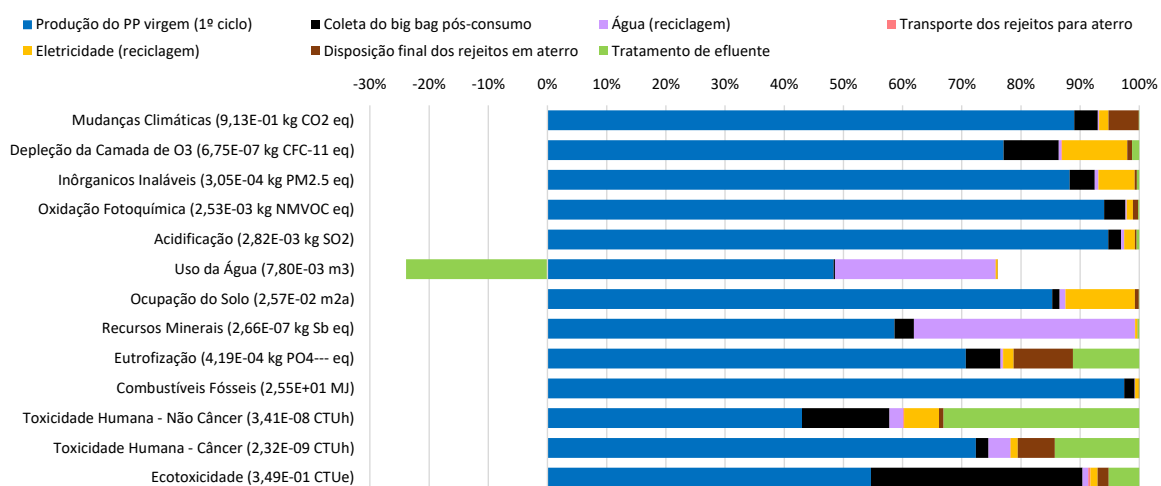


FIGURA 8. RESULTADOS E ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO DA PRODUÇÃO DE 1 KG DE RESINA RECICLADA DE PP (FATOR $A = 0,50$)

²² Consulte explicação mais detalhada no item “Procedimentos de Alocação e Fim de Vida” deste relatório.

De acordo com a Figura 7, a produção da resina virgem de PP contribui com 49% do impacto para **Mudanças Climáticas**, tendo como principais motivos a etapa de craqueamento da nafta para obtenção do propeno, além da produção da nafta a partir da extração e refino do petróleo. Enquanto a produção do PP-PCR representa 22% do impacto para esta categoria, principalmente, devido à contribuição da resina virgem que originou o resíduo pós-consumo (Figura 8). Em contrapartida, a reciclagem do big bag promove a redução de aproximadamente 9% para esta categoria de impacto.

Para a categoria **Depleção da Camada de Ozônio**, os quatro principais contribuintes são o consumo de eletricidade (31%), produção da resina de PP virgem (27%), produção do aditivo anti-UV (19%) e produção do PP-PCR (14%). As emissões de monóxido de dinitrogênio (N_2O) oriundas da geração de energia a partir de termelétricas a gás natural são as principais justificativas para o impacto do consumo de eletricidade. A obtenção da nafta é o principal motivo para o impacto da resina virgem de PP. Além da produção da resina virgem de PP (1º ciclo), o consumo de eletricidade na reciclagem também é um dos motivos do impacto da produção do PP-PCR.

As emissões de material particulado (MP) e de dióxido de enxofre (SO_2) são as principais causas do impacto para **Inorgânicos Inaláveis**. Essas emissões estão associadas com a obtenção e transporte da nafta utilizada na produção da resina virgem de PP (40%). Além disso, o consumo de eletricidade também contribui para esta categoria de impacto (22%), principalmente, devido às emissões de MP na cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar. O impacto da produção do PP-PCR (18%) possui relação com a produção da resina virgem de PP (1º ciclo) e consumo de eletricidade no processo de reciclagem.

A produção da resina virgem de PP representa 53% do impacto da categoria **Oxidação Fotoquímica**, devido às emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) ocorridas na obtenção da nafta durante a extração e refino do petróleo. A produção do PP-PCR representa 23% do impacto, devido à produção do PP virgem (1º ciclo) e também à coleta dos big bags pós-consumo. O benefício da reciclagem no fim de vida do big bag contribui para redução de 11% do impacto para esta categoria.

A obtenção da nafta também é a principal contribuinte para a categoria **Acidificação**, principalmente, por causa das emissões de dióxido de enxofre (SO_2), sendo que as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) também contribuem para esta categoria de impacto. Com isso, a produção do PP virgem contribui com 50% do impacto desta categoria. Já produção o PP-PCR representa 21% do impacto, tendo como principais contribuintes a produção do PP virgem (1º ciclo), coleta dos big bags pós-consumo e transporte dos rejeitos para aterro. O

benefício da reciclagem no fim de vida do big bag contribui para redução de 10% do impacto para esta categoria.

O **Uso da Água** no processo de produção do big bag refere-se à água de reposição no sistema de resfriamento, cujo indicador é de apenas 0,00853 litros por unidade de big bag, enquanto que o uso de água na cadeia de suprimentos e demais etapas do ciclo de vida totaliza 20,54 litros por unidade de big bag. A produção da resina virgem de PP contribui com 52%, a produção do PP-PCR com 23%²³ e a produção dos aditivos com 11%.

A categoria **Ocupação do Solo** é influenciada pelo consumo de eletricidade (36%), principalmente, de fonte hidrelétrica; produção do PP virgem (33%) e produção do PP-PCR (16%).

A produção dos aditivos representa 82% do impacto para a categoria **Recursos Minerais**. O anti-UV é o principal contribuinte e, em menor proporção, há a influência do antioxidante e do masterbatch azul.

As emissões atmosféricas de óxidos de nitrogênio (NOx) são as principais contribuintes para a categoria **Eutrofização**. Essas emissões ocorrem na obtenção da nafta e, por isso, a produção da resina virgem de PP representa 44% do impacto para esta categoria. A produção do PP-PCR representa 25% do impacto, tendo como principais justificativas a produção da resina virgem de PP (1º ciclo), as emissões para água do efluente tratado e a disposição final em aterro dos rejeitos resultantes do processo de reciclagem. O consumo de eletricidade contribui com 9% do impacto, devido à cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar. A produção do anti-UV é responsável pela contribuição dos aditivos (7%) para esta categoria de impacto.

A produção da resina virgem de PP contribui com 57% do impacto da categoria de depleção de **Combustíveis Fósseis**, por causa do consumo de petróleo. E a produção do PP-PCR representa 24%, devido à produção da resina virgem de PP (1º ciclo). Esta categoria apresenta o benefício mais significativo da reciclagem do big bag de PP no fim de vida.

As categorias de Toxicidade Humana e Ecotoxicidade apresentam menor grau de precisão, tanto devido às dificuldades de medição dos poluentes considerados nestas categorias quanto às incertezas relacionadas ao próprio modelo de avaliação de impacto ambiental. Por outro lado, não existem até o momento melhores modelos e bases de dados que possam ser utilizadas para estudos de ACV.

Considerando as limitações acima mencionadas, os principais contribuintes para a categoria **Toxicidade Humana|Não Câncer** são o consumo de eletricidade (23%), produção dos aditivos (22%), produção da resina virgem de PP (21%) e produção do PP-PCR (20%). E

²³ Segundo a Figura 8, o Uso da Água da produção da resina PCR está associado com a produção da resina virgem de PP (1º ciclo). O uso de água no processo de reciclagem é de aproximadamente 1,15 litros por kg de resina reciclada, considerando o uso direto no processo e o uso indireto (principalmente, eletricidade).

para a categoria **Toxicidade Humana | Câncer**, os principais contribuintes são a produção dos aditivos (62%) e produção da resina virgem de PP (20%). Já para a categoria **Ecotoxicidade**, além da produção da resina virgem de PP (24%), da resina PP-PCR (18%) e dos aditivos (21%), o transporte da resina virgem de PP até a Embrasa também é um importante contribuinte (15%).

O consumo de gás natural como matéria-prima para a produção da resina virgem de PP é a principal causa dos impactos para as categorias relacionadas com Toxicidade e Ecotoxicidade. A produção do anti-UV e do masterbatch azul é a principal causa da influência dos aditivos. A contribuição da eletricidade está relacionada com a cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar. E as emissões dos desgastes dos freios e pneus são as justificas para contribuição do transporte para a categoria de Ecotoxicidade.

B. Resultados Comparativos (cenário base)

Esta seção apresenta os resultados de ACV comparativos, considerando os sistemas de produto listados na Figura 1. Os perfis ambientais dos big bags produzidos com PP virgem e PP-PCR são baseados em dados primários fornecidos pela Embrasa para o ano de 2021 (Tabela 2). Enquanto que os big bags produzidos com PET virgem e reciclado são baseados em dados secundários, obtidos da literatura, base de dados e estimados pela Embrasa (Tabela 3). Os resultados apresentados no cenário base consideram o fator de alocação A igual a 0,50.

O objetivo dos itens abaixo consiste em detalhar as análises comparativas, principalmente para a categoria de impacto Mudanças de Climáticas, a fim de identificar a opção de big bag com melhor desempenho ambiental. As comparações cujos resultados apresentam diferenças iguais os menores que 10% são consideradas como inconclusivas.

Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem versus Big bag 100% PP virgem

Na Figura 9, encontram-se os resultados comparativos deste estudo de ACV considerando o cenário base conforme descrito anteriormente. Os valores mais distantes do eixo zero do gráfico radar indicam maior potencial de impacto para categoria relacionada.

Os números percentuais indicados em cada categoria representam as diferenças proporcionais entre os resultados encontrados para os sistemas sob comparação. Os valores negativos indicam as categorias em que o big bag 50% PP-PCR apresentou menor potencial de impacto ambiental em comparação ao big bag 100% PP virgem. Os valores percentuais positivos, portanto, representam o oposto e indicam em quais categorias o big bag 50% PP-

PCR apresentou maior potencial de impacto ambiental em comparação ao big bag 100% PP virgem.

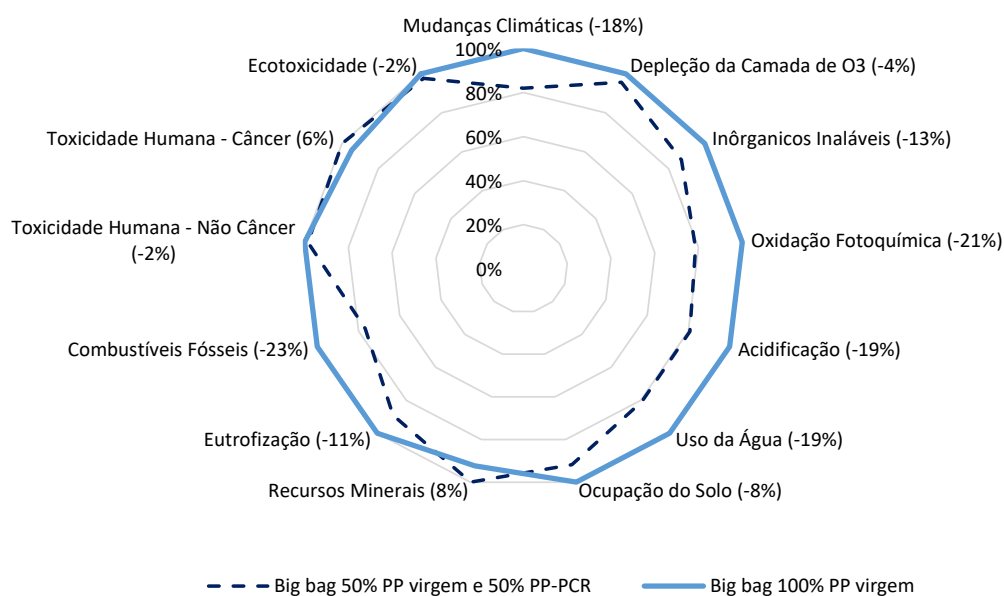


FIGURA 9. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 50% PP-PCR E BIG BAG COM 100% PP VIRGEM

O big bag produzido com 50% PP-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para todas as categorias de impacto, cujos resultados são conclusivos (redução maior que 10%). Os resultados são inconclusivos para seis categorias de impacto (Depleção da Camada de Ozônio, Ocupação do Solo, Recursos Minerais, Toxicidade Humana|Não Câncer, Toxicidade Humana|Câncer e Ecotoxicidade), visto que a diferença percentual é menor que 10%.

A Figura 10 detalha a análise comparativa para as Mudanças Climáticas, indicando que a substituição de PP virgem por PP-PCR possui o potencial de reduzir 18% do impacto para esta categoria de impacto. A participação dos aditivos, eletricidade e demais etapas do ciclo de vida de ambas as opções de big bag são similares.

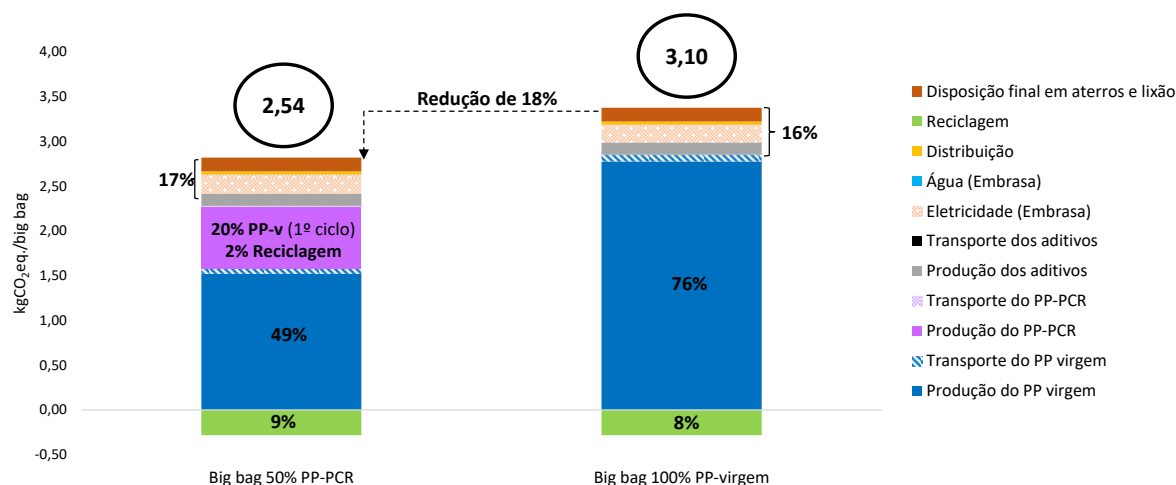


FIGURA 10. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 50% PP-PCR E BIG BAG COM 100% PP VIRGEM PARA CATEGORIA DE IMPACTO MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Para o big bag com 50% PP-PCR, a produção da resina de PP virgem contribui com 49% do impacto total para Mudanças Climáticas. A produção do PP-PCR representa 22% do total, sendo 20% relacionado com a produção do PP virgem que originou o PP reciclado e apenas 2% do processo de reciclagem (incluindo desde a coleta dos big bags até a obtenção da resina reciclada). As demais etapas do ciclo de vida da produção do big bag representam 17% do impacto total. Por fim, a reciclagem do big bag ao final de sua vida útil, confere um crédito de 9%.

Para o big bag com 100% PP-virgem, a produção do PP virgem representa 76% do impacto total para Mudanças Climáticas. As demais etapas do ciclo de vida da produção do big bag representam 16% do impacto total. E a reciclagem do big bag ao final de sua vida útil, confere um crédito de 8%.

Em relação as demais categorias de impacto com resultados conclusivos (Inorgânicos Inaláveis, Oxidação Fotoquímica, Acidificação, Uso da Água, Eutrofização e Combustíveis Fósseis), a substituição da resina virgem de PP por PP-PCR aponta potencial de redução dos impactos entre 11% e 23%. As justificativas destas reduções estão associadas a não utilização de uma matéria-prima de base fóssil, produzida principalmente a partir da nafta.

A Tabela 5 resume os resultados comparativos encontrados no cenário base desse estudo. E o item A 'Perfil ambiental dos big bags de PP' apresenta o detalhamento da análise de contribuição das categorias de impacto para cada sistema de produto.

TABELA 5. PERFIL AMBIENTAL DE UMA UNIDADE DE BIG BAG COM CAPACIDADE DE 1000KG (ANÁLISE COMPARATIVA 1)

	Big bag 50% PP-PCR	Big bag 100% PP virgem	Δ%
Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	2,54E+00	3,10E+00	-18%
Depleção da Camada de O ₃ (kg CFC-11 eq.)	3,32E-06	3,47E-06	-4%
Inorgânicos Inaláveis (kg PM 2,5 eq.)	1,08E-03	1,23E-03	-13%
Oxidação Fotoquímica (kg NMVOC eq.)	6,57E-03	8,36E-03	-21%
Acidificação (kg SO ₂ eq.)	8,00E-03	9,91E-03	-19%
Uso da Água (m ³)	2,06E-02	2,54E-02	-19%
Ocupação do Solo (m ² .a)	1,10E-01	1,20E-01	-8%
Recursos Minerais (kg Sb eq.)	3,02E-06	2,79E-06	8%
Eutrofização (kg PO ₄ --- eq.)	1,13E-03	1,27E-03	-11%
Combustíveis Fósseis (MJ)	6,19E+01	8,07E+01	-23%
Toxicidade Humana - Não Câncer (CTUh)	1,31E-07	1,34E-07	-2%
Toxicidade Humana - Câncer (CTUh)	1,47E-08	1,39E-08	6%
Ecotoxicidade (CTUe)	1,45E+00	1,48E+00	-2%

Δ%

% (Resultado inconclusivo)

% (Big bag 50% PP-PCR apresenta menor potencial de impacto ambiental)

% (Big bag 50% PP-PCR apresenta maior potencial de impacto ambiental)

Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem versus Big bag 100% PET-PCR

Na Figura 11, encontram-se os resultados comparativos deste estudo de ACV considerando o cenário base conforme descrito anteriormente. Os valores mais distantes do eixo zero do gráfico radar indicam maior potencial de impacto para categoria relacionada.

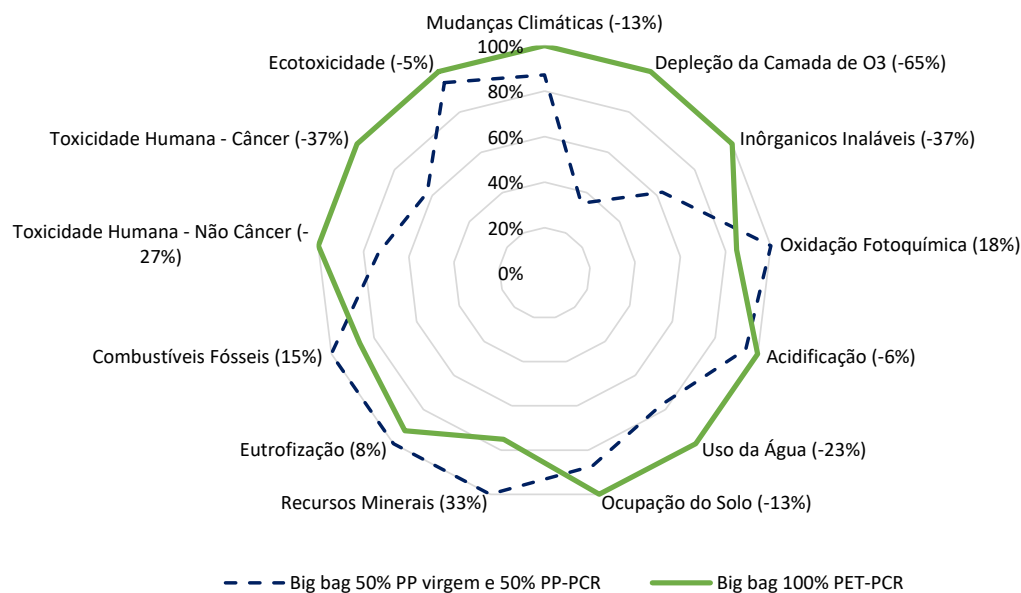


FIGURA 11. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 50% PP VIRGEM E 50% PP-PCR E BIG BAG COM 100% PET-PCR

De acordo com os resultados conclusivos, o big bag produzido com 50% PP-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para sete categorias de impacto, enquanto o big bag produzido com 100% PET-PCR apresenta melhor desempenho para três categorias de impacto. Os resultados são inconclusivos para três categorias de impacto (Acidificação, Eutrofização e Ecotoxicidade), visto que a diferença percentual é menor que 10%.

A Figura 12 detalha a análise comparativa para as Mudanças Climáticas, indicando que o big bag com 50% PP-PCR possui o potencial de reduzir 13% do impacto para esta categoria de impacto. A participação do consumo de eletricidade e demais etapas do ciclo de vida de ambas as opções de big bag são similares.

O principal contribuinte para o impacto do big bag 100% PET-PCR na categoria Mudanças Climáticas consiste na produção da resina virgem de PET que originou o resíduo pós-consumo de PET. De acordo com a Figura 13, a produção da resina PP-PCR apresenta redução de 46% em comparação com a resina PET-PCR. O fator de alocação igual a 0,50 foi aplicado para ambas resinas recicladas, no entanto, o potencial de aquecimento global do PET virgem é de 2,89 kgCO₂eq./kg e do PP virgem de 1,81 kgCO₂eq./kg²⁴.

²⁴ O potencial de aquecimento global do PET virgem foi obtido na base de dados ecoinvent v3.8 e representa dados médios da produção global, excluindo a Europa (RoW). Já o potencial de aquecimento global do PP virgem foi fornecido pela Braskem. No entanto, os resultados da produção da resina virgem de PP disponível na base de dados ecoinvent v3.8 é de 2,21 kgCO₂eq./kg, ou seja, 24% menor em comparação com a resina virgem de PET considerando a mesma base de comparação.

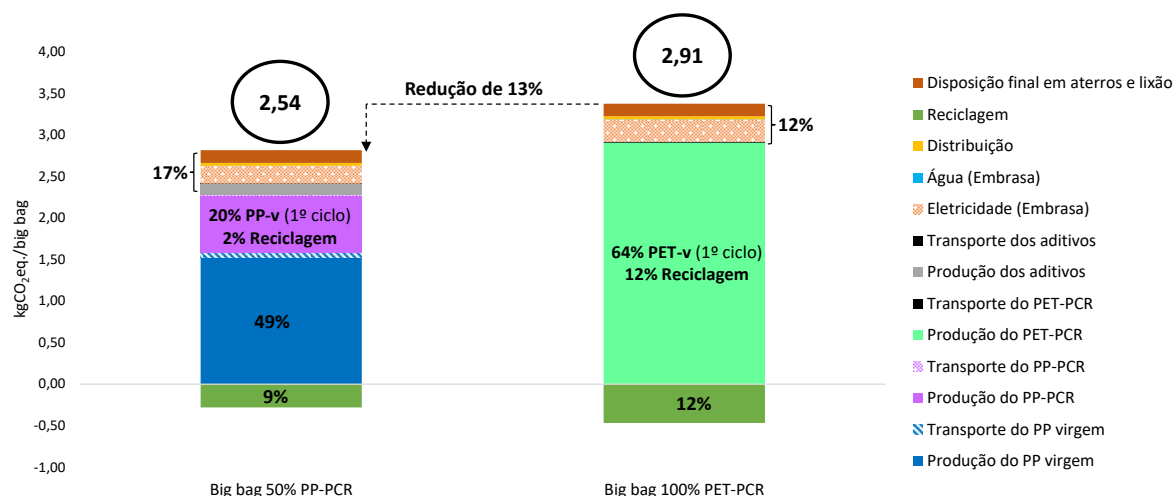


FIGURA 12. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 50% PP VIRGEM E 50% PP-PCR E BIG BAG COM 100% PET-PCR PARA CATEGORIA DE IMPACTO MUDANÇAS CLIMÁTICAS

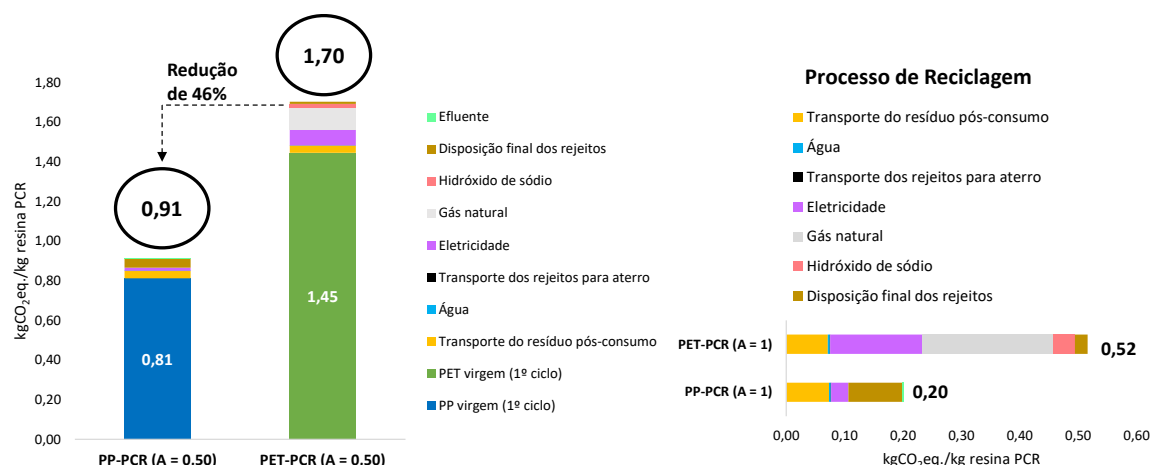


FIGURA 13. ANÁLISE COMPARATIVA DAS RESINAS PCR DE PP E DE PET PARA A CATEGORIA MUDANÇAS DE CLIMÁTICAS (FATOR A = 0,50)

Nota-se ainda na Figura 13 que o processo de reciclagem do PET possui maior impacto em comparação com o processo de reciclagem do PP. Isso ocorre devido ao maior consumo de eletricidade no processo de reciclagem do PET, além do consumo de gás natural nas caldeiras que geram energia para o processo de lavagem. É importante lembrar que os dados de inventário da reciclagem do PET foram obtidos da literatura [Gileno, 2020]²⁵, portanto, este relatório apresenta uma análise de sensibilidade considerando a variação do consumo de eletricidade.

²⁵ Os dados de literatura utilizados representam o processo de reciclagem realizado no Brasil e mostra-se mais conservador em comparação com o dataset de reciclagem de PET disponível no ecoinvent v3.8. Para Mudanças Climáticas, por exemplo, o indicador obtido na base de dados ecoinvent com adaptação para o mix de eletricidade brasileiro foi de 1,85 kgCO₂eq./kg PET-PCR, enquanto os dados de literatura utilizados resultam em 1,70 kgCO₂eq./kg PET-PCR. Ambos resultados consideram o fator A igual a 0,50.

Vale ressaltar que se o impacto da reciclagem do PET fosse exatamente igual ao impacto da reciclagem do PP, o resultado seria 1,55 kgCO₂eq./kg de resina PET-PCR, ou seja, continuaria significativamente maior que o potencial de aquecimento global da resina reciclada de PP (0,91 kgCO₂eq./kg).

Além da categoria Mudanças Climáticas, o big bag com 50% PP-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para outras seis categorias de impacto (Depleção da Camada de Ozônio, Inorgânicos Inaláveis, Uso da Água, Toxicidade Humana| Não Câncer e Câncer), com reduções entre 13% e 65%. A justificativa destas reduções está associada ao menor impacto da produção da resina virgem de PP em comparação com a resina virgem de PET. A produção do ácido tereftálico (PTA) e do etilenoglicol são as principais causas dos impactos da produção da resina virgem de PET.

A produção do big bag com 100% PET-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para três categorias de impacto. Para as categorias Acidificação e Eutrofização, a resina virgem de PET apresenta melhor desempenho em comparação com resina virgem de PP. E para a categoria Ecotoxicidade, as justificativas consistem na ausência aditivos na composição do big bag com 100% PET-PCR e também devido à menor distância de transporte entre a matéria-prima principal e a Embrasa.

A Tabela 6 resume os resultados comparativos encontrados no cenário base desse estudo. O item A 'Perfil ambiental dos big bags de PP' apresenta o detalhamento da análise de contribuição das categorias de impacto para o big bag 50% PP-PCR e a Figura 14 apresenta a análise de contribuição da produção do big bag 100% PET-PCR.

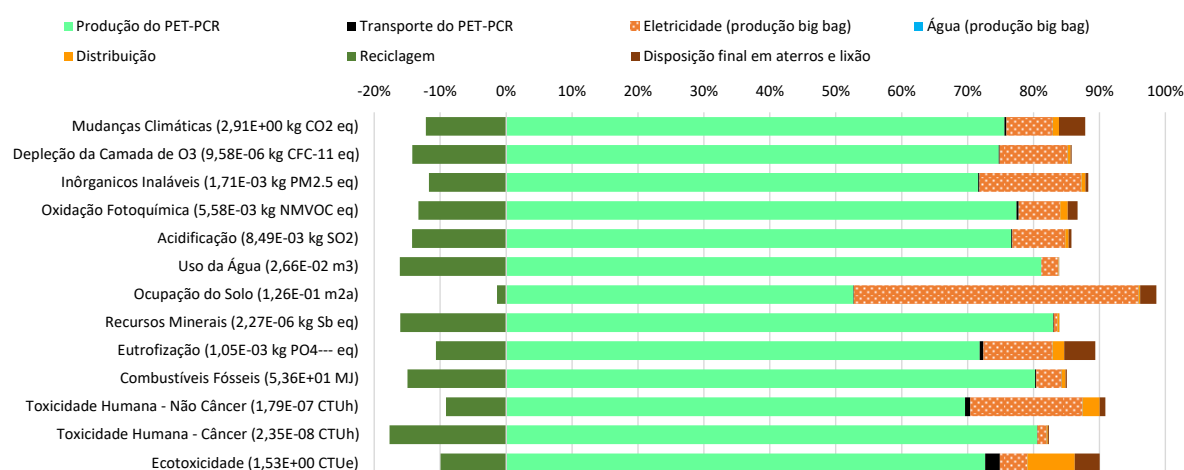


FIGURA 14. RESULTADOS E ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO PARA UMA UNIDADE DE BIG BAG COM 100% PET-PCR

TABELA 6. PERFIL AMBIENTAL DE UMA UNIDADE DE BIG BAG COM CAPACIDADE DE 1000KG (ANÁLISE COMPARATIVA 2)

	Big bag 50% PP-PCR	Big bag 100% PET-PCR	Δ%
Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	2,54E+00	2,91E+00	-13%
Depleção da Camada de O ₃ (kg CFC-11 eq.)	3,32E-06	9,58E-06	-65%
Inorgânicos Inaláveis (kg PM 2,5 eq.)	1,08E-03	1,71E-03	-37%
Oxidação Fotoquímica (kg NMVOC eq.)	6,57E-03	5,58E-03	18%
Acidificação (kg SO ₂ eq.)	8,00E-03	8,49E-03	-6%
Uso da Água (m ³)	2,06E-02	2,66E-02	-23%
Ocupação do Solo (m ² .a)	1,10E-01	1,26E-01	-13%
Recursos Minerais (kg Sb eq.)	3,02E-06	2,27E-06	33%
Eutrofização (kg PO ₄ --- eq.)	1,13E-03	1,05E-03	8%
Combustíveis Fósseis (MJ)	6,19E+01	5,36E+01	15%
Toxicidade Humana - Não Câncer (CTUh)	1,31E-07	1,79E-07	-27%
Toxicidade Humana - Câncer (CTUh)	1,47E-08	2,35E-08	-37%
Ecotoxicidade (CTUe)	1,45E+00	1,53E+00	-5%
Δ% % (Resultado inconclusivo) % (Big bag 50% PP-PCR apresenta <u>menor</u> potencial de impacto ambiental) % (Big bag 50% PP-PCR apresenta <u>maior</u> potencial de impacto ambiental)			

Big bag 100% PP virgem versus Big bag 100% PET virgem

Na Figura 15, encontram-se os resultados comparativos deste estudo de ACV considerando o cenário base conforme descrito anteriormente. Os valores mais distantes do eixo zero do gráfico radar indicam maior potencial de impacto para categoria relacionada.

O big bag produzido com 100% PP virgem apresenta melhor desempenho ambiental para todas as categorias de impacto avaliadas. O big bag produzido com 100% PET virgem possui desempenho ambiental inferior devido, principalmente, aos processos de produção do ácido tereftálico (PTA) e do etileno glicol. A participação do consumo de eletricidade e demais etapas do ciclo de vida de ambas as opções de big bag são similares.

A Figura 16 detalha a análise comparativa para as Mudanças Climáticas, indicando que o big bag com 100% PP virgem possui o potencial de reduzir 42% do impacto para esta categoria quando comparado com o big bag com 100% PET virgem.

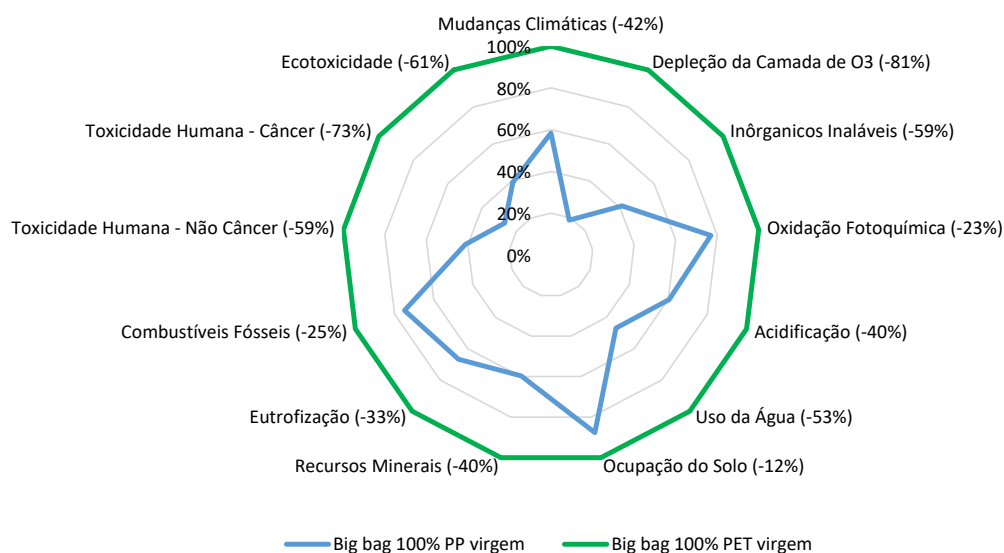


FIGURA 15. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 100% PP VIRGEM E BIG BAG COM 100% PET VIRGEM

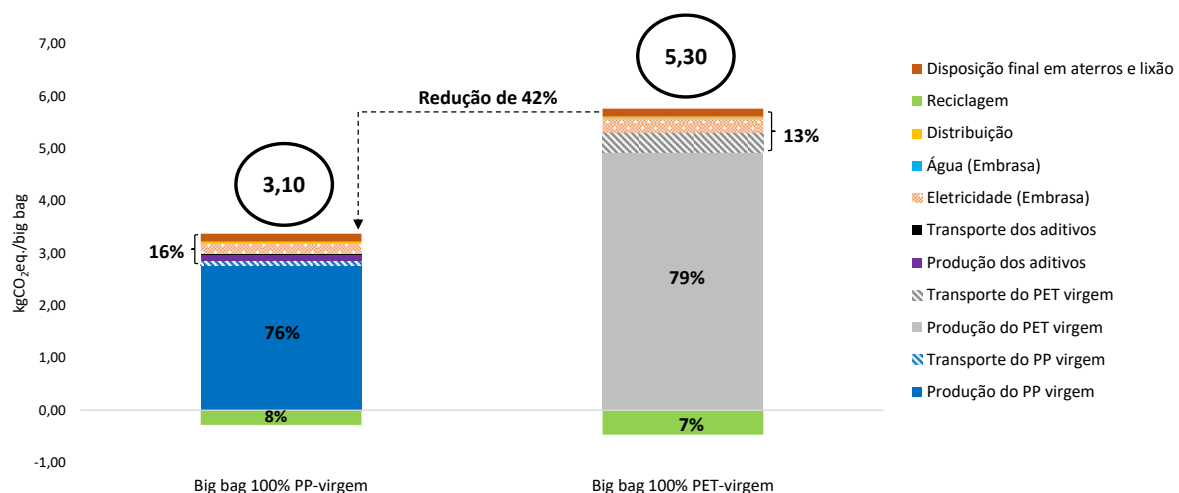


FIGURA 16. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 100% PP VIRGEM E BIG BAG COM 100% PET VIRGEM PARA CATEGORIA DE IMPACTO MUDANÇAS CLIMÁTICAS

É importante destacar que o potencial de aquecimento global do PET virgem foi obtido na base de dados ecoinvent v3.8 e representa dados médios da produção global, excluindo a Europa (RoW). Já o potencial de aquecimento global do PP virgem foi fornecido pela Braskem. Devido a impossibilidade de acesso aos dados de inventário da Braskem, a Figura 17 apresenta a análise de contribuição da resina virgem de PP e PET para a categoria Mudanças Climáticas, considerando os dados disponíveis na base de dados ecoinvent v3.8.

A análise apresentada na Figura 17 demonstra que a produção dos precursores da resina PET (PTA e EG) possui maior impacto em comparação com a produção do propeno (ou propileno). Além disso, o impacto relacionado com o consumo de vapor é mais elevado

na produção do PET. Com isso, o impacto da produção da resina virgem de PP na base de dados ecoinvent v3.8 é 24% menor em comparação com a resina virgem de PET. Ao utilizar dados primários da Braskem, fornecedora atual da Embrasa, o impacto da produção da resina virgem de PP é 38% menor em comparação com a resina virgem de PET.

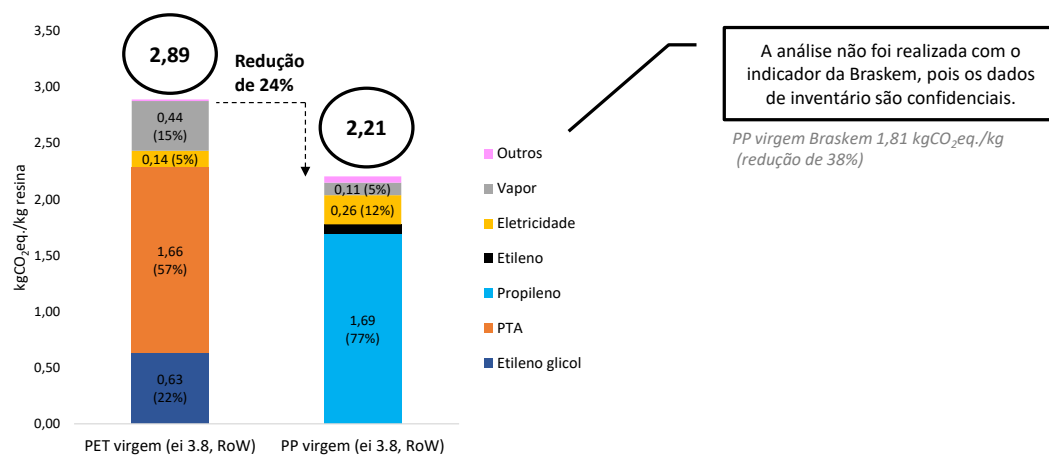


FIGURA 17. ANÁLISE COMPARATIVA DAS RESINAS VIRGEM DE PP E PET PARA A CATEGORIA MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O big bag com 100% PP virgem apresenta melhor desempenho ambiental para as demais categorias de impacto avaliadas, com reduções entre 12% e 81%. A justificativa destas reduções está associada ao menor impacto da produção da resina virgem de PP em comparação com a resina virgem de PET. A produção do ácido tereftálico (PTA) e do etilenoglicol são as principais causas dos impactos da produção da resina virgem de PET.

A Tabela 7 resume os resultados comparativos encontrados no cenário base desse estudo. O item A 'Perfil ambiental dos big bags de PP' apresenta o detalhamento da análise de contribuição das categorias de impacto para o big bag 100% PP virgem e a Figura 18 apresenta a análise de contribuição da produção do big bag 100% PET virgem.

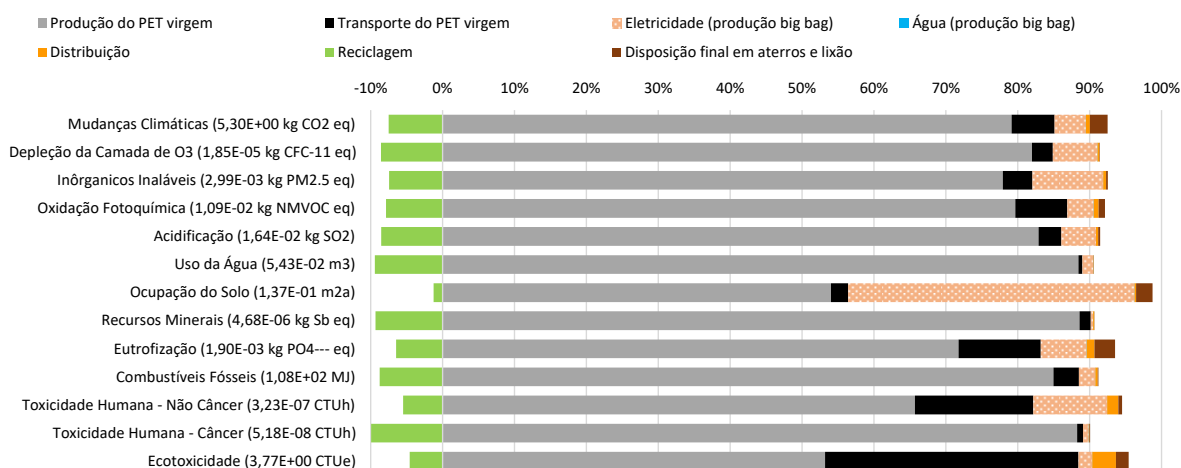


FIGURA 18. RESULTADOS E ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO PARA UMA UNIDADE DE BIG BAG COM 100% PET VIRGEM

TABELA 7. PERFIL AMBIENTAL DE UMA UNIDADE DE BIG BAG COM CAPACIDADE DE 1000KG (ANÁLISE COMPARATIVA 3)

	Big bag 100% PP virgem	Big bag 100% PET virgem	Δ%
Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	3,10E+00	5,30E+00	-42%
Depleção da Camada de O ₃ (kg CFC-11 eq.)	3,47E-06	1,85E-05	-81%
Inorgânicos Inaláveis (kg PM 2,5 eq.)	1,23E-03	2,99E-03	-59%
Oxidação Fotoquímica (kg NMVOC eq.)	8,36E-03	1,09E-02	-23%
Acidificação (kg SO ₂ eq.)	9,91E-03	1,64E-02	-40%
Uso da Água (m ³)	2,54E-02	5,43E-02	-53%
Ocupação do Solo (m ² .a)	1,20E-01	1,37E-01	-12%
Recursos Minerais (kg Sb eq.)	2,79E-06	4,68E-06	-40%
Eutrofização (kg PO ₄ --- eq.)	1,27E-03	1,90E-03	-33%
Combustíveis Fósseis (MJ)	8,07E+01	1,08E+02	-25%
Toxicidade Humana - Não Câncer (CTUh)	1,34E-07	3,23E-07	-59%
Toxicidade Humana - Câncer (CTUh)	1,39E-08	5,18E-08	-73%
Ecotoxicidade (CTUe)	1,48E+00	3,77E+00	-61%
Δ% % (Resultado inconclusivo) % (Big bag 100% PP virgem apresenta <u>menor</u> potencial de impacto ambiental) % (Big bag 100% PP virgem apresenta <u>maior</u> potencial de impacto ambiental)			

Big bag 100% PP virgem versus Big bag 100% PET-PCR

Na Figura 19, encontram-se os resultados comparativos deste estudo de ACV considerando o cenário base conforme descrito anteriormente. Os valores mais distantes do eixo zero do gráfico radar indicam maior potencial de impacto para categoria relacionada.

O big bag produzido com 100% PET-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para cinco das categorias de impacto avaliadas (Oxidação Fotoquímica, Acidificação, Recursos Minerais, Eutrofização e Combustíveis Fósseis). Com exceção da categoria Recursos Minerais, a principal justificativa para desempenho ambiental inferior do big bag 100% PP virgem possui relação com a obtenção da nafta. Já para categoria Recursos Minerais, a principal justificativa são os aditivos, pois não foi reportado o uso de aditivos na composição do big bag 100% PET-PCR

O big bag produzido com 100% PP virgem apresenta melhor desempenho ambiental para quatro das categorias de impacto avaliadas (Depleção da Camada de Ozônio. Inorgânicos Inaláveis, Toxicidade Humana|Não Câncer e Câncer). Isso ocorre devido à contribuição do impacto da resina de PET virgem que originou a resina reciclada de PET (1º

ciclo). Os resultados são inconclusivos para quatro categorias de impacto (Mudanças Climáticas, Uso da Água, Ocupação do Solo e Ecotoxicidade).

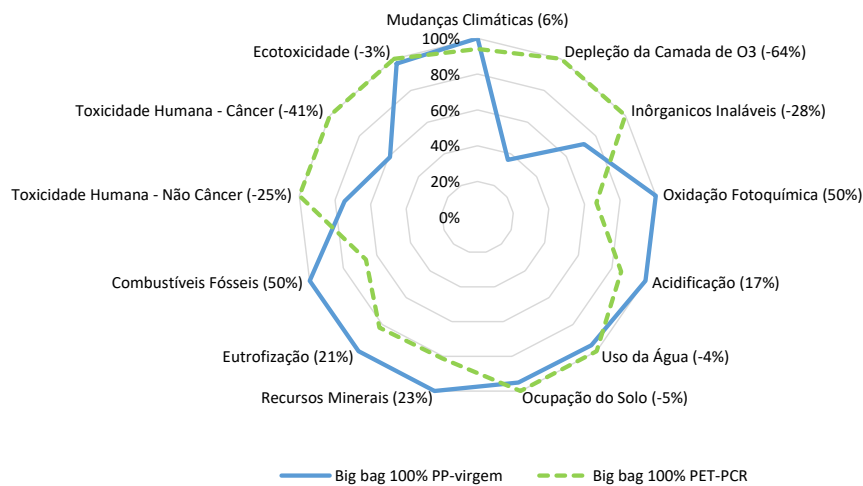


FIGURA 19. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 100% PP VIRGEM E BIG BAG COM 100% PET-PCR

A Figura 20 detalha a análise comparativa para as Mudanças Climáticas, indicando que a o big bag com 100% PET-PCR possui potencial de redução de apenas 6% do impacto para esta categoria quando comparado com o big bag com 100% PP virgem. Como a diferença percentual é menor que 10%, pode-se afirmar que a comparação é inconclusiva. O principal contribuinte para o impacto do big bag 100% PET-PCR na categoria Mudanças Climáticas consiste na produção da resina virgem de PET que originou o resíduo pós-consumo de PET. A participação do consumo de eletricidade e demais etapas do ciclo de vida de ambas as opções de big bag são similares.

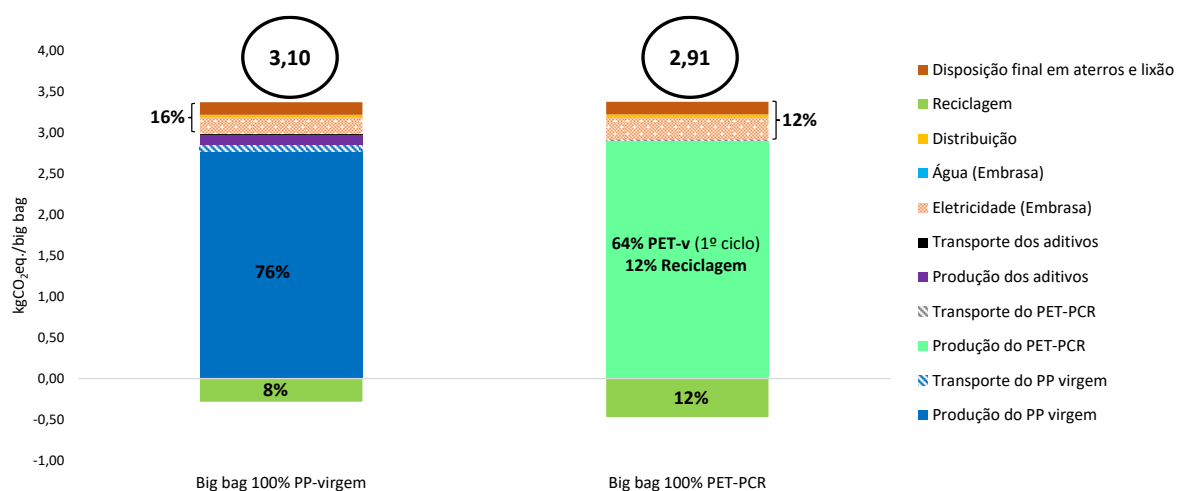


FIGURA 20. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 100% PP VIRGEM E BIG BAG COM 100% PET-PCR VIRGEM PARA CATEGORIA DE IMPACTO MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A Tabela 8 resume os resultados comparativos encontrados no cenário base desse estudo. O item A 'Perfil ambiental dos big bags de PP' apresenta o detalhamento da análise de contribuição das categorias de impacto para o big bag 100% PP virgem e a Figura 14 apresenta a análise de contribuição da produção do big bag 100% PET-PCR.

TABELA 8. PERFIL AMBIENTAL DE UMA UNIDADE DE BIG BAG COM CAPACIDADE DE 1000KG (ANÁLISE COMPARATIVA 4)

	Big bag 100% PP virgem	Big bag 100% PET-PCR	Δ%
Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	3,10E+00	2,91E+00	6%
Depleção da Camada de O ₃ (kg CFC-11 eq.)	3,47E-06	9,58E-06	-64%
Inorgânicos Inaláveis (kg PM 2,5 eq.)	1,23E-03	1,71E-03	-28%
Oxidação Fotoquímica (kg NMVOC eq.)	8,36E-03	5,58E-03	50%
Acidificação (kg SO ₂ eq.)	9,91E-03	8,49E-03	17%
Uso da Água (m ³)	2,54E-02	2,66E-02	-4%
Ocupação do Solo (m ² .a)	1,20E-01	1,26E-01	-5%
Recursos Minerais (kg Sb eq.)	2,79E-06	2,27E-06	23%
Eutrofização (kg PO ₄ --- eq.)	1,27E-03	1,05E-03	21%
Combustíveis Fósseis (MJ)	8,07E+01	5,36E+01	50%
Toxicidade Humana - Não Câncer (CTUh)	1,34E-07	1,79E-07	-25%
Toxicidade Humana - Câncer (CTUh)	1,39E-08	2,35E-08	-41%
Ecotoxicidade (CTUe)	1,48E+00	1,53E+00	-3%
Δ% % (Resultado inconclusivo) % (Big bag 100% PP virgem apresenta <u>menor</u> potencial de impacto ambiental) % (Big bag 100% PP virgem apresenta <u>maior</u> potencial de impacto ambiental)			

Análise comparativa entre as opções de big bags

A Figura 21 apresenta a comparação dos resultados da ACV para as quatro opções de big bags avaliadas neste estudo. O big bag com 100% PET virgem apresenta desempenho ambiental inferior para todas as categorias de impacto, com exceção da categoria Uso do solo, cujos resultados comparativos são inconclusivos.

Além da categoria Uso do Solo, os resultados também são inconclusivos para as categorias de Toxicidade e Ecotoxicidade, Depleção da Camada de Ozônio, Acidificação e Eutrofização.

O big bag com 50% PP-PCR possui o melhor desempenho ambiental para Mudanças Climáticas, Inorgânicos Inaláveis e Uso da água. Enquanto o big bag com 100% PET-PCR possui o melhor desempenho ambiental para Oxidação Fotoquímica, Recursos Minerais e Combustíveis Fósseis.

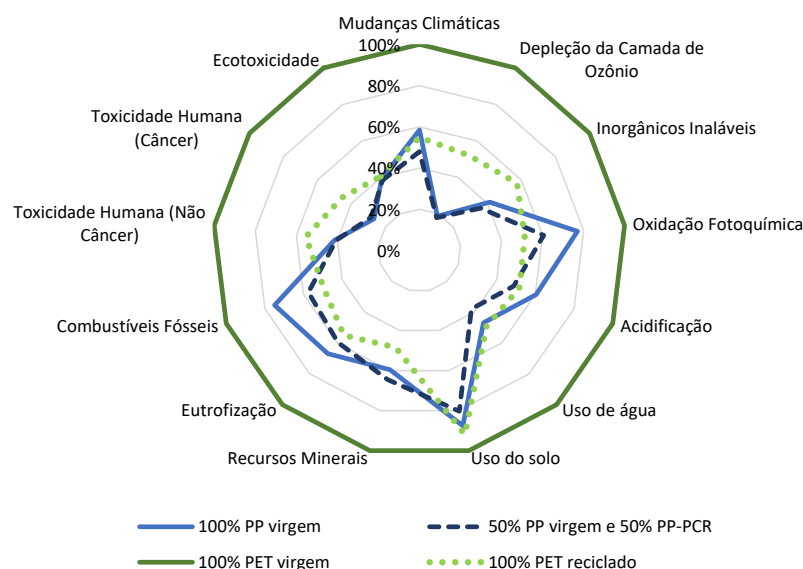


FIGURA 21. ANÁLISE COMPARATIVA DAS QUATRO ALTERNATIVAS DE BIG BAGS AVALIADAS NESTE ESTUDO DE ACV (FATOR A = 0,50)

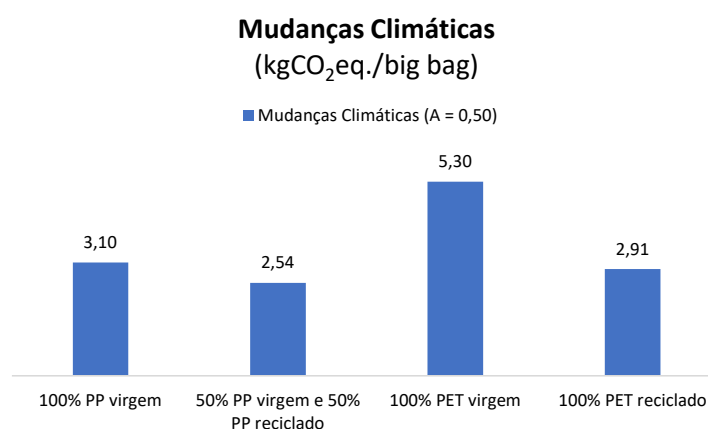


FIGURA 22. ANÁLISE COMPARATIVA PARA MUDANÇAS CLIMÁTICAS DAS QUATRO ALTERNATIVAS DE BIG BAGS AVALIADAS NESTE ESTUDO DE ACV (FATOR A = 0,50)

C. Análises de Sensibilidade

Esta seção concentra-se em apresentar os efeitos da distância de transporte da coleta dos resíduos pós-consumo (PP e PET), do consumo de eletricidade na etapa de reciclagem dos big bags de PP e da escolha do método de AICV. Busca-se, com essas análises, avaliar a variação dos resultados para diferentes escolhas ao longo do estudo.

I. Distância de transporte da coleta dos resíduos pós-consumo (PP e PET)

No cenário base, a distância de coleta dos resíduos pós-consumo foi estabelecida como 500 km para ambos os resíduos (PP e PET). No entanto, segundo dados primários informados pela Embrasa, atualmente, a distância de coleta dos big bags de PP (pós-

consumo) até o local de reciclagem é de 150 km. Estima-se que futuramente o raio de coleta aumente, podendo alcançar distâncias entre 1000 e 1500 km. Segundo [Gileno, 2020], a distância média de transporte dos fardos de PET até a recicladora é de 750 km.

O cenário base adotou a distância de 500 km para a coleta dos resíduos de PP e PET a fim de considerar o cenário mais conservador para o PP, já que dados secundários estão sendo utilizados para o PET.

Segundo a Figura 23, a variação da distância de transporte da coleta do resíduo de PP pós-consumo possui influência significativa somente para as seguintes categorias de impacto Toxicidade Humana|Não Câncer e Ecotoxicidade, devido as emissões do desgaste de freios e pneus.

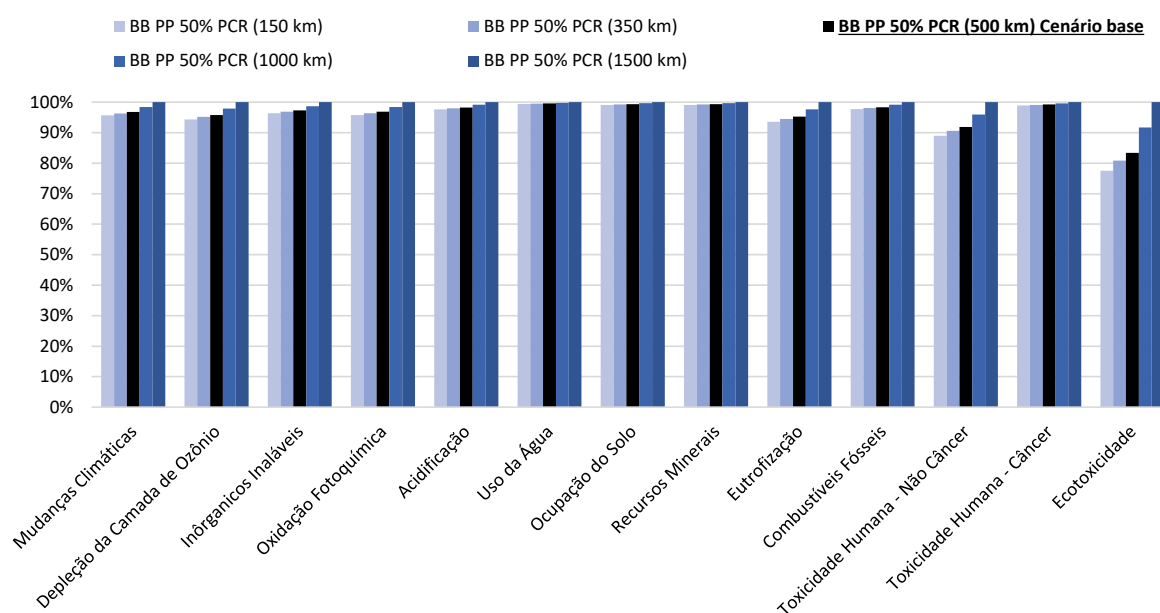


FIGURA 23. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA DE COLETA DOS RESÍDUOS PÓS-CONSUMO DE PP – RESULTADOS PARA O BIG BAG 50% PP-PCR

De acordo com a Figura 24, a variação da distância de transporte da coleta do resíduo de PET pós-consumo possui influência significativa para as seguintes categorias de impacto Eutrofização, devido as emissões de NO_x; Toxicidade Humana|Não Câncer e Ecotoxicidade, devido às emissões do desgaste de freios e pneus.

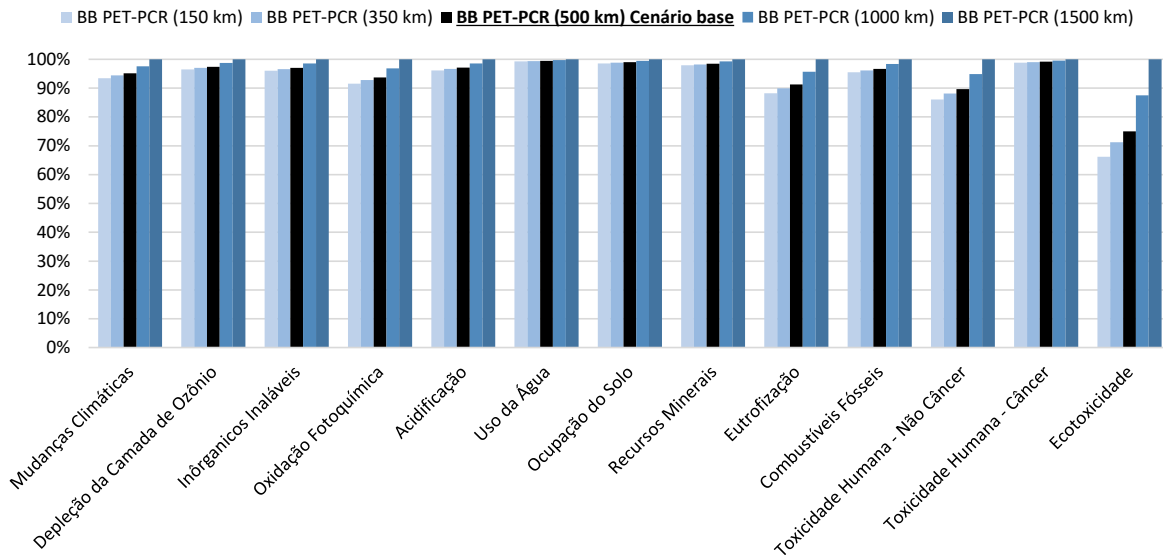


FIGURA 24. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA DE COLETA DOS RESÍDUOS PÓS-CONSUMO DE PET – RESULTADOS PARA O BIG BAG 100% PET-PCR

Para a categoria Mudanças Climáticas (Figura 25), o big bag 50% PP-PCR possui o menor resultado para todas as variações de distância.

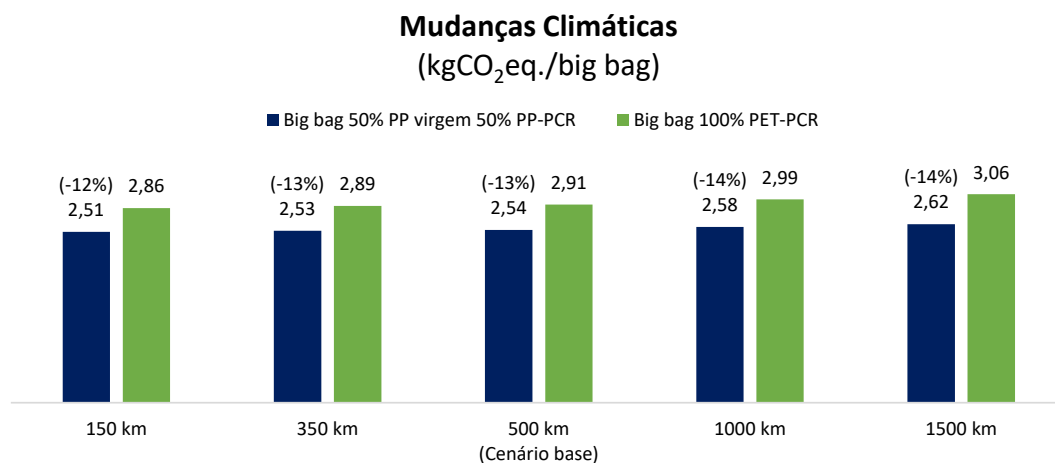


FIGURA 25. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA DE COLETA DOS RESÍDUOS PÓS-CONSUMO DE PP E PET – INFLUÊNCIA PARA CATEGORIA MUDANÇAS CLIMÁTICAS

II. Consumo de eletricidade na etapa de reciclagem dos big bags de PP

Apesar do uso de dados primários para representar o processo de reciclagem dos big bags de PP pós-consumo, os dados referem-se a apenas uma indústria recicladora. Como o indicador de consumo de eletricidade apresenta-se significativamente inferior ao indicador de consumo da reciclagem do PET (Figura 26), esta análise de sensibilidade avaliou os resultados obtidos com o aumento do consumo de eletricidade na etapa de reciclagem do PP.

Dados de inventário	Unidade	Reciclagem do PP (dados primários)	Reciclagem do PET (dados da literatura)
Elettricidade	kWh/kg PCR	0,14 Variação até 0,84	0,76

FIGURA 26. INDICADORES DE CONSUMO DE ELETRICIDADE DA RECICLAGEM DO PP (BIG BAGS) E DO PET (GARRAFAS)

Segundo a Figura 27, o aumento do consumo de eletricidade possui influência significativa somente para as categorias Depleção da Camada de Ozônio, devido às emissões da cogeração a partir do bagaço de cana-de-açúcar e, Ocupação do Solo, devido à energia de fonte hidrelétrica.

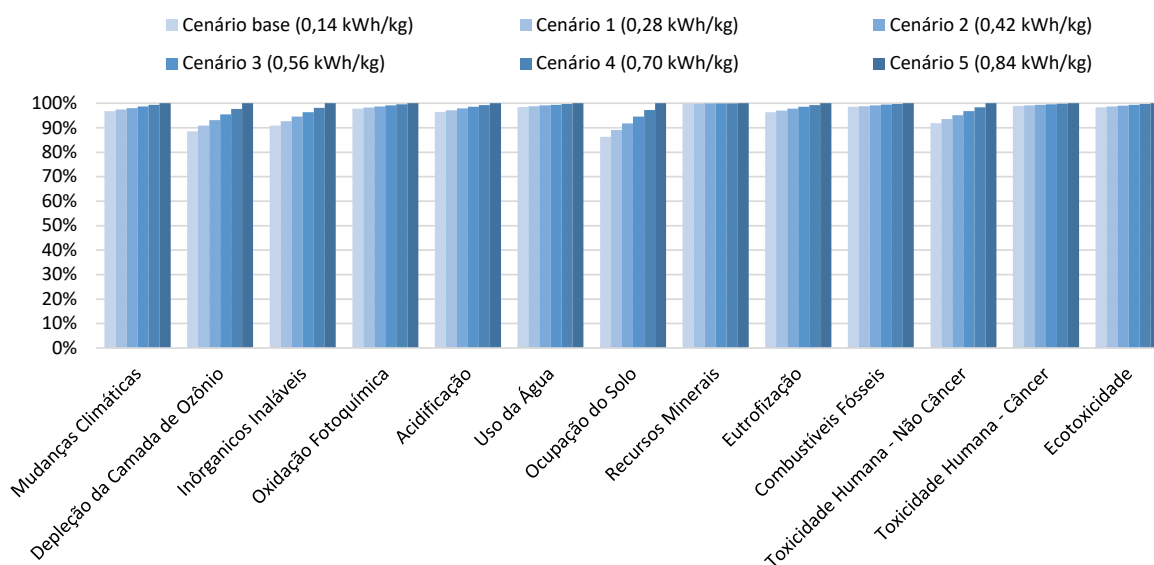


FIGURA 27. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE CONSIDERANDO A VARIAÇÃO NO CONSUMO DE ELETRICIDADE NO PROCESSO DE RECICLAGEM DO PP – BIG BAG 50% PP-PCR

A Figura 28 apresenta os resultados para a categoria Mudanças Climáticas, os quais variam de 2,54 kgCO₂eq./big bag a 2,62 kgCO₂eq./big bag. Mesmo com o aumento de 4x no consumo de eletricidade na reciclagem do PP (cenário 3), o big bag 50% PP-PCR possui o menor potencial de aquecimento global. A partir no cenário 4, o big bag 50% PP-PCR apresenta resultados inconclusivos quando comparado com o big bag 100% PET-PCR.

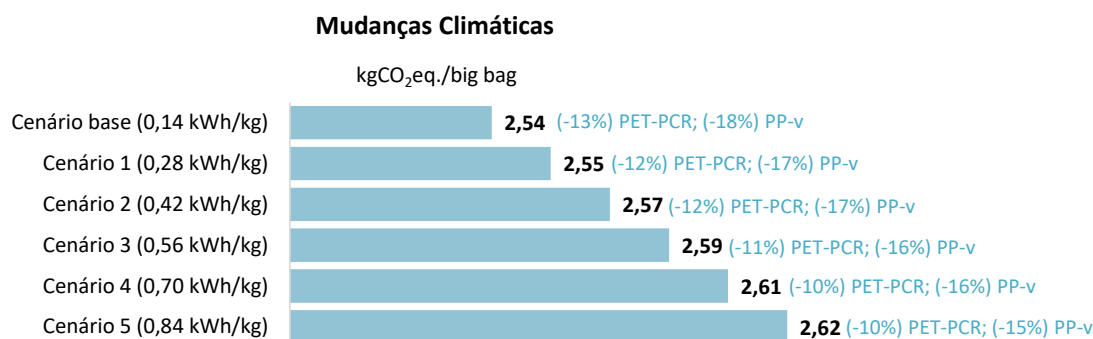


FIGURA 28. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DO CONSUMO DE ELETRICIDADE NA RECICLAGEM DOS BIG BAGS PÓS-CONSUMO DE PP E RESULTADOS PARA MUDANÇAS CLIMÁTICAS

III. Método de Avaliação do Ciclo de Vida

A compilação de métodos de AICV utilizada no cenário base deste estudo baseia-se em diversos modelos conceituados em estudos do ramo como CML, IPCC, ReCiPe, ILCD e USETox. No entanto, seguindo as recomendações compiladas pela Rede ACV [Cherubini et al., 2022], esta análise de sensibilidade foi realizada com o objetivo de verificar a influência da escolha do método de AICV para as afirmações comparativas.

Para isso, foi utilizado o método *Environmental Footprint* (EF 3.0), proposto pela Comissão Europeia no contexto da iniciativa *Product Environmental Footprint* (PEF), que contempla as seguintes categorias de impacto: Mudanças Climáticas (kg CO₂ eq.), Depleção da Camada de Ozônio (kg CFC-11 eq.), Radiação Ionizante (kBq U-235 eq.), Oxidação Fotoquímica (kg NMVOC eq.), Material Particulado (incidências de doenças), Toxicidade Humana – efeitos carcinogênicos (CTUh), Toxicidade Humana – efeitos não carcinogênicos (CTUh), Acidificação (mol H⁺ eq.), Eutrofização para água doce (kg P eq.), Eutrofização para água marinha (kg N eq.), Eutrofização terrestre (mol N eq.), Ecotoxicidade (CTUe), Uso da Terra (índice de qualidade do solo, Pt), Escassez Hídrica (AWARE, m³ eq), Combustíveis Fósseis (MJ) e Recursos Minerais (kg Sb eq.). Esta compilação é uma combinação entre métodos como CML, IPCC, ReCiPe e USETox.

É importante ressaltar que o método EF 3.0 possui 16 categorias de impacto, enquanto o método de AICV adotado no cenário base possui 13 categorias de impacto. Além disso, as categorias que possuem unidades diferentes não são diretamente comparáveis, visto que podem considerar diferentes mecanismos ambientais para a determinação dos fatores de caracterização. E as categorias que possuem unidades similares, são diretamente comparáveis, tendo como diferença a versão do método de AICV.

Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem versus Big bag 100% PP virgem

Na Figura 29, encontram-se os resultados comparativos considerando o método EF 3.0 conforme descrito anteriormente. Com exceção da categoria Recursos Minerais, o big bag produzido com 50% PP-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para todas as categorias de impacto, cujos resultados são conclusivos (redução maior que 10%). Os resultados são inconclusivos para quatro categorias de impacto (Toxicidade Humana|Não Câncer, Toxicidade Humana|Câncer, Eutrofização (água doce) e Uso da Terra), visto que a diferença percentual é menor que 10%.

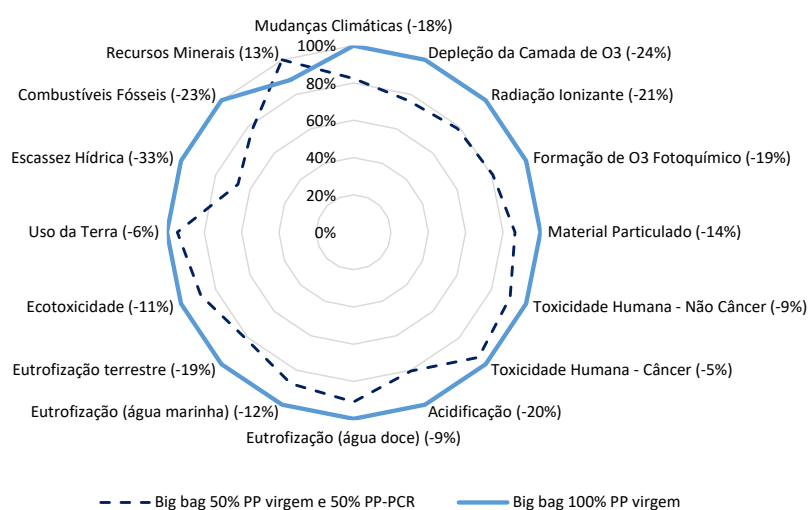


FIGURA 29. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 50% PP-PCR E BIG BAG COM 100% PP VIRGEM (MÉTODO EF)

A Figura 30 ilustra as diferenças entre as análises comparativas obtidas a partir do método EF 3.0 e do método de AICV adotado no cenário base deste estudo. De acordo com a análise, não houve alteração para nove das treze categorias avaliadas no cenário base. Por outro lado, o big bag com 50% de PP-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para Depleção da Camada de Ozônio e Ecotoxicidade (no cenário base, os resultados eram inconclusivos para estas categorias). E o big bag com 100% virgem apresenta melhor desempenho ambiental para Recursos Minerais, categoria inconclusiva no cenário base.

FIGURA 30. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MÉTODO DE AICV PARA ANÁLISE COMPARATIVA 1

Categoria de impacto (Método EF 3.0)	Unidade	Big bag 50% PP virgem e 50% PP-PCR	Big bag 100% PP virgem	Categoria de impacto (Método AICV - Cenário base)	Unidade	Big bag 50% PP virgem e 50% PP-PCR	Big bag 100% PP virgem
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq			Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq		
Depleção da Camada de O ₃	kg CFC-11 eq			Depleção da Camada de O ₃	kg CFC-11 eq		
Radiação Ionizante	kBq U-235 eq						
Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC eq			Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC eq		
Material Particulado	incidência de doenças			Inorgânicos Inaláveis	kg PM2.5 eq		
Tox. Humana - Não Câncer	CTUh			Tox. Humana - Não Câncer	CTUh		
Tox. Humana - Câncer	CTUh			Tox. Humana - Câncer	CTUh		
Acidificação	mol H ⁺ eq			Acidificação	kg SO ₂		
Eutrofização (água doce)	kg P eq			Eutrofização	kg PO ₄ --- eq		
Eutrofização (água marinha)	kg N eq						
Eutrofização terrestre	mol N eq			Ecotoxicidade	CTUe		
Ecotoxicidade	CTUe			Ocupação do Solo	m ² a		
Uso da Terra	Pt			Uso da Água	m ³		
Escassez Hídrica	m ³ eq.			Combustíveis Fósseis	MJ		
Combustíveis Fósseis	MJ			Recursos Minerais	kg Sb eq		
Recursos Minerais	kg Sb eq						

Legenda: verde (melhor resultado), vermelho (pior resultado) e cinza (inconclusivo, diferença igual ou menor que 10%).

Big bag 50% PP-PCR e 50% PP virgem versus Big bag 100% PET-PCR

Na Figura 31, encontram-se os resultados comparativos considerando o método EF 3.0 conforme descrito anteriormente. De acordo com os resultados conclusivos, o big bag produzido com 50% PP-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para dez categorias de impacto, enquanto o big bag produzido com 100% PET-PCR apresenta melhor desempenho para três categorias de impacto. Os resultados são inconclusivos para três categorias de impacto (Acidificação, Eutrofização (água marinha) e Uso da Terra), visto que a diferença percentual é menor que 10%.

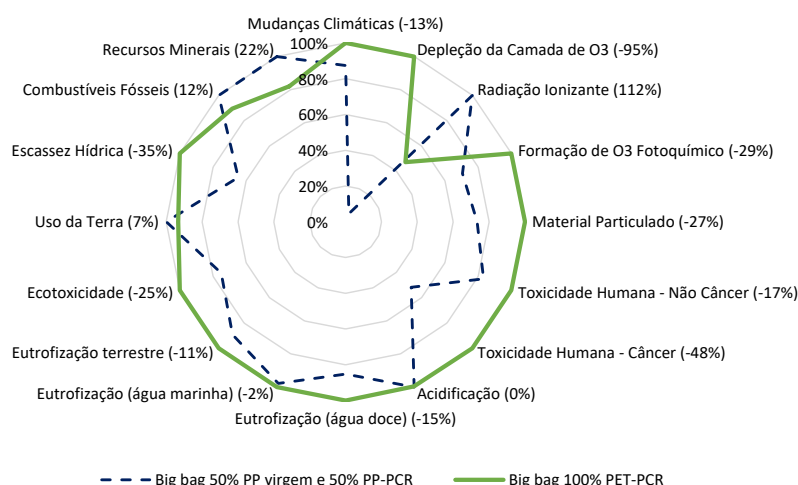


FIGURA 31. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 50% PP VIRGEM E 50% PP-PCR E BIG BAG COM 100% PET-PCR (MÉTODO EF)

A Figura 32 ilustra as diferenças entre as análises comparativas obtidas a partir do método EF 3.0 e do método de AICV adotado no cenário base deste estudo. De acordo com

a análise, não houve alteração para nove das treze categorias avaliadas no cenário base. Por outro lado, o big bag com 100% PET-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para Oxidação Fotoquímica (inversão do resultado). E o big bag com 50% PP-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para Eutrofização (água doce) e Ecotoxicidade, categorias inconclusivas no cenário base.

FIGURA 32. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MÉTODO DE AICV PARA ANÁLISE COMPARATIVA 2

Categoria de impacto (Método EF 3.0)	Unidade	Big bag 50% PP virgem e 50% PP-PCR	Big bag 100% PET-PCR	Categoria de impacto (Método AICV - Cenário base)	Unidade	Big bag 50% PP virgem e 50% PP-PCR	Big bag 100% PET-PCR
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq			Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq		
Depleção da Camada de O3	kg CFC-11 eq			Depleção da Camada de O3	kg CFC-11 eq		
Radiação Ionizante	kBq U-235 eq						
Formação de O3 Fotoquímico	kg NMVOC eq			Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC eq		
Material Particulado	incidências de doenças			Inorgânicos Inaláveis	kg PM2.5 eq		
Tox. Humana - Não Câncer	CTUh			Tox. Humana - Não Câncer	CTUh		
Tox. Humana - Câncer	CTUh			Tox. Humana - Câncer	CTUh		
Acidificação	mol H ⁺ eq			Acidificação	kg SO ₂		
Eutrofização (água doce)	kg P eq			Eutrofização	kg PO ₄ --- eq		
Eutrofização (água marinha)	kg N eq						
Eutrofização terrestre	mol N eq			Ecotoxicidade	CTUe		
Ecotoxicidade	CTUe			Ocupação do Solo	m ² a		
Uso da Terra	Pt			Uso da Água	m ³		
Escassez Hídrica	m ³ eq.			Combustíveis Fósseis	MJ		
Combustíveis Fósseis	MJ			Recursos Minerais	kg Sb eq		
Recursos Minerais	kg Sb eq						

Legenda: verde (melhor resultado), vermelho (pior resultado) e cinza (inconclusivo, diferença igual ou menor que 10%).

Big bag 100% PP virgem versus Big bag 100% PET virgem

Na Figura 33, encontram-se os resultados comparativos considerando o método EF 3.0 conforme descrito anteriormente. O big bag produzido com 100% PP virgem apresenta melhor desempenho ambiental para todas as categorias de impacto avaliadas, com exceção para Radiação Ionizante.

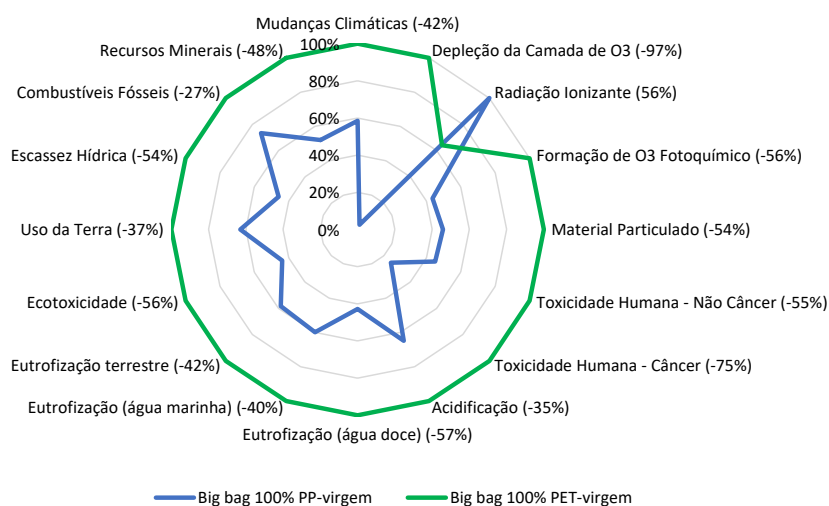


FIGURA 33. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 100% PP VIRGEM E BIG BAG COM 100% PET VIRGEM (MÉTODO EF)

A Figura 34 ilustra as diferenças entre as análises comparativas obtidas a partir do método EF 3.0 e do método de AICV adotado no cenário base deste estudo. De acordo com a análise, não houve alteração para todas as categorias avaliadas no cenário base.

FIGURA 34. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MÉTODO DE AICV PARA ANÁLISE COMPARATIVA 3

Categoria de impacto (Método EF 3.0)	Unidade	Big bag 100% PP- virgem	Big bag 100% PET- virgem	Categoria de impacto (Método AICV - Cenário base)	Unidade	Big bag 100% PP- virgem	Big bag 100% PET- virgem
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq			Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq		
Depleção da Camada de O ₃	kg CFC-11 eq			Depleção da Camada de O ₃	kg CFC-11 eq		
Radiação Ionizante	kBq U-235 eq						
Formação de O ₃ Fotoquímico	kg NMVOC eq			Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC eq		
Material Particulado	incidências de doenças			Inorgânicos Inaláveis	kg PM2.5 eq		
Tox. Humana - Não Câncer	CTUh			Tox. Humana - Não Câncer	CTUh		
Tox. Humana - Câncer	CTUh			Tox. Humana - Câncer	CTUh		
Acidificação	mol H ⁺ eq			Acidificação	kg SO ₂		
Eutrofização (água doce)	kg P eq						
Eutrofização (água marinha)	kg N eq			Eutrofização	kg PO ₄ --- eq		
Eutrofização terrestre	mol N eq						
Ecotoxicidade	CTUe			Ecotoxicidade	CTUe		
Uso da Terra	Pt			Ocupação do Solo	m ² a		
Escassez Hídrica	m ³ eq.			Uso da Água	m ³		
Combustíveis Fósseis	MJ			Combustíveis Fósseis	MJ		
Recursos Minerais	kg Sb eq			Recursos Minerais	kg Sb eq		

Legenda: verde (melhor resultado), vermelho (pior resultado) e cinza (inconclusivo, diferença igual ou menor que 10%).

Big bag 100% PP virgem versus Big bag 100% PET-PCR

Na Figura 35, encontram-se os resultados comparativos considerando o Método EF 3.0 conforme descrito anteriormente. O big bag produzido com 100% PET-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para cinco das categorias de impacto avaliadas (Radiação Ionizante, Acidificação, Eutrofização (água marinha), Uso da Terra e Combustíveis Fósseis). O big bag produzido com 100% PP virgem também apresenta melhor desempenho ambiental para cinco das categorias de impacto avaliadas (Depleção da Camada de Ozônio, Formação de Ozônio Fotoquímico, Material Particulado, Toxicidade Humana|Câncer e Ecotoxicidade). Os resultados são inconclusivos para seis categorias de impacto (Mudanças Climáticas, Toxicidade Humana|Não Câncer, Eutrofização (água doce), Eutrofização terrestre, Escassez Hídrica e Recursos Minerais).

A Figura 36 ilustra as diferenças entre as análises comparativas obtidas a partir do método EF 3.0 e do método de AICV adotado no cenário base deste estudo. De acordo com a análise, não houve alteração para oito das treze categorias avaliadas no cenário base. Por outro lado, o big bag com 100% PET-PCR apresenta melhor desempenho ambiental para Uso da Terra (resultado inconclusivo no cenário base). E o big bag com 100% PP virgem apresenta melhor desempenho ambiental para Ecotoxicidade (resultado inconclusivo no cenário base). As categorias Eutrofização (água doce) e Recursos Minerais tornam-se inconclusivas, sendo que no cenário base, o big bag com 100% PP virgem possuía desempenho ambiental inferior. E a categoria Toxicidade Humana|Não Câncer também se

torna inconclusiva, sendo que no cenário base, o big bag com 100% PET-PCR possuía o desempenho ambiental inferior.

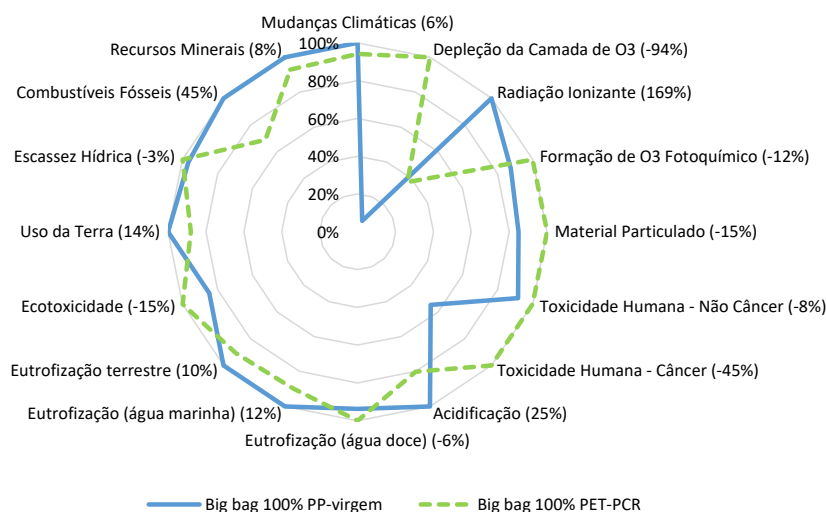


FIGURA 35. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 100% PP VIRGEM E BIG BAG COM 100% PET-PCR (MÉTODO EF)

FIGURA 36. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MÉTODO DE AICV PARA ANÁLISE COMPARATIVA 4

Categoria de impacto (Método EF 3.0)	Unidade	Big bag 100% PP-virgem	Big bag 100% PET-PCR
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq		
Depleção da Camada de O3	kg CFC-11 eq		
Radiação Ionizante	kBq U-235 eq		
Formação de O3 Fotoquímico	kg NMVOC eq		
Material Particulado	incidências de doenças		
Tox. Humana - Não Câncer	CTUh		
Tox. Humana - Câncer	CTUh		
Acidificação	mol H ⁺ eq		
Eutrofização (água doce)	kg P eq		
Eutrofização (água marinha)	kg N eq		
Eutrofização terrestre	mol N eq		
Ecotoxicidade	CTUe		
Uso da Terra	Pt		
Escassez Hídrica	m ³ eq.		
Combustíveis Fósseis	MJ		
Recursos Minerais	kg Sb eq		

Categoria de impacto (Método AICV - Cenário base)	Unidade	Big bag 100% PP-virgem	Big bag 100% PET-PCR
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq		
Depleção da Camada de O3	kg CFC-11 eq		
Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC eq		
Inorgânicos Inaláveis	kg PM2.5 eq		
Tox. Humana - Não Câncer	CTUh		
Tox. Humana - Câncer	CTUh		
Acidificação	kg SO ₂		
Eutrofização	kg PO ₄ --- eq		
Ecotoxicidade	CTUe		
Ocupação do Solo	m ² a		
Uso da Água	m ³		
Combustíveis Fósseis	MJ		
Recursos Minerais	kg Sb eq		

Legenda: verde (melhor resultado), vermelho (pior resultado) e cinza (inconclusivo, diferença igual ou menor que 10%).

D. Análises de Cenários

Esta seção concentra-se em apresentar os efeitos do conteúdo de resina PCR na composição dos big bags de PP e de PET e da taxa de reciclagem no fim de vida dos big bags de PP e de PET. Busca-se, com essas análises, avaliar a variação dos resultados para diferentes escolhas ao longo do estudo.

I. Conteúdo de resina PCR na composição dos big bags de PP e de PET

Atualmente, a Embrasa produz big bags de PP com até 50% de conteúdo reciclado, a partir do uso de PP-PCR. A Figura 37 apresenta os resultados para as categorias de impacto avaliadas considerando o aumento do conteúdo reciclado até 100%.

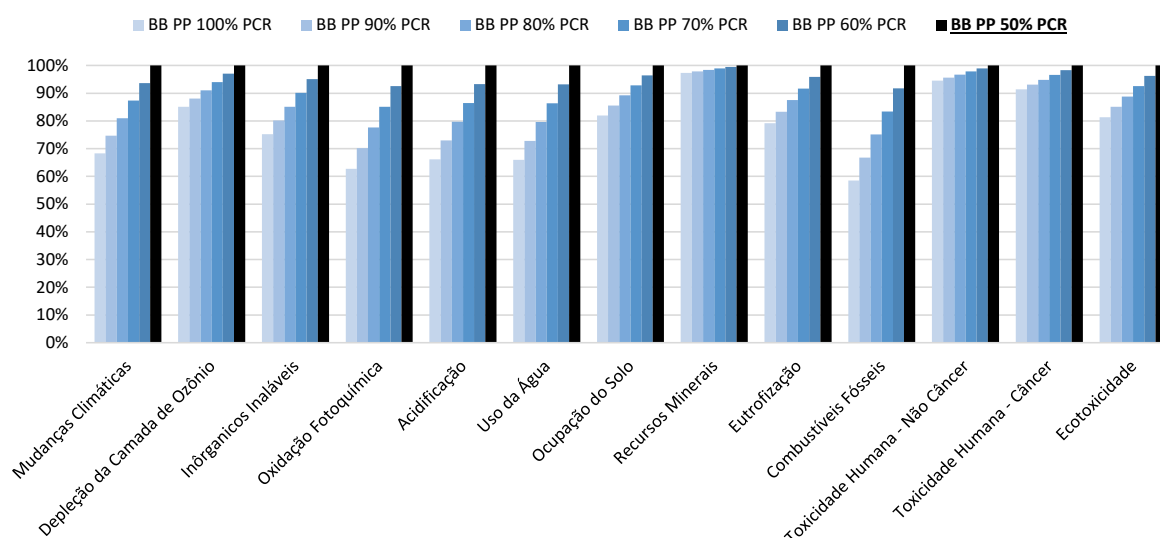


FIGURA 37. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO RECICLADO - RESULTADOS PARA O BIG BAG 50% PP-PCR

Os resultados indicam que o aumento do conteúdo reciclado promove melhoria nos resultados para todas as categorias de impacto. No entanto, o aumento do conteúdo reciclado não é significativo para as categorias Recursos Minerais e Toxicidade Humana|Não Câncer, pois estas categorias possuem influência dos aditivos e das etapas de transporte, respectivamente.

O cenário base considerou a produção de big bag com 100% PET-PCR, a Figura 38 apresenta os resultados para as categorias de impacto avaliadas considerando a redução do conteúdo reciclado até 50%. Os resultados indicam que a redução do conteúdo reciclado promove o aumento dos impactos para todas as categorias, com exceção para Ocupação do Solo, a qual possui influência do consumo de eletricidade.

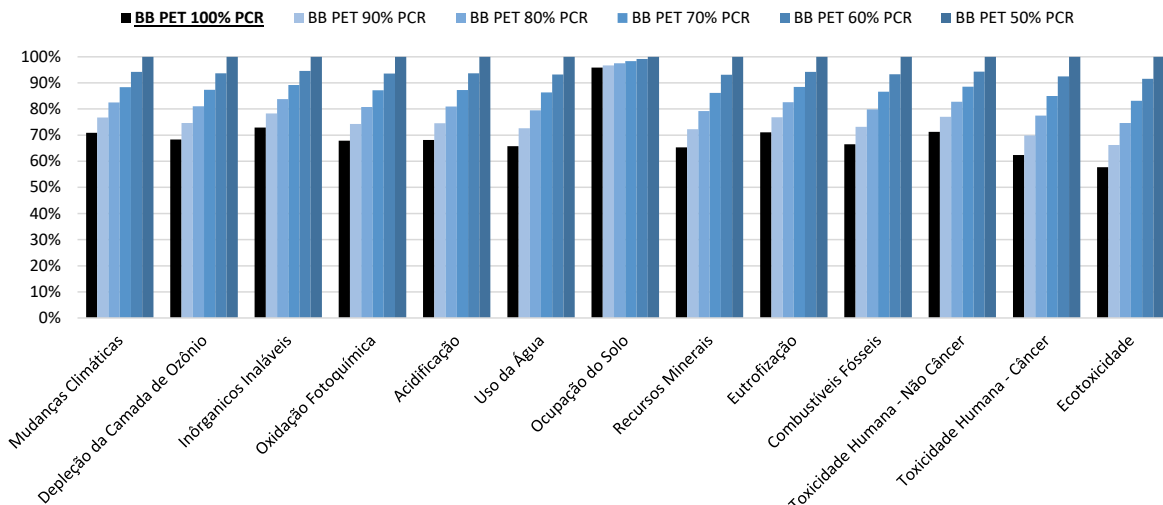


FIGURA 38. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO RECICLADO - RESULTADOS PARA O BIG BAG 100% PET-PCR

Em relação aos resultados para Mudanças Climáticas, a Figura 39 indica que o big bag produzido com PP-PCR possui os melhores resultados em comparação com o big bag produzido com PET-PCR em iguais proporções. Além disso, a análise também revela que o big bag com 70% ou menos de PET-PCR apresenta maior impacto em comparação com big bag produzido com 100% PP virgem (0% PP-PCR).

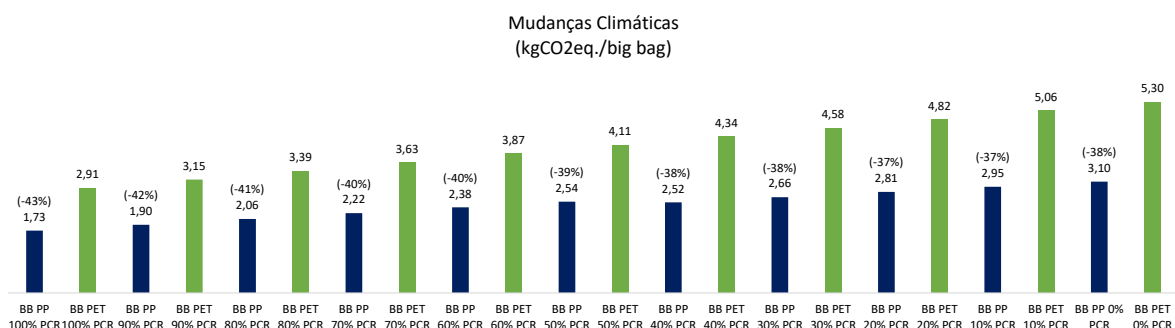


FIGURA 39. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO RECICLADO (FATOR A = 0,50) – INFLUÊNCIA PARA CATEGORIA MUDANÇAS CLIMÁTICAS

II. Taxa de reciclagem dos big bags de PP e de PET

A taxa de reciclagem adotada no cenário base refere-se a reciclagem média dos plásticos em geral no Brasil. Devido à ausência de dados sobre a taxa de reciclagem dos big bags, a Figura 40 e a Figura 41 apresentam os resultados da avaliação comparativa considerando a variação de 23,1% a 100%.

Para os big bags de PP, a variação da taxa de reciclagem possui influência significativa para todas as categorias de impacto, com exceção para Recursos Minerais, Toxicidade Humana|Não Câncer e Câncer e Ecotoxicidade. E para os big bags de PET, a variação da taxa

de reciclagem possui influência significativa para todas as categorias de impacto, com exceção para Ocupação do Solo.

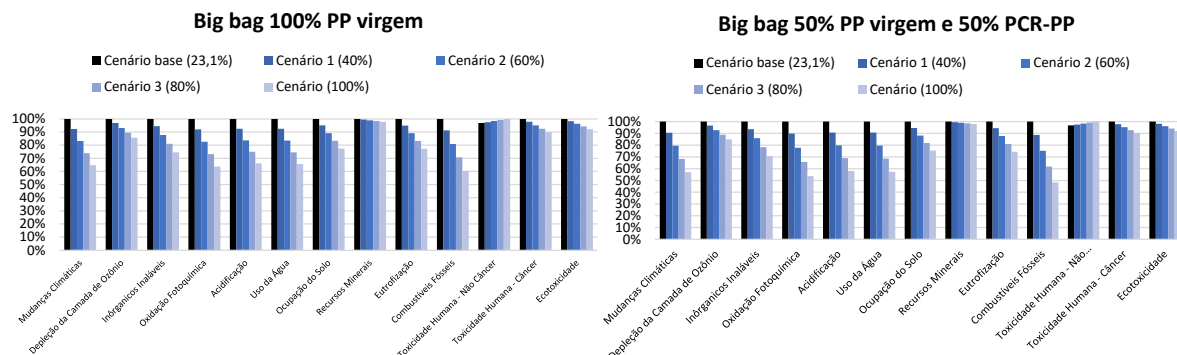


FIGURA 40. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA TAXA DE RECICLAGEM - RESULTADOS PARA OS BIG BAGS DE PP

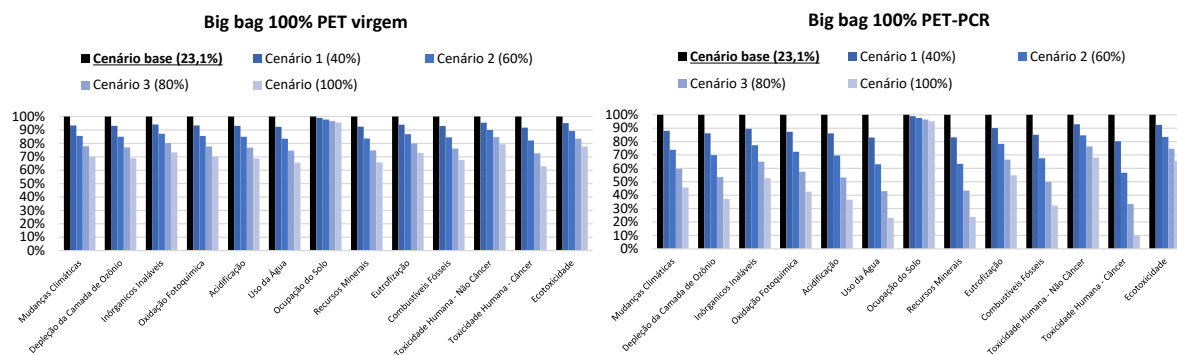


FIGURA 41. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA TAXA DE RECICLAGEM - RESULTADOS PARA OS BIG BAGS DE PET

A Figura 42 apresenta os resultados para a categoria Mudanças Climáticas, indicando que o aumento da taxa de reciclagem para 100% ocasiona reduções entre 35% e 59% para os resultados. A partir da taxa de reciclagem de 40% (cenário 1), a comparação entre o big bag 50% PP-PCR e 100% PET-PCR torna-se inconclusiva (diferença menor que 10% entre os resultados).

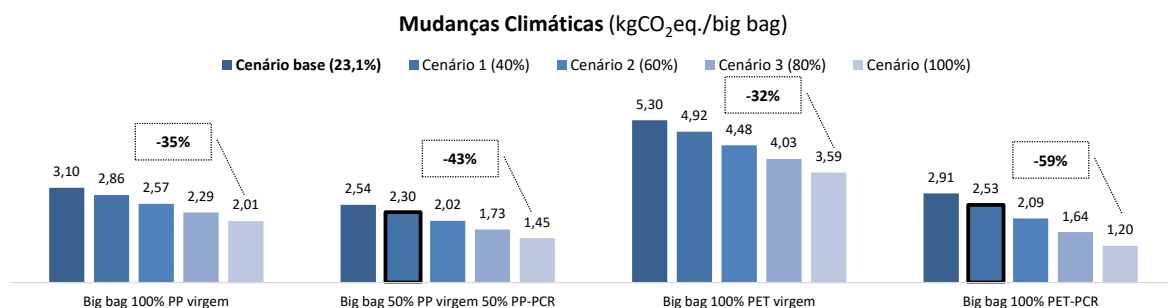


FIGURA 42. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DA TAXA DE RECICLAGEM — INFLUÊNCIA PARA CATEGORIA MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A Figura 43 inclui os resultados hipotéticos da produtos de big bag com 100% PP-PCR, indicando que o aumento da taxa de reciclagem para 100% ocasiona reduções entre 35% e 63% para os resultados. Neste caso, o big bag 100% PP-PCR apresenta o melhor resultado para todos os cenários avaliados.

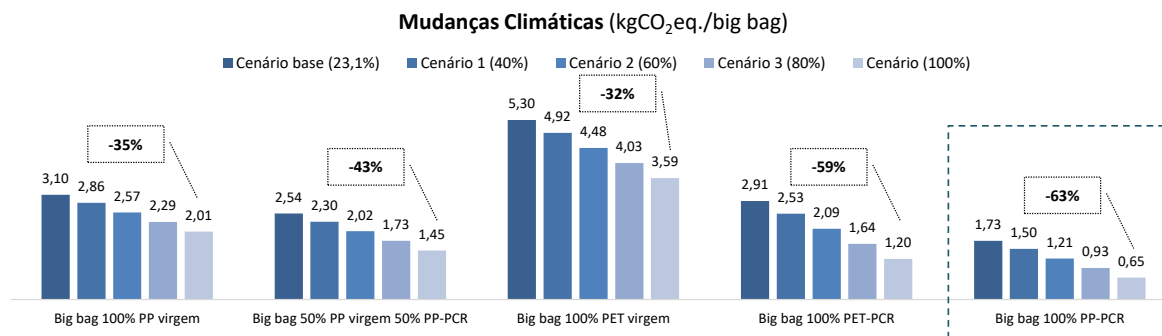


FIGURA 43. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO RECICLADO — INFLUÊNCIA PARA CATEGORIA MUDANÇAS CLIMÁTICAS, INCLUINDO CENÁRIO HIPOTÉTICO DE PRODUÇÃO DE BIG BAG COM 100% PP-PCR

Aplicações e Conclusões

A. Aplicações

Este estudo e respectivas conclusões e resultados devem ser usados tendo-se em mente que se objetivou comparar o potencial impacto ambiental, por categoria de impacto, entre diferentes sistemas de big bags com capacidade para o acondicionamento de 1000 kg de material. Sendo comparáveis, portanto:

- 1 big bag com 50% PP reciclado (PCR) e 50% PP virgem produzido pela Embrasa na região sudeste do Brasil, distribuição ao consumidor final, reciclagem e disposição final em aterro e lixão.
- 1 big bag com 100% PP virgem produzido pela Embrasa na região sudeste do Brasil, distribuição ao consumidor final, reciclagem e disposição final em aterro e lixão.
- 1 big bag com 100% PET reciclado (PCR) produzido na região sudeste do Brasil, distribuição ao consumidor final, reciclagem e disposição final em aterro e lixão.
- 1 big bag com 100% PET virgem produzido na região sudeste do Brasil, distribuição ao consumidor final, reciclagem e disposição final em aterro e lixão.

É indispensável entender como este estudo foi conduzido, incluindo os

Pressupostos e Limitações, para que os resultados e conclusões sejam aplicados apropriadamente. É importante ressaltar tais considerações de forma crítica, como descritas abaixo:

Parte dos processos utilizados para representar os materiais envolvidos são de origem internacional, da base de dados ecoinvent. Buscou-se escolher processos mais representativos da realidade local, no entanto, é possível que as condições tecnológicas sejam diferentes;

No sistema de produto “big bags”, os processos utilizados para representar os materiais envolvidos são da base de dados ecoinvent v3.8 modelados de acordo com dados primários referentes a média da produção do ano de 2021. Com exceção para o processo de reciclagem do PET, cujos dados foram obtidos da literatura;

De maneira geral, alguns dados de ICV descrevem operações europeias, implicando que este estudo pode não ser totalmente representativo das práticas do local alvo do estudo. Entretanto, uma base de dados de qualidade equivalente, transparente e robusta ainda não está disponível para as regiões alvo ou para outras regiões geográficas mais semelhantes;

A ACV é uma técnica de suporte à decisão, devendo ser utilizada como ferramenta auxiliar;

Avaliações consequenciais, ou ainda a abordagem consequencial do ciclo de vida, não foram adotadas neste estudo. Portanto, todos os resultados e conclusões somente devem ser utilizados sobre o contexto de produção atual;

Diferentemente de outras metodologias de contexto regulatório, a ACV aponta o impacto ambiental potencial e fornece resultados de um cenário mais provável.

B. Conclusões

Deve-se levar em consideração, quando da comunicação, que os resultados são obtidos em relação a muitos fatores, como por exemplo, os pressupostos estabelecidos, dados e processos empregados, escolha dos limites do estudo entre outros.

De acordo com o cenário base, ao comparar as quatro opções de big bags avaliadas neste estudo, as seguintes conclusões foram obtidas:

- O big bag com 100% PET virgem apresenta desempenho ambiental inferior para todas as categorias de impacto, com exceção da categoria Uso do solo, cujos resultados são inconclusivos.
- Os resultados também são inconclusivos para as categorias de Toxicidade Humana e Ecotoxicidade, Depleção da Camada de Ozônio, Acidificação e Eutrofização.
- O big bag com 50% PP-PCR e 50% PP virgem possui o melhor desempenho ambiental para Mudanças Climáticas, Inorgânicos Inaláveis e Uso da água.
- O big bag com 100% PET-PCR possui o melhor desempenho ambiental para Oxidação Fotoquímica, Recursos Minerais e Combustíveis Fósseis.

O big bag com 50% PP-PCR e 50% PP virgem possui o menor potencial de aquecimento global, com redução de 13% em comparação com o big bag com 100% PET-PCR e de 19% em comparação com o big bag com 100% PP virgem.

Destaca-se que o processo de envase e o estágio de uso não foram considerados nesse estudo. Porém, por se tratarem de processos semelhantes para ambos os sistemas sob avaliação, essa exclusão não prejudica as conclusões desse estudo.

Para o sistema de produto big bags de PP virgem e PP reciclado, o processo de produção do polipropileno é o principal contribuinte para as categorias de impacto avaliadas, devido ao consumo de nafta como feedstock. O consumo de eletricidade e a produção dos aditivos possuem influência secundária para as categorias avaliadas.

Para o sistema de produto big bags de PET virgem e PET reciclado, o processo de produção do polietileno tereftalato é o principal contribuinte para as categorias de impacto avaliadas, devido ao consumo de PTA e EG como matéria-prima. O consumo de eletricidade para a produção dos big bags e as etapas de transporte possuem menor contribuição para as categorias avaliadas.

A reciclagem no fim de vida dos big bags apresenta benefícios ambientais para todas as categorias de impacto. Para os big bags de PP, os principais benefícios ocorrem para Mudanças Climáticas, Oxidação Fotoquímica, Acidificação, Uso da Água e Combustíveis Fósseis. E para os big bags de PET, os principais benefícios ocorrem para Depleção da Camada de Ozônio, Uso da água, Recursos Minerais, Combustíveis Fósseis e Toxicidade Humana|Câncer.

As análises de sensibilidade demonstram que a variação da distância de coleta dos resíduos pós-consumo (PP e PET) possui influência significativa somente para as categorias de impacto Toxicidade Humana|Não Câncer e Ecotoxicidade.

O aumento do consumo de eletricidade no processo de reciclagem dos big bags de PP pós-consumo possui influência significativa somente para as categorias Depleção da Camada de Ozônio e Ocupação do Solo. Destaca-se que mesmo com o aumento de 4x no consumo de eletricidade na reciclagem do PP, o big bag 50% PP-PCR possui o menor potencial de aquecimento global.

Segundo a análise de sensibilidade do método de AICV, realizada com o método EF 3.0, as seguintes conclusões foram obtidas:

- O big bag com 100% PET virgem apresenta desempenho ambiental inferior para todas as categorias de impacto, com exceção para Radiação Ionizante, na qual o big bag com 100% PET-PCR possui o melhor desempenho ambiental.
- Os resultados são inconclusivos para as categorias de Toxicidade Humana, Acidificação, Eutrofização (água doce e água marinha) e Uso da Terra.
- O big bag com 50% PP-PCR e 50% PP virgem possui o melhor desempenho ambiental para Mudanças Climáticas, Depleção da Camada de Ozônio, Oxidação Fotoquímica, Material Particulado, Eutrofização terrestre, Ecotoxicidade e Escassez Hídrica.
- O big bag com 100% PET-PCR possui o melhor desempenho ambiental para Radiação Ionizante, Recursos Minerais e Combustíveis Fósseis.

Os resultados e observações provenientes da Análise de Sensibilidade não justificam iteração para o refinamento do escopo, objetivo ou fronteira deste estudo. Além disso, as inversões dos resultados comparativos observadas, principalmente, na análise de sensibilidade do método não são relevantes.

Segundo as análises de cenário, ao comparar big bag com a mesma quantidade de conteúdo reciclado, o big bag feito com PP-PCR apresenta o melhor resultado para Mudanças Climáticas. Além disso, a análise também revela que o big bag com 70% ou menos de PET-PCR apresenta maior impacto em comparação com big bag 100% PP virgem.

A partir da taxa de reciclagem de 40% a comparação entre o big bag 50% PP-PCR e 100% PET-PCR torna se inconclusiva. No entanto, ao incluir o big bag 100% PP-PCR na

comparação, este apresenta os melhores resultados, independentemente da taxa de reciclagem.

Ao adotar o Fator A igual a 1, o big bag 100% PET-PCR apresenta o melhor desempenho ambiental para Mudanças Climáticas. Isso ocorre, pois esta abordagem considera que o PET reciclado não possui nenhum encargo ambiental do PET virgem (material primário que o originou). Sendo assim, há uma inversão de resultados em comparação com cenário base deste estudo (Fator A igual a 0,50), no qual o big bag com 50% PP-PCR e 50% PP virgem possui o melhor desempenho ambiental para Mudanças Climáticas. Por outro lado, em ambas as abordagens (Fator A igual a 1 e 0,50), o big bag 100% PET virgem apresenta o pior desempenho para Mudanças Climáticas.

A escolha por usar o método compilado a partir de modelos bem validados e reconhecidos reduz a incerteza em relação aos métodos de ponto final. A precisão dos fatores de caracterização, entretanto, depende do progresso das pesquisas em andamento nos mais diferentes campos da ciência, em busca de modelos de impacto do ciclo de vida, assim como da integração das descobertas atuais aos métodos operacionais da AICV. A quantificação das incertezas no nível do método de AICV, ainda não é um consenso na comunidade internacional, não existindo nenhum método revisado e reconhecido para tal análise.

A análise da qualidade dos dados suporta as conclusões encontradas, pois a maioria das informações empregadas possui alto ou médio nível de qualidade. Desta forma, não há necessidade primária em desenvolver Análise de Incerteza, com método de Monte Carlo.

Referências Bibliográficas

- [1] [ABNT, 2009a]
ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 14.040 - Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.
- [2] [ABNT, 2009b]
ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 14.044 - Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.
- [3] [ABRELPE, 2022]
Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021. Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em 16.09.2022.
- [4] [CEMPRE, 2020]
Taxas de reciclagem. Compromisso Empresarial para Reciclagem. Disponível em <https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>. Acesso em 16.09.2022.
- [5] [Cherubini et al., 2022]
Cherubini, E., Silva, F.B., Rocha T.P., Kabe, Y.H.O., Martins, M.G., Scachetti, M., Ribeiro, L.G., Carvalho, P.S.; Chapman, S.K.. **Avaliação de Ciclo de Vida: Requisitos ISO 14044 x prática Recomendações da Rede ACV para questões subjetivas**. White Paper, Rede Empresarial Brasileira de Avaliação do Ciclo de Vida (Rede ACV), Janeiro de 2022.
- [6] [CML, 2001]
de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M., Lindeijer, E., Roorda, A., van der Ven, B., Weidema e J. B. Guinée, J.B. (Ed.). **Centre of Environmental Science. Leiden University (CML): Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards**. Final report. Maio 2001.
- [7] [EC, 2018]
European Commission. Product Environmental Footprint – Category Rules Guidance. Version 6.3. 2018.
- [8] [Gileno, 2020]
Gileno, L. A. **Avaliação do Ciclo de Vida da Reciclagem de Garra PET em contexto brasileiro: rotas B2B (bottle-to-bottle) e B2F (bottle-to-fiber)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, MG. 2020.
- [9] [Goedkoop et al., 2009]
ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprise harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition Report I: Characterisation; 6 Janeiro 2009, 126p. Disponível em <http://www.lcia-recipe.net>. Acesso em 30.04.2019.
- [10] [Hauschild e Wenzel, 1998]
Hauschild, M., Wenzel, H. **Environmental Assessment of Products – Vol. 2: Scientific Background**, Chapman & Hall, London (UK).
- [11] [Heijungs, 1992]
Environmental life cycle assessment of products, 1992. Centre of environmental science (CML), Leiden.

- [12] [Humbert *et al.*, 2009]
IMPACT 2002+ user guide: draft for version 2.1. Quantis, Lausanne, Switzerland.
- [13] [ILCD 2011]
Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. 2011
- [14] [IPCC, 2007]
Fourth Assessment Report – Contribution of Working Group I: Technical Summary 2007. International Panel on Climate Change. Março, 2008.
- [15] [MMA, 2004]
Agenda 21 Brasileira. Disponível em <https://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-brasileira.html>. Acesso em 17.10.2019.
- [16] [MMA, 2011]
Plano de Ação para Produção e Consumo Sustentáveis (PPCS). Disponível em <https://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/plano-nacional.html>. Acesso em 17.10.2019.
- [17] [MME, 2018]
Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil. Nota Técnica DPG-SPT Nº 04/2018. Empresa de Pesquisa Energética - Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2018.
- [18] [MPOG, 2011]
Plano Plurianual - Seção de Políticas de Desenvolvimento Produtivo e Ambiental. Disponível em <http://www.planejamento.gov.br/assuntos/planeja/plano-plurianual/ppas-antecedentes>. Acesso em 17.10.2019.
- [19] [PlasticsEurope, 2017]
PlasticsEurope recommendation on Steam Cracker allocation. Life Cycle and Sustainability working group of PlasticsEurope. Setembro, 2017. Disponível em https://www.plasticseurope.org/application/files/9615/4756/5366/PlasticsEurope_recommendation_on_Steam_Cracker_allocation-_Juillet_2018.pdf. Acesso em 30.05.2019.
- [20] [Rosenbaum *et al.*, 2008]
USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for Human Toxicity and freshwater Ecotoxicity in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, Volume 13, Issue 7, pp 532-546, nov. 2008.
- [21] [Van Zelm *et al.*, 2008]
Van Zelm, R., Huijbregts, M.A.J., Den Hollander, H.A., Van Jaarsveld, H.A., Sauter, F.J., Struijs, J., Van Wijnen, H.J., Van de Meent, D. **European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment.** Atmospheric Environment, v. 42, p. 441-453, 2008.
- [22] [Weidema e Wesnaes, 1996]
Weidema, B.P., Wesnaes, M.S. **Data quality management of life cycle inventories-an example of using data quality indicators.** Journal of Cleaner Production, v. 4, n. 3-1, p. 167-174.
- [23] [WMO 2010]
Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 52, 516 pp., Suíça, 2011.

Anexo A – Apresentação de Método Recomendado

A escolha das categorias de impacto a serem consideradas no método de AICV recomendado pela ACV Brasil baseia-se inicialmente nas prioridades brasileiras, estabelecidas em planos e agendas nacionais, com relação à sustentabilidade e o desenvolvimento produtivo e ambiental.

Controlar as alterações climáticas é uma prioridade para o governo brasileiro, e por isso a categoria **Aquecimento Global** está incluída no método de avaliação de impacto. Há menção para essa demanda nas ações prioritárias da Agenda 21 brasileira [MMA, 2004], no segundo objetivo descrito (Ecoeficiência e responsabilidade social das empresas), e no Plano Plurianual [MPOG, 2011], na seção de Políticas de Desenvolvimento Produtivo e Ambiental.

Da mesma forma, a gestão de qualidade do ar é importante para o governo brasileiro, como mencionado na seção de Políticas de Desenvolvimento Produtivo e Ambiental do Plano Plurianual [MPOG, 2011]. Justifica-se, assim, a inclusão das categorias de impacto **Depleção da Camada de Ozônio, Oxidação Fotoquímica, Inorgânicos Inaláveis** no método de avaliação de impacto.

A **Eutrofização, Acidificação** e o **Uso da Água** também são considerados no método, ponderando-se que a universalização do saneamento, a fim de proteger o meio ambiente e a saúde humana, é um dos objetivos da Agenda 21 Brasileira, e que a conservação e gestão da água [MMA, 2004] é citada no Plano Plurianual [MPOG, 2011], na seção de Políticas de Desenvolvimento Produtivo e Ambiental.

A **Toxicidade Humana** é também considerada relevante porque promover a saúde e prevenir doenças é uma das metas da Agenda 21 Brasileira [MMA, 2004] e, além disso, a promoção da segurança química tem uma importância inequívoca para o Brasil, de acordo com a seção de Políticas de Desenvolvimento Produtivo e Ambiental do Plano Plurianual [MPOG, 2011].

Justifica-se ainda a consideração da categoria **Ecotoxicidade**, em função da preocupação com a conservação da biodiversidade, que é abordada no Plano de Ação para Produção e Consumo Sustentáveis [MMA, 2011] e na seção de Políticas de Desenvolvimento Produtivo e Ambiental do Plano Plurianual [MPOG, 2011].

O **Esgotamento de recursos minerais** e o **Uso de Combustíveis Fósseis** são categorias de impacto também consideradas no método, com base no primeiro objetivo da Agenda 21 Brasileira [MMA, 2004] (Produção e consumo sustentáveis contra a cultura do desperdício), onde se afirma que o uso desnecessário de embalagens e produtos claramente deve ser evitado, bem como deve ser promovida a adoção de tecnologias menos intensivas em energia. Além disso, o segundo objetivo (Ecoeficiência e responsabilidade social das empresas) incentiva a redução de energia, água e consumo de outros recursos.

A justificativa para a inclusão da **Ocupação do Solo** está no grande interesse do governo em promover a agricultura sustentável e o controle do desmatamento, citado nos objetivos 12 e 14 da Agenda 21 Brasileira [MMA, 2004]. Da mesma forma, a agricultura sustentável é abordada no Plano de Ação para Produção e Consumo Sustentáveis [MMA, 2011].

Consideradas as prioridades brasileiras, a atribuição de indicadores de impacto a cada uma das categorias de impacto selecionadas se deu por meio da consideração das seguintes premissas:

- Considerando os impactos ambientais mais relevantes para o Brasil, sempre que possível, fatores não regionalizados devem ser utilizados;
- Quando modelos de destino não podem ser evitados, métodos considerando fatores globais devem ser utilizados;
- Caso as categorias selecionadas não contemplem impactos ambientais relevantes aos produtos estudados, categorias podem ser adicionadas.

Anexo B – Matriz de Pedigree

TABELA 9. RELAÇÃO DOS INDICADORES E NÍVEIS DE QUALIDADE DA MATRIZ DE PEDIGREE CONSIDERADO

Indicador	1	2	3	4	5
Confiança	Dados verificados baseados em medidas	Dados verificados parcialmente baseados em hipóteses ou dados não verificados baseados em medições	Dados não verificados parcialmente baseados em suposições qualificadas	Estimativas qualificadas (ex.: experiência industrial). Dados derivados de informações teóricas (ex: estequiometria, entalpia)	Dados de processos ou materiais mas com tecnologia diferente, ou dados de processos em escala de laboratório e mesma tecnologia
Representatividade	Dados representativos de empresas relevantes para o mercado considerado durante um período adequado para nivelar as flutuações normais	Dados representativos de mais de 50% das empresas relevantes para o mercado considerado durante um período adequado para nivelar as flutuações normais	Dados representativos de menos de 50% nas empresas relevantes para o mercado considerado ou > 50% de empresas, mas em curto período	Dados representativos de somente uma empresa relevante no mercado considerado ou algumas empresas, mas por períodos menores	Representatividade desconhecida ou dados de poucas empresas e por períodos menores
Correlação Temporal	Menos de 3 anos de diferença do ano de referência	Menos de 6 anos de diferença do ano de referência	Menos de 10 anos de diferença do ano de referência	Menos de 15 anos de diferença do ano de referência	Idade dos dados desconhecida mais de 15 anos de diferença do ano de referência
Correlação Geográfica	Dados da região de estudo	Média de dados de uma área maior que a região de estudos é incluída	Dados de uma área menor do que a região de estudos ou de área similar		Dados desconhecidos ou regiões diferentes (América do Norte ao invés de Ásia)
Correlação Técnica	Dados de empresas processos e materiais sob estudo	-	Dados de processos ou materiais relacionados mas com mesma tecnologia ou dados de processos e materiais estudados e diferentes tecnologias	Dados de processos ou materiais mas com tecnologia diferente, ou dados de processos em escala de laboratório e mesma tecnologia	Dados de processos ou materiais relacionados mas em escala de laboratório de diferente tecnologia

Anexo C – Análise da Qualidade dos Dados

TABELA 10. ANÁLISE DA QUALIDADE DOS DADOS PARA O BIG BAG 100% PP VIRGEM

	Produção da Resina Virgem	Transporte até a Embrasa	Produção do Big Bag	Distribuição	Fim de Vida
Confiança	1	1	1	2	3
Representatividade	1	1	1	2	1
Correlação Temporal	2	1	1	1	1
Correlação Geográfica	1	1	1	1	1
Correlação Técnica	1	1	1	1	1
Pontuação Total	6	5	5	7	7
<i>Classificação conforme Tabela 4</i>	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

TABELA 11. ANÁLISE DA QUALIDADE DOS DADOS PARA O BIG BAG 50% PP VIRGEM E 50% PP-PCR

	Produção da Resina Virgem	Transporte até a Embrasa	Produção da Resina reciclada	Transporte até a Embrasa	Produção do Big Bag	Distribuição	Fim de Vida
Confiança	1	1	1	1	1	2	3
Representatividade	1	1	1	1	1	2	1
Correlação Temporal	2	1	1	1	1	1	1
Correlação Geográfica	1	1	1	1	1	1	1
Correlação Técnica	1	1	1	1	1	1	1
Pontuação Total	6	5	5	5	5	7	7
<i>Classificação conforme Tabela 4</i>	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

TABELA 12. ANÁLISE DA QUALIDADE DOS DADOS PARA O BIG BAG 100% PET VIRGEM

	Produção da Resina Virgem	Transporte até a Embrasa	Produção do Big Bag	Distribuição	Fim de Vida
Confiança	3	1	2	2	3
Representatividade	2	1	1	2	1
Correlação Temporal	2	1	1	1	1
Correlação Geográfica	2	1	1	1	1
Correlação Técnica	3	1	1	1	1
Pontuação Total	12	5	6	7	7
Classificação conforme Tabela 4	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto

TABELA 13. ANÁLISE DA QUALIDADE DOS DADOS PARA O BIG BAG 100% PET-PCR

	Produção da Resina reciclada	Transporte até a Embrasa	Produção do Big Bag	Distribuição	Fim de Vida
Confiança	3	1	1	2	3
Representatividade	2	1	1	2	1
Correlação Temporal	2	1	1	1	1
Correlação Geográfica	2	1	1	1	1
Correlação Técnica	3	1	1	1	1
Pontuação Total	12	5	5	7	7
Classificação conforme Tabela 4	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto

Anexo D – Descritivo de dados utilizados

As Tabelas a seguir apresentam os dados utilizados no modelo desenvolvido para representar a produção dos big bags de PP e de PET. Foram feitas conexões com a base de dados ecoinvent v3.8, disponível no *software* SimaPro versão 9.4.0.2, conforme descrito na coluna “Dataset selecionado”.

A modelagem dos inventários para cada estágio do processo de produção foi realizada a partir dos dados fornecidos pela Embrasa na Planilha eletrônica de Coleta de Dados (ano base 2021) e obtidos na literatura.

TABELA 14. QUADRO DESCRITIVO DA PRODUÇÃO DO BIG BAG 100% PP VIRGEM. REFERE-SE À 1 UNIDADE DE BIG BAG.

Material/Processo	Unidade	Quant.	Dataset selecionado (ecoinvent v3.8)
Polipropileno (PP) virgem	kg	1,54E+00	Polypropylene, granulate {BR} production Alloc Def, S [Braskem] – ecoinvent v3.1
Antifibrilante ²⁶	kg	1,12E-01	[1%] Zinc oxide {GLO} market for Cut-off, U [9%] Stearic acid {GLO} market for stearic acid Cut-off, U [90%] Calcium carbonate, precipitated {RoW} market for calcium carbonate, precipitated Cut-off, U
Anti-UV	kg	5,12E-02	[100%] Chemical, inorganic {GLO} market for chemical, inorganic Cut-off, U
Masterbatch branco	kg	6,83E-03	[2%] Zinc oxide {GLO} market for Cut-off, U [13%] Stearic acid {GLO} market for stearic acid Cut-off, U [20%] Titanium dioxide {RoW} market for Cut-off, U [65%] Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
Água para resfriamento	L	8,53E-03	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
Eletricidade (extrusão)	kWh	6,70E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (tecagem)	kWh	1,07E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (corte)	kWh	1,50E-02	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (extrusão balão)	kWh	1,10E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (confeção)	kWh	6,10E-02	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Transporte do PP virgem ²⁷	kgkm	9,28E+02	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Transporte do antifibrilante (173 km)	kgkm	1,94E+01	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Transporte do anti-UV (173 km)	kgkm	8,86E+00	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Transporte do masterbatch branco (173 km)	kgkm	1,18E+00	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U

²⁶ Modelagem de acordo com a FISPQ: MBPP NATURAL 2500/0075-IE-FG.

²⁷ 91% do PP virgem (PP – PG35L) é adquirido de um fornecedor com distância de 533 km e 9% do PP virgem (PP – CP 741) é adquirido de um fornecedor com distância de 1296 km.

Distribuição dos big bags (250 km)	kgkm	4,27E+02	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Reciclagem do big bag (fim de vida) – taxa de reciclagem de 23,1%	kg	3,94E-01	PP recycling {BR} Cut-off, U [Embrasa]
Transporte até aterro (fim de vida) – 50 km	kgkm	6,56E+01	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Disposição final do big bag (fim de vida)	kg	1,31E+00	[59,5%] Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill Cut-off, U [23%] Waste plastic, mixture {GLO} treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U [17,5%] Waste plastic, mixture {GLO} treatment of waste plastic, mixture, open dump, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U

TABELA 15. QUADRO DESCRITIVO DA PRODUÇÃO DO BIG BAG 50% PP VIRGEM E 50% PP-PCR. REFERE-SE À 1 UNIDADE DE BIG BAG.

Material/Processo	Unidade	Quant.	Dataset selecionado (ecoinvent v3.8)
Polipropileno (PP) virgem	kg	8,42E-01	Polypropylene, granulate {BR} production Alloc Def, S [Braskem] – ecoinvent v3.1
Polipropileno (PP-PCR) reciclado	kg	7,63E-01	Post-consumer recycled (PCR) - PP {BR} Cut-off, U [Embrasa]
Antioxidante ²⁸	kg	1,71E-02	[50%] Chemical, inorganic {GLO} market for chemical, inorganic Cut-off, U [50%] Chemical, organic {GLO} market for Cut-off, U
Anti-UV	kg	5,12E-02	[100%] Chemical, inorganic {GLO} market for chemical, inorganic Cut-off, U
Masterbatch azul	kg	3,41E-02	[0,5%] Zinc oxide {GLO} market for Cut-off, U [4,5%] Stearic acid {GLO} market for stearic acid Cut-off, U [7%] Titanium dioxide {RoW} market for Cut-off, U [88%] Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
Água para resfriamento	L	8,53E-03	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
Eletricidade (extrusão)	kWh	7,45E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (tecagem)	kWh	1,07E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (corte)	kWh	1,50E-02	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (extrusão balão)	kWh	1,10E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (confeção)	kWh	6,10E-02	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Transporte do PP virgem	kgkm	7,09E+02	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Transporte do PP reciclado (78 km)	kgkm	5,95E+01	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Transporte do antioxidante (173 km)	kgkm	2,95E+00	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U

²⁸ Modelagem de acordo com a FISPQ: MBPP NATURAL 2500/0075-IE-FG.

Transporte do anti-UV (173 km)	kgkm	8,86E+00	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Transporte do masterbatch azul (173 km)	kgkm	5,91E+00	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Distribuição dos big bags (250 km)	kgkm	4,27E+02	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Reciclagem do big bag (fim de vida) – taxa de reciclagem de 23,1%	kg	3,94E-01	PP recycling {BR} Cut-off, U [Embrasa]
Transporte até aterro (fim de vida) – 50 km	kgkm	6,56E+01	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Disposição final do big bag (fim de vida)	kg	1,31E+00	[59,5%] Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill Cut-off, U [23%] Waste plastic, mixture {GLO} treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U [17,5%] Waste plastic, mixture {GLO} treatment of waste plastic, mixture, open dump, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U

TABELA 16. QUADRO DESCRITIVO DA PRODUÇÃO DO BIG BAG 100% PET-PCR. REFERE-SE À 1 UNIDADE DE BIG BAG.

Material/Processo	Unidade	Quant.	Dataset selecionado (ecoinvent v3.8)
PET-PCR	kg	1,71E+00	Post-consumer recycled (PCR) - PET {BR} Cut-off, U [Embrasa]
Água para resfriamento	L	8,53E-03	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
Eletricidade (extrusão)	kWh	1,01E+00	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (tecagem)	kWh	1,07E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (corte)	kWh	1,50E-02	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (extrusão balão)	kWh	1,10E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Eletricidade (confeção)	kWh	6,10E-02	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Transporte do PET reciclado (78 km)	kgkm	1,33E+02	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Distribuição dos big bags (250 km)	kgkm	4,27E+02	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Reciclagem do big bag (fim de vida) – taxa de reciclagem de 23,1%	kg	3,94E-01	PET recycling {BR} Cut-off, U [Embrasa]
Transporte até aterro (fim de vida) – 50 km	kgkm	6,56E+01	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Disposição final do big bag (fim de vida)	kg	1,31E+00	[59,5%] Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill Cut-off, U [23%] Waste plastic, mixture {GLO} treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U [17,5%] Waste plastic, mixture {GLO} treatment of waste plastic, mixture, open dump, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U

TABELA 17. QUADRO DESCRITIVO DA PRODUÇÃO DO BIG BAG 100% PET VIRGEM. REFERE-SE À 1 UNIDADE DE BIG BAG.

Material/Processo	Unidade	Quant.	Dataset selecionado (ecoinvent v3.8)
PET virgem	kg	1,71E+00	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RoW} production Cut-off, U
Água para resfriamento	L	8,53E-03	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
Elettricidade (extrusão)	kWh	1,01E+00	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Elettricidade (tecagem)	kWh	1,07E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Elettricidade (corte)	kWh	1,50E-02	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Elettricidade (extrusão balão)	kWh	1,10E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Elettricidade (confeção)	kWh	6,10E-02	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Transporte do PET virgem (2664 km)	kgkm	4,55E+03	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Distribuição dos big bags (250 km)	kgkm	4,27E+02	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Reciclagem do big bag (fim de vida) – taxa de reciclagem de 23,1%	kg	3,94E-01	PET recycling {BR} Cut-off, U [Embrasa]
Transporte até aterro (fim de vida) – 50 km	kgkm	6,56E+01	Transport, freight, lorry, unspecified {BR} transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U
Disposição final do big bag (fim de vida)	kg	1,31E+00	[59,5%] Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill Cut-off, U [23%] Waste plastic, mixture {GLO} treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U [17,5%] Waste plastic, mixture {GLO} treatment of waste plastic, mixture, open dump, wet infiltration class (500mm) Cut-off, U

TABELA 18. QUADRO DESCRITIVO DA PRODUÇÃO DA RESINA RECICLADA DE PP-PCR. REFERE-SE À 1 KG DE RESINA.

Material/Processo	Unidade	Quant.	Dataset selecionado (ecoinvent v3.8)
Big bags pós-consumo	kg	1,40E+00	Sem encargo ambiental associado.
Coleta dos big bags pós-consumo	kgkm	7,00E+02	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {BR} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cut-off, U
Água	L	8,00E+00	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
Elettricidade	kWh	1,40E-01	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Transporte dos rejeitos para o aterro (50 km)	kgkm	7,50E+00	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {BR} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cut-off, U
Disposição final de rejeitos em aterro	kg	1,50E-01	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill Cut-off, U
Tratamento de efluentes	L	8,00E+00	Wastewater, average {RoW} market for wastewater, average Cut-off, U

TABELA 19. QUADRO DESCRITIVO DA PRODUÇÃO DA RESINA RECICLADA DE PET-PCR - DADOS BASEADOS EM [GILENO, 2020].
REFERE-SE À 1 KG DE RESINA.

Material/Processo	Unidade	Quant.	Dataset selecionado (ecoinvent v3.8)
Resíduos de PET pós-consumo	kg	1,36E+00	Sem encargo ambiental associado.
Coleta dos resíduos pós-consumo	kgkm	6,81E+02	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {BR} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cut-off, U
Água	L	8,54	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
Gás natural	m³	0,09	Natural gas, high pressure {BR} market for natural gas, high pressure Cut-off, U
Hidróxido de sódio (lavagem)	kg	0,03	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, U
Elettricidade	kWh	0,76	Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U
Transporte dos rejeitos para o aterro (50 km)	kgkm	8,84E+00	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {BR} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cut-off, U
Disposição final de rejeitos plásticos em aterro	kg	1,66E-01	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill Cut-off, U
Disposição final de rejeitos papel em aterro	kg	3,65E-03	Waste paperboard {RoW} treatment of, sanitary landfill Cut-off, U
Disposição final de rejeitos diversos em aterro	kg	7,61E-03	Inert waste {RoW} treatment of, sanitary landfill Cut-off, U
Tratamento de Efluentes			
DBO	kg	2,23E-02	Emissão para água.
Sólidos suspensos	kg	5,07E-04	Emissão para água.
Efluente tratado	L	7,68E+00	Devolução para água.
Emissões atmosféricas			
CO ₂ fóssil	kg	1,97E-01	Emissão da caldeira a gás natural.
CH ₄ fóssil	kg	3,55E-06	Emissão da caldeira a gás natural.
N ₂ O	kg	3,04E-07	Emissão da caldeira a gás natural.
NO _x	kg	2,13E-04	Emissão da caldeira a gás natural.
SO ₂	kg	9,13E-07	Emissão da caldeira a gás natural.
MP ₁₀	kg	2,09E-05	Emissão da caldeira a gás natural.
COV	kg	8,41E-05	Emissão da caldeira a gás natural.

Anexo E – Resultados Fator A = 1

A Tabela 20 apresenta os resultados do perfil ambiental de cada uma das alternativas de big bags avaliadas neste estudo, considerando o fator de alocação A igual a 1. De acordo com esta abordagem, os resultados das resinas recicladas não consideram a produção da resina virgem (1º ciclo) e, portanto, são menores em comparação com os resultados apresentados no cenário base deste estudo.

TABELA 20. PERFIL AMBIENTAL DE UMA UNIDADE DE BIG BAG COM CAPACIDADE DE 1000KG (FATOR A = 1)

	Big bag 100% PP virgem	Big bag 50% PP-PCR	Big bag 100% PET-PCR	Big bag 100% PET virgem
Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	3,38E+00	2,28E+00	5,77E+00	1,35E+00
Depleção da Camada de O ₃ (kg CFC-11 eq.)	3,61E-06	3,19E-06	2,04E-05	3,24E-06
Inorgânicos Inaláveis (kg PM 2,5 eq.)	1,33E-03	9,89E-04	3,25E-03	8,42E-04
Oxidação Fotoquímica (kg NMVOC eq.)	9,24E-03	5,75E-03	1,19E-02	2,21E-03
Acidificação (kg SO ₂ eq.)	1,09E-02	7,07E-03	1,81E-02	2,86E-03
Uso da Água (m ³)	2,81E-02	1,81E-02	6,06E-02	5,56E-03
Ocupação do Solo (m ² .a)	1,27E-01	1,03E-01	1,39E-01	1,20E-01
Recursos Minerais (kg Sb eq.)	2,81E-06	3,00E-06	5,21E-06	4,80E-07
Eutrofização (kg PO ₄ --- eq.)	1,34E-03	1,07E-03	2,04E-03	5,77E-04
Combustíveis Fósseis (MJ)	9,02E+01	5,30E+01	1,19E+02	1,55E+01
Toxicidade Humana - Não Câncer (CTUh)	1,32E-07	1,33E-07	3,43E-07	1,13E-07
Toxicidade Humana - Câncer (CTUh)	1,43E-08	1,43E-08	5,82E-08	2,11E-09
Ecotoxicidade (CTUe)	1,50E+00	1,44E+00	3,96E+00	8,99E-01