

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

BEATRIZ ARIOLI DE SÁ TELES

**ESTUDO DOS DESEMPENHOS AMBIENTAL, TÉCNICO E DE
CIRCULARIDADE DECORRENTES DA PRÁTICA DE RECICLAGEM DE PET
EM CICLO ABERTO POR MEIO DE MANUFATURA ADITIVA**

São Paulo
2023

BEATRIZ ARIOLI DE SÁ TELES

**ESTUDO DOS DESEMPENHOS AMBIENTAL, TÉCNICO E DE
CIRCULARIDADE DECORRENTES DA PRÁTICA DE RECICLAGEM DE PET EM
CICLO ABERTO POR MEIO DE MANUFATURA ADITIVA**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alexandre Kulay
Coorientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini

São Paulo

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 27 de Fevereiro de 2023

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Teles, Beatriz Arioli de Sá

ESTUDO DOS DESEMPENHOS AMBIENTAL, TÉCNICO E DE CIRCULARIDADE DECORRENTES DA PRÁTICA DE RECICLAGEM DE PET EM CICLO ABERTO POR MEIO DE MANUFATURA ADITIVA / B. A. S. Teles
-- São Paulo, 2023.

223 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Avaliação do Ciclo de Vida 2.Economia Circular 3.Poli (tereftalato de etileno) 4.Impressão 3D 5.Plástico pós consumo I.Universidade de São Paulo. EscolaPolitécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

Nome: TELES, Beatriz Arioli de Sá

Título: Estudo dos desempenhos Ambiental, Técnico e de Circularidade decorrentes da Prática de Reciclagem de PET em Ciclo Aberto por meio de Manufatura Aditiva

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovada em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais por todo apoio e incentivo, a minha irmã para que se inspire na busca por conhecimento e a minha avó (*in memoriam*) que está sempre em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais (Renato e Vanessa) por todo apoio e dedicação para com a minha educação desde cedo, sempre me incentivando e estando presentes. Agradeço também minha irmã (Alice) que veio para ressignificar a minha vida e trazer muitas alegrias. Obrigada família por cada momento especial que compartilhamos juntos de união e amor.

Agradeço meu namorado (Frankson) por seu carinho, apoio e companheirismo em toda essa jornada. Obrigada por me proporcionar a ver a vida por outra perspectiva, sempre acreditar em mim e me incentivar na busca por tornar o mundo um lugar melhor. Sou muito grata por toda força, principalmente nos momentos mais difíceis.

Agradeço toda a minha família por toda forma de apoio e por torcerem sempre por mim. Deixo um agradecimento especial a minha tia (Fabiana) por ser uma grande fonte de inspiração desde pequena para mim e por todo o suporte fornecido para que alcançasse meus propósitos.

Agradeço ao Prof^o Luiz Kulay por cada conversa, ensinamento e toda orientação nos últimos anos. Obrigada pela paciência e disposição em sempre me tirar dúvidas, por ter acreditado em mim e me incentivado ao longo de toda essa jornada. Agradeço por ser essa pessoa de grande coração que nos enxerga de maneira única e nos trata de forma personalizada, a fim de atender a particularidade da personalidade de cada um (a mim e a todos do laboratório). Sou eternamente grata por tudo que proporcionou como forma de meu desenvolvimento pessoal e profissional, e também por ter ampliado a minha visão nesse mundo da sustentabilidade de forma mais sistêmica. Um professor e tutor nato, e amigo para a vida toda.

Agradeço ao Prof^o Sandro Mancini por ter sido fundamental em conectar todas as peças desse estudo, sendo meu coorientador, obrigada por todo direcionamento, disposição em me ajudar e passar conhecimento.

A todos os funcionários das empresas Global PET e Sintronics por toda paciência com minhas várias consultas e disposição em me auxiliar com tudo que era solicitado. Um agradecimento muito especial para o Irineu e a Cristina por terem sido extremamente solícitos e terem contribuído imensamente com este estudo.

Agradeço demais todos os colegas e amigos que tive o privilégio de fazer durante o mestrado por todas as conversas, risadas, toda a parceria e alento nos momentos de dificuldade. Obrigada por toda ajuda e contribuição na construção de conhecimento de forma colaborativa. Esse agradecimento também se estende aos amigos de mais longa data.

Gostaria de agradecer todas as pessoas que cruzaram meu caminho nestes últimos anos e contribuíram de forma direta ou indireta para minha formação como pessoa e profissional. Agradeço também a agência CNPq e a sociedade brasileira pelo financiamento deste estudo. E finalmente, agradeço a oportunidade de estudar na Universidade de São Paulo, por ter me proporcionado momentos incríveis nestes últimos anos de aprendizagem, muito além do mestrado e despertado ainda mais motivação por contribuir com avanços na educação e ciência brasileira.

RESUMO

TELES, B. A. S. **Estudo dos Desempenhos Ambiental, Técnico e de Circularidade decorrentes da prática de Reciclagem de PET em ciclo aberto por meio de Manufatura Aditiva** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

Nas últimas décadas, a problemática decorrente da gestão ineficaz de resíduos plásticos tem se tornado cada vez mais notória devido aos inúmeros efeitos adversos observados tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana. Essa questão se faz ainda mais expressiva por práticas de uso único e rápido descarte desses materiais, em particular para um dos plásticos mais empregados em aplicações, o poli (tereftalato de etileno) (PET). Assim, avaliar alternativas para integração da logística reversa e produção partir de materiais reciclados é oportuno, de forma a contribuir com a transição para a economia circular. Este estudo explorou processos para a produção, via Manufatura Aditiva, de um produto - suporte para celular, feito de resina reciclada de PET a partir de garrafas de bebidas pós consumo. Nesse sentido, propriedades mecânicas, térmicas e de viscosidade dos materiais, bem como aspectos ambientais e de circularidade foram avaliados como forma de explorar o potencial da valorização de resíduos em aplicações de valor agregado. As amostras das diferentes etapas de processamento foram caracterizadas por Calorimetria Exploratória Diferencial, Análise Termogravimétrica, Viscosidade Intrínseca e Teste de Mecânico de Tração. O desempenho ambiental foi medido pela Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Como a cadeia produtiva inclui a etapa de reciclagem, a ACV foi aplicada de acordo com a lógica de reciclagem em ciclo aberto (OLR: open loop recycling) por meio de seis perspectivas distintas, levando em conta as abordagens Atribucional e Consequencial. As categorias de impacto consideradas foram: Potencial de Aquecimento Global, Demanda de Energia Primária, Consumo de Água, Formação de Material Particulado Fino, Ecotoxicidade da Água Doce e Acidificação Terrestre. O desempenho de circularidade do produto gerado foi avaliado a partir do Indicador de Circularidade de Materiais (MCI). Os resultados obtidos revelaram boas propriedades mecânicas com 37,7 Mpa de resistência à tração e 7,64% de deformação até a ruptura, a viscosidade avaliada apresentou apenas 33% de redução em relação aos processamentos que o material foi submetido até a produção final do produto via MA. As análises térmicas indicaram boa estabilidade às temperaturas empregadas durante todas as etapas de processamento. De modo assim, a subsidiar a análise ambiental e demonstrar desempenho adequado para produção de produtos a partir do filamento obtido de PET reciclado pós-consumo. A avaliação em termos ambientais apresentou impactos menores em todas as categorias avaliadas do que aqueles obtidos com resina virgem de PET. Foram feitas propostas de melhoria para mitigar os impactos ambientais decorrentes da energia elétrica, um importante *hotspot* desta rota avaliada. Os resultados desta análise reportaram melhorias cumulativas da ordem de 30 a 57%, no comparativo com a lógica que não considera reciclagem. A avaliação da circularidade demonstrou potencial para este arranjo considerado, com inclusive ganhos de até 70 % caso o produto obtido por material reciclado fosse destinado em seu fim de vida a reciclagem novamente. Este estudo corrobora a importância de atrelar de forma complementar várias frentes de análise em busca de soluções circulares e sustentáveis e que sejam adequadas do ponto de vista técnico.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Economia circular; Impressão 3D; Poli (tereftalato de etileno); Plástico pós consumo

ABSTRACT

TELES, B. A. S. **Environmental, Technical and Circularity Performances resulting from the practice of PET in an Open Loop Recycling through Additive Manufacturing** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

In recent decades, the ineffective management of plastic waste has become increasingly notorious due to the numerous adverse effects observed for both the environment and human health. This issue is made even more expressive by practices of single use and rapid disposal of these materials, in particular for one of the most used plastics in applications, poly(ethylene terephthalate) (PET). Thus, evaluating alternatives for integrating reverse logistics and production from recycled materials is opportune, to contribute to the transition to a circular economy. This study explored processes for the production, via Additive Manufacturing (AM), of a product - cell phone holder, made of recycled PET resin from post-consumer beverage bottles. In this sense, mechanical, thermal and viscosity properties of the materials, as well as environmental and circularity aspects were evaluated to explore the potential of waste recovery in value-added applications. Samples from different processing stages were characterized by Differential Scanning Calorimetry, Thermogravimetric Analysis, Intrinsic Viscosity and Mechanical Tensile Test. Environmental performance was measured by Life Cycle Assessment (LCA). As the production chain includes the recycling stage, the LCA was applied according to the logic of open loop recycling (OLR) through six different perspectives, considering the Attributional and Consequential approaches. The impact categories considered were: Global Warming Potential, Primary Energy Demand, Water Consumption, Formation of Fine Particulate Matter, Freshwater Ecotoxicity and Terrestrial Acidification. The circularity performance of the generated product was evaluated using the Material Circularity Indicator (MCI). The results obtained revealed good mechanical properties with 37.7 Mpa of tensile strength and 7.64% of deformation until rupture, the evaluated viscosity presented only 33% of reduction in relation to the processes that the material was submitted until the final production of the product via MA. Thermal analyzes indicated good stability at the temperatures employed during all processing steps. Therefore, subsidize the environmental analysis and demonstrate adequate performance for the production of products from the filament obtained from post-consumer recycled PET. The evaluation in environmental terms showed smaller impacts in all evaluated categories than those obtained with virgin PET resin. Improvement proposals were made to mitigate the environmental impacts resulting from electricity, an important hotspot of this evaluated route. The results of this analysis reported cumulative improvements of around 30 to 57%, in comparison with the logic that does not consider recycling. The circularity evaluation showed potential for this considered arrangement, including gains of up to 70% if the product obtained from recycled material was destined for recycling again at the end of its life. This study corroborates the importance of linking several fronts of analysis in a complementary way in search of circular and sustainable solutions that are adequate from a technical point of view.

Keywords: Life Cycle Assessment; Circular Economy; 3D Printing; Polyethylene terephthalate; Post consumer plastic

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura química de repetição do PET	23
Figura 2. Princípio básico de funcionamento da impressão no tipo FDM ou FFF	27
Figura 3 – Estágios do ciclo de vida de um produto ou serviço	29
Figura 4. Estrutura da ACV e aplicações diretas da metodologia	30
Figura 5. Exemplos de situações envolvendo multifuncionalidade a) Múltiplas saídas; b) Múltiplas entradas;	35
c) Reciclagem em ciclo aberto (OLR).	35
Figura 7. Representação esquemática do sistema de produto considerado neste estudo	59
Figura 8. Fronteira envolvida na empresa recicladora de PET	64
Figura 9. A) Separação através de detector de infravermelho (NIR) B) Linha de separação manual C) Material separado sendo encaminhado para moedor D) <i>Flakes</i> de garrafas pós moagem	65
Figura 10. <i>Pellets</i> obtidos da etapa de extrusão	68
Figura 11. Reatores de pós-condensação no estado sólido (SSP).....	69
Figura 12. Fronteira do sistema da empresa transformadora da resina PET em um novo bem de consumo.....	71
Figura 13. A) Conjunto de equipamentos utilizados na produção dos filamentos: extrusora, sistema de resfriamento e bobinador ; B) Saída do filamento de PET reciclado do bico da extrusora	73
Figura 14. A) Resina PET PCR; B) Carretel de filamentos produzidos C) Filamento utilizado na impressora 3D	74
Figura 15. suporte para celular produzido através da Manufatura Aditiva.....	74
Figura 16. Filamento de PET reciclado sendo utilizado na impressora 3D.....	75
Figura 17 - Peça utilizada para impressão e ensaios de teste de tração mecânica	75
Figura 19. A) Curvas de calorimetria de varredura diferencial B) Curvas da análise termogravimétrica.....	94
Figura 20. Corpos de provas produzidos na impressora 3D	97
Figura 21. Visão lateral e frontal da fratura do corpo de prova após ensaio de tração.....	98
Figura 22. A) suporte de celular produzido - Vista lateral; B) Vista frontal ilustrando a capacidade de personalização do produto.....	99
Figura 23. Desempenho ambiental da categoria de impacto GWP entre sistemas	105
Figura 24. Desempenho ambiental da categoria de impacto GWP uptake entre sistemas	106

Figura 25. Desempenho ambiental da categoria de impacto PED entre sistemas	107
Figura 26. Desempenho ambiental da categoria de impacto WS entre sistemas.....	108
Figura 27. Desempenho ambiental da categoria de impacto PMF entre sistemas.....	109
Figura 28. Desempenho ambiental da categoria de impacto FWET entre sistemas.....	110
Figura 29. Desempenho ambiental da categoria de impacto TAc entre sistemas.....	111
Figura 30. Resultados da Análise de Sensibilidade ACVA entre os métodos A) Extração de recursos como consequência de não reciclagem; B) Rejeito como consequência da extração de recursos; C) Perda de qualidade. Os resultados apresentados na parte superior remetem ao composto etileno, enquanto a inferior para o xileno.....	116
Figura 31. Desempenho ambiental da categoria de impacto GWP entre sistemas.....	119
Figura 32. Desempenho ambiental da categoria de impacto GWP entre sistemas	120
Figura 33. Desempenho ambiental da categoria de impacto PED entre sistemas	121
Figura 34. Desempenho ambiental da categoria de impacto WS entre sistemas.....	122
Figura 35. Desempenho ambiental da categoria de impacto PMF entre sistemas.....	123
Figura 36. Desempenho ambiental da categoria de impacto FWET entre sistemas.....	123
Figura 37. Desempenho ambiental da categoria de impacto TAc entre sistemas.....	124
Figura 38. Resultados da Análise de Sensibilidade sobre a variação de partição de cargas entre sistemas em relação a composição do Indicador único Global	127
Figura 39. Desempenho ambiental da proposição de cenários de melhorias na perspectiva OLR <i>Cut-Off</i>	129
Figura 40. Desempenho ambiental da proposição de cenários de melhorias na perspectiva OLR 50/50	130
Figura 41. Relação entre e os cenários avaliados e o MCI.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais parâmetros de impressão dos corpos de prova.....	76
Tabela 2. Matriz elétrica brasileira com contribuições discriminadas por fonte de geração	79
Tabela 3. Métodos para tratamento de situações multifuncionais para processos em OLR.....	81
Tabela 4. Parâmetros a serem utilizados no cálculo do MCI.....	92
Tabela 5. Equações e comentários relacionados ao cálculo do MCI.....	93
Tabela 6. Propriedades térmicas do material analisado nas diferentes condições de processamento	94
Tabela 7. Propriedades térmicas do PET reciclado analisado na literatura	95
Tabela 8. Propriedades térmicas do material analisado em diferentes processamentos	95
Tabela 9. Resultados de Viscosidade Intrínseca e Massa Molar de rPET.....	96
Tabela 10. Propriedades mecânicas dos ensaios realizados com o PET reciclado impresso.	98
Tabela 11. Propriedades mecânicas de PET e ABS reciclado na literatura em diferentes processamentos.....	98
Tabela 12. Desempenho ambiental para a produção de uma unidade de suporte de celular por meio da abordagem ACVA	101
Tabela 13. Fator de alocação para modelagem via método Perda de Qualidade.....	102
Tabela 14. Descrição de valores intermediários (<i>IANik</i>) e finais dos Indicadores Únicos de (<i>IUi</i>) desempenho ambiental da produção de uma unidade de suporte de celular segundo as lógicas OLR e seus congêneres sem reciclagem	112
Tabela 15. Desempenho ambiental para a produção de uma unidade de suporte de celular por meio da abordagem ACVC.....	117
Tabela 16. Descrição de valores intermediários (<i>IANik</i>) e finais dos Indicadores Únicos de (<i>IUi</i>) desempenho ambiental da produção de uma unidade de suporte de celular segundo as lógicas OLR e seus congêneres sem reciclagem	125
Tabela 17. Valores obtidos para o MCI do estudo em análise.....	131
Tabela 18. Proposição de cenários para estudo de circularidade através do indicador MCI	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV: Avaliação de Ciclo de Vida
ACVA: Avaliação de Ciclo de Vida Atribucional
ACVS: Avaliação do Ciclo de Vida Social
AICV: Avaliação de Impactos Ambientais do Ciclo de Vida
BEN: Balanço energético nacional
COVID-19: *Corona Virus Disease* (Doença Coronavírus)
CTA: *Consumption to availability ratio*
DSC: Calorimetria Exploratória Diferencial
EC: Economia Circular
FDM: Fabricação por Deposição Fundida
FFF: Fabricação por Filamento Fundido
FR: Fluxo de Referência
GEE: Gases de Efeito Estufa
ICV: Inventário de ciclo de vida
IPCC: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas ()
ISO: International Organization for Standardization
IU: Indicador único
LCC: *Life Cycle Costing*
MA: Manufatura Aditiva
MCI: Indicador de Circularidade de Materiais
NRB: *Non-renewable, biomass*
NRF: *Non-renewable, fossil fuel*
NRN: Non-renewable, nuclear
OLR: *Open Loop Recycling*
ONU: Organizações das Nações Unidas
PED: *Primary Energy Demand*
PET: Poli (tereftalato de etileno)
Planares: Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PMF: *Particular Material Formation*
PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos
RB: *Renewable, biomass*
ROW: Rest of the World
RSU: Resíduos Sólidos Urbanos
RSWG: *Renewable, solar/wind/geothermal*
RW: *Renewable, water*
TAc: Terrestrial Acidification
Tg: Transição vítrea
TGA: Análises Termogravimétricas
WS: *Water Scarcity*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 RESÍDUOS PLÁSTICOS.....	5
3.1.1 CONTEXTO E PROBLEMÁTICA.....	5
3.1.2 RECICLAGEM E REVALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS.....	6
3.1.3 POLÍMERO PET	8
3.1.4 MANUFATURA ADITIVA E FILAMENTOS POLIMÉRICOS RECICLADOS....	10
3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	14
3.2.1 APLICAÇÕES E LIMITAÇÕES	15
3.2.2 METODOLOGIA DA ACV	16
3.2.3 SITUAÇÕES DE MULTIFUNCIONALIDADE E SUA RELAÇÃO COM OS ENFOQUES DE ACV	20
3.2.4 RECICLAGEM EM CICLO ABERTO (OLR) EM ACV	26
3.2.4.1 ESTUDOS DE ACV NA PERSPECTIVA OLR	33
3.2.4.2 CONSIDERAÇÃO SOBRE <i>DOWNCYCLING</i> PARA OLR EM ACV	36
3.3 ESTUDOS DE ACV PARA O PET	36
3.4 ESTUDOS ACV DE FILAMENTOS RECICLADOS E MANUFATURA ADITIVA	38
3.5 ECONOMIA CIRCULAR DE PLÁSTICOS E ACV	39
3.5.1 INDICADOR DE CIRCULARIDADE DE MATERIAIS E ACV	41
4. MATERIAL E MÉTODOS	44
4.1 ESPECIFICAÇÃO DOS PROCESSOS EM ANÁLISE NA PERSPECTIVA OLR ...	44
4.2 MODELAGEM AMBIENTAL	63
4.4 CONSIDERAÇÕES PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉCNICO.....	88
4.5 INDICADOR DE CIRCULARIDADE DOS MATERIAIS.....	91
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	94
5.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉCNICO.....	94
5.2 DESEMPENHO AMBIENTAL	100

5.2.1 ABORDAGENS ATRIBUCIONAIS	100
5.2.1.1 POR CATEGORIA DE IMPACTO.....	100
5.2.1.2 COMPARAÇÃO VIA INDICADOR ÚNICO	111
5.2.1.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ACVA	113
5.2.2 ABORDAGENS CONSEQUENCIAIS.....	117
5.2.2.1 POR CATEGORIA DE IMPACTO	117
5.2.2.2 COMPARAÇÃO VIA INDICADOR ÚNICO	124
5.2.2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ACVC	126
5.2.3 PROPOSIÇÕES DE MELHORIAS.....	128
5.3 MCI APLICADO AO ESTUDO	130
6. CONCLUSÕES.....	135
7. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	137
8. REFERÊNCIAS	138
APÊNDICES	148
Apêndice A	148
Apêndice B.....	149
ANEXOS	152
Anexo A.1	152
Anexo A.2.....	187

1. INTRODUÇÃO

A demanda por recursos naturais e a geração de resíduos motivadas pelo aumento do consumo, frente ao crescimento populacional e a evolução da humanidade, tem levado a degradação do planeta e o comprometimento da qualidade de vida das gerações presentes e futuras de todas as espécies que o habitam. Atualmente, a humanidade utiliza 74% mais de recursos do que a natureza consegue recuperar, o que quer dizer que seria necessário 1,7 planeta Terra para manter o atual estilo de vida (GFN, 2022). Tudo isto escancara o resultado, notadamente, de um modelo insustentável, na medida que gera consequências extremas. Tendo em vista a situação atual, é evidente o grande desafio a ser enfrentado, inclusive na dimensão de gestão de resíduos sólidos e, especialmente para os plásticos e o retorno destes para as cadeias de geração de valor em novos ciclos, em vista que são materiais extensivamente utilizados e críticos em termos de impactos ambientais. Assim sendo, revela-se a necessidade de fortalecer ações globais frente a atividades que norteiem a transição para novos modelos de produção e consumo, pautadas na capacidade regenerativa e restaurativa (CEBRI, 2020).

No Brasil, a pandemia da COVID 19 evidenciou ainda mais as dinâmicas problemáticas do manejo de resíduos sólidos plásticos nas cidades. Além de registrar um aumento nas quantidades geradas e coletadas, por conta da transferência dos centros de geração de resíduos para os domicílios, também ganharam mais visibilidade junto à população, principalmente pelo seu caráter de continuidade em momentos de *lockdown*. Os plásticos, nesse contexto, foram essenciais no enfrentamento da pandemia, visto que puderam promover soluções rápidas e de baixo custo para hospitais e indivíduos no geral, na forma de proteção de alimentos, desinfecção e higiene básica e na vacinação. (ABIPLAST, 2020).

Muito embora sejam e ainda são materiais essenciais para a evolução da sociedade como um todo em diversos contextos, os plásticos são agentes de grande poluição por conta da sua acumulação e permanência. Dessa forma, causam como decorrência inúmeros danos a todos os ambientes sejam eles: terrestres, com lançamentos globais de resíduos plásticos de 13 a 25 milhões de toneladas ano; ou coleções hídricas, com lançamentos globais para rios, lagos e oceanos na faixa de 9 a 23 milhões de toneladas ano (MACLEOD et al., 2021). Seguindo cenários de modelos ditos como de costume, ou *business-as-usual*, essas taxas de lançamento estimadas em 2016 irão dobrar até 2025 (MACLEOD et al., 2021). Além disso, decorre da característica deste material os problemas relativos à fragmentação em escala micro e nanométricas, que nem de longe tiveram os danos para todos os ecossistemas totalmente mensurados, salientando a complexidade da recuperação e reversibilidade destes materiais, em especial quando escapam das cadeias de gerenciamento de resíduos. Assim sendo, mudanças significativas nos padrões de consumo devem ser buscadas para reduzir drasticamente o uso desse material em situações que seu uso possa ser evitado. Enquanto não houver avanços neste

sentido, a gestão de resíduos plásticos eficiente, tem um papel protagonista no cenário da mitigação de malefícios ao meio ambiente, na promoção de benefícios para saúde pública e economia (ABRELPE, 2021).

A reciclagem, nesse âmbito, é um importante ponto de pesquisa para solução da questão da gestão dos resíduos plásticos, uma vez que serve tanto como tratamento para os resíduos gerados (evitando sua disposição final), quanto como fornecedor de matérias-primas (evitando a extração de recursos virgens). O poli (tereftalato de etileno) - PET mostra-se, na conjuntura brasileira, como um dos mais polímeros mais relevantes em aplicações, ocupando a sexta posição de resinas mais consumidas (ABIPLAST, 2020). Contudo, o PET, como a maioria dos outros polímeros mais consumidos no mercado brasileiro, cumpre papel em produtos de uso único e rápido descarte. Esse polímero em especial, apresenta bom desempenho em relação a reciclagem com 311 mil toneladas ano, mas possui, todavia, um escape de material dessa prática de aproximadamente 254 mil toneladas ano (ABIPET 2019), sendo dispostas em aterros, lixões ou qualquer outro ambiente. Número este bastante elevado e que pode em muito ser melhorado, na medida que reitera o erro de design dos modelos atuais e a necessidade de otimização desses processos. Logo, boa parte desses resíduos poderiam servir ainda como recursos para novas aplicações, gerando receita. Sendo assim, é fundamental promover ações que elevem as taxas de reciclagem e produzam produtos de fonte reciclada.

Nessa lógica, associar as práticas de reciclagem com novas tecnologias que tem se popularizado na última década dentro dos novos modelos de produção, como a Manufatura Aditiva (MA), ou mais conhecida impressão 3D, como orientador no processo de design e manufatura, pode ser uma estratégia que contribua para alcançar o desenvolvimento sustentável. Essas tecnologias tendem a expandir seu crescimento durante a próxima década, com projeções de quase triplicar seu mercado até 2026 em relação ao ano de 2020 (SRD, 2021) e demonstram ser conveniente em soluções com menores impactos ambientais. Desse modo, esse propósito poderia ser vislumbrado através da reciclagem do PET, com a produção de filamentos reciclados para servirem de matéria-prima para a MA. Como forma de ampliação da reinserção desse material na cadeia de reciclagem, como mais uma alternativa de valor agregado, além dos mercados mais comuns da reciclagem do PET de fibras e garrafas.

A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser utilizada para quantificar os impactos ambientais referentes a estes sistemas que ainda não foram avaliados na íntegra no cenário brasileiro. A ACV é uma ferramenta consolidada e consistente, na medida que analisa aspectos e impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, ou processo. Análises desta natureza buscam avaliar desde a aquisição de matérias primas, produção, uso, tratamento pós-uso e reciclagem até a disposição final, nomeada de forma genérica como estudos de berço-ao-túmulo (ABNT, 2009). Quando a ACV é empregada

para analisar processos envolvendo reciclagem, um aspecto relevante em termos metodológicos é o tratamento de situações de multifuncionalidade. Em sistemas interligados por processos de reciclagem em casos de ciclo aberto, no qual um produto é reciclado para uma aplicação, ou função, distinta do que o primeiro produto havia sido, estes são considerados multifuncionais. Em contraposição, em casos de reciclagem em ciclo fechado, tal ação não é necessária. Estudos que compreendam esse tópico são pertinentes, sobretudo dentro da dimensão de práticas circulares que visam interligar diversos sistemas com aplicações distintas.

Na medida que modelos de produção pautados na economia circular vem ganhando espaço nas empresas, meios acadêmicos e sociedade, surge uma preocupação de como mensurar a circularidade (SAIDANI et al., 2017). Diversas métricas foram desenvolvidas para medir a circularidade de produtos e processos na última década (ROSSI, 2022). Dentre as métricas reportadas, o Indicador de Circularidade de Materiais (MCI) se destaca devido a completude ao considerar parâmetros importantes como a utilização de materiais de fonte de reciclagem ou reuso, gerenciamento de resíduos ao fim de vida do produto e a extensão de vida do produto (EMF, 2015a; MARTINS, 2021).

A qualidade, ou mudança nas propriedades inerentes, é uma questão chave na busca por melhores desempenhos ambientais e mais circularidade, em vista de produtos que sofrem alta degradação são tratados como rejeitos. Por outro lado, aqueles que apresentam propriedades aprimoradas, ou pelo menos as preservam, são tratados como recursos notórios a serem recuperados (TANGUAY et al.,2022). Nesse sentido, a mensuração desse aspecto é fundamental na ponderação da aplicação em ciclos de vida subsequentes, em particular para materiais plásticos reciclados.

De um modo geral, relativamente pouco esforço foi feito para avaliar quantitativamente a conexão entre eficiência material, desempenho ambiental e de circularidade de filamentos reciclados como matéria-prima para MA e ainda, na geração de novos produtos por essa tecnologia. Em vista deste contexto, converte-se em uma possibilidade oportuna a realização de um estudo acadêmico que atue nessas frentes, para dimensionar uma perspectiva de reciclagem em ciclo aberto para o polímero PET. Assim, espera-se que essa sinergia possa fornecer mais embasamento conceitual e, de forma acessível no processo de tomada de decisão por organizações e para novos estudos na área.

2. OBJETIVOS

Tendo em vista o contexto descrito na seção anterior deste documento, o presente projeto de pesquisa tem por objetivo geral avaliar sob a perspectiva de desempenho ambiental, técnico e de circularidade, a prática de reciclagem em ciclo aberto de resíduos pós-consumo de PET, levando em conta a tecnologia de Manufatura Aditiva nesta produção secundária.

Como propósitos complementares, mas nem por isso menos importantes, este estudo se propõe a atender também aos seguintes objetivos específicos:

- Analisar o efeito de decisões sobre seis diferentes práticas de tratamento de situações multifuncionais relacionadas a reciclagem de ciclo aberto, relativas ao desempenho ambiental do processo;
- Analisar as propriedades do produto produzido por meio de caracterizações térmica, mecânica e de viscosidade intrínseca em referência ao desempenho técnico;
- Identificar de focos de geração de impacto ambiental e proposição de melhorias a partir destes, visando a mitigação de danos;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS PLÁSTICOS

3.1.1 CONTEXTO E PROBLEMÁTICA

Ao longo dos anos, os plásticos, tornaram-se essenciais à sociedade moderna, compondo boa parte dos produtos que nos rodeiam. Essa versatilidade se deve à flexibilidade das propriedades apresentadas por esses materiais, que contribui de forma significativa para seu contínuo processo de inovações. Por decorrência de um maior avanço científico e tecnológico e de um crescimento populacional, que necessitava de um material que atendesse a progressiva demanda e fosse mais competitivo do que outros materiais, sua produção global em larga escala foi promovida consideravelmente nas últimas décadas, atingindo em 2021 uma produção global de 352,4 milhões de toneladas, de fonte fóssil, com previsões de duplicar até 2040 (PLASTICS EUROPE, 2022).

A expansão do uso, proporcionando enormes quantidades de resíduos geradas, concomitante ao tratamento inadequado dos plásticos nos processos de produção e no pós-consumo, e ainda, em virtude da elevada durabilidade destes materiais após descarte, os convertem em agentes de grande impacto ambiental e social. Logo, por conta da falta de prudência humana, acabam sendo passíveis de serem acumulados por um longo período na natureza, causando efeitos adversos diretos (p.e. poluição em nível local, danos a ecossistemas marinhos e bioacumulação na cadeia alimentar, causando danos na saúde humana), e indiretos (p.e enchentes, e cultivo de vetores de doenças).

Os plásticos em suas escalas micro (menor que 1 mm e maior que 0,1 μ m) e nano (menor que 0.1 μ m) originários de plásticos em escalas maiores, são componentes invasores que podem ser encontrados em diversos locais como ambientes aquáticos, terrestres e inclusive no sangue (LESLIE et al., 2022) e até na placenta humana (RAGUSA et al., 2021). Kumar et al., (2021) revisam os impactos da poluição plástica nos serviços ecossistêmicos, sobre os quais os autores destacam que micro e nano plásticos afetam diretamente a funcionalidade de diversos ambientes, provando desequilíbrios severos. Esses efeitos vão desde a habilidade de sequestro de carbono; balanço de nutrientes no solo; comprometimento de ciclos biogeoquímicos; temperatura do solo; contribuição com acidificação marinha; contribuição com perda local de biodiversidade; sérios problemas de saúde como congestão pulmonar, câncer, e infecções nasais; entre outros inúmeros efeitos, que inclusive ainda não puderam ser detectados por limitações tecnológicas (KUMAR et al., 2021). Este estudo ainda aponta como a poluição plástica e gestão de resíduos pode afetar cada um dos objetivos de desenvolvimento sustentável da agenda 2030 da Organização das Nações Unidas – ONU.

Os resíduos sólidos urbanos - RSU, são aqueles resíduos domésticos e os provenientes da limpeza pública, sendo uma das principais fontes de resíduos plásticos, juntamente com aqueles da construção civil e do setor industrial. (PERUGINI et al., 2004). Assim, a mitigação desta conjuntura pode ocorrer, com a integração, necessariamente, em larga escala de várias alternativas como a redução do consumo, principalmente para aqueles plásticos de uso único e rápido descarte; o reuso, ou reparo, quando possível; o aumento da reciclagem destes materiais, a substituição por alternativas mais sustentáveis e a recuperação de energia para os casos em que as alternativas anteriores não puderem ser empregadas (EMF, 2017). A última alternativa, disposição em aterros, deve ser evitada ao máximo.

Os plásticos em sua grande maioria são produzidos de matéria-prima proveniente do petróleo, o equivalente a 6% da produção global de petróleo, em 2016 (NEUFELD et al, 2016). Caso a tendência de consumo continue crescente nos próximos anos, como sugerem previsões, o setor de plásticos será responsável por cerca de 20 % do consumo total de petróleo e 15% do lançamento anual global de carbono até 2050. (NEUFELD et al, 2016). Dessa forma, a reciclagem destes materiais, alternativa promovida neste trabalho, se torna ainda mais fundamental por possibilitar a redução da demanda por recursos virgens, de energia em seu processamento, da geração de resíduos e, conseqüentemente a redução dos efeitos que estes compostos causam ao meio ambiente e a saúde humana, e ainda a mitigação de emissões de gases relacionadas às mudanças climáticas.

3.1.2 RECICLAGEM E REVALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

Os métodos de reciclagem de plásticos podem ser classificados em três grupos principais: (i) reciclagem mecânica; (ii) reciclagem química; e, (iii) reciclagem energética. De modo geral, o primeiro desses métodos se viabiliza por meio do reprocessamento por técnicas mecânicas, que vão atuar nestes materiais, de forma apenas a fundi-los. O segundo ocorre através de processos que realizam a decomposição química por meio do qual se obtém produtos químicos diversos; e o último se desenvolve via incineração, que ocorre obrigatoriamente com o reaproveitamento energético da queima. Entre as formas de reciclagem, a mecânica se mostra no Brasil a mais difundida e viável, por conta de demandar tecnologias não tão dispendiosas em comparação a reciclagem química e ao reaproveitamento energético (DA SILVA SPINACÉ, 2005).

Em geral, a baixa qualidade dos resíduos plásticos gerados no pós-consumo é uma grande desvantagem em comparação com os resíduos pós-industrial. Os primeiros podem possuir falta de homogeneidade e uniformidade entre os tipos de plásticos utilizados, misturas de compostos de origem desconhecidas (papel, metal), contaminação de origem orgânica

(restos de comida) e inorgânica (terra e metais, por exemplo) (HUBO et al., 2015). Os segundos apresentam composição conhecida dos polímeros empregados e são geralmente mais limpos. Por conta desses fatores, os resíduos pós-industriais são normalmente menos complexos de lidar em detrimento aos pós-consumo.

Outros desafios presentes nesse contexto da reciclagem mecânica, estão na coleta, triagem e no transporte destes materiais, resultado das limitações presentes desses sistemas a nível nacional e da baixa densidade desses materiais. Não obstante, o Brasil dispõe da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305 de 2010, que apresenta diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, através da destinação e tratamento adequado mediante logística reversa, porém o país não consegue avançar de maneira satisfatória nesta questão. Mesmo mais de uma década depois, os índices ainda são muito exíguos do desejado e necessário, e não são observadas políticas sólidas que necessitam ser abordadas, desde conscientização ambiental para a população em geral, a integração dos diferentes agentes que atuam na cadeia de reciclagem, e regulamentações mais efetivas e incentivos econômicos, essenciais para promover esse setor (BRASIL, 2010). Espera-se com o recente Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) (2022), melhoramentos a respeito da gestão de resíduos sólidos no país. No plano, é abordado como uma das metas recuperar 20% de recicláveis secos, em relação à massa total de RSU, até 2040, em detrimento aos 2,2% em 2020 do total de resíduos sólidos. Um avanço importante nesse âmbito é a criação de Certificado de Crédito de Reciclagem, podendo promover a integração entre os diversos agentes na cadeia de reciclagem e a Logística Reversa através de investimentos privados relacionados a compra de créditos de cooperativas, financiado a coleta de materiais recicláveis (BRASIL, 2022).

Além disso, esta lógica pode ser alavancada para os plásticos, por meio de uma abordagem conhecida como *upcycling*, referente ao processo de adaptação, aprimoramento e valorização de um material residual para criação de uma nova oferta de produto com maior valor e conteúdo agregado (KORLEY et al., 2021). Nesse sentido, pode-se dizer que a revalorização, pode ser entendida como um sinônimo de *upcycling*, e ainda podem ser exploradas aplicações com uma valorização superior seja por exemplo, através de novas tecnologias, processos inovativos ou melhoramentos, do que aqueles que antes seriam dados após a primeira função/propósito de um produto terem sido cumpridos. Esse processo se contrapõe, ao que se conhece por *downcycling*, que se refere a recuperação de resíduos resultantes da redução da qualidade do material (propriedades inferiores e valor agregado). Esse caso surge devido a situações em que durante a reciclagem tradicional não se consegue impedir a degradação das cadeias poliméricas e o produto final não pode voltar à aplicação original, quanto mais a aplicações superiores em termos de qualidade. Ou mesmo quando o produto ou

material já foi reciclado mais de uma vez, e mesmo com processos de melhoramento como tecnologias de reciclagem mais eficazes, as propriedades não podem ser restabelecidas, necessitando, portanto, da destinação para aplicações de menor conteúdo e valor agregado (HORODYTSKA et al., 2020). O processo de *downcycling* é mais comum ocorrer para materiais reciclados de papel e para os plásticos. Contudo, certos tipos de plásticos possuem maior tendência de perder qualidade conforme se recicla. Essa condição é inerente das estruturas e ligação entre as cadeias poliméricas e de sua massa molar, e promovida por efeito externos, como degradação por calor, oxigênio e tensões de cisalhamentos decorrentes dos reprocessamentos. De toda forma, a tecnologia de reciclagem empregada é quesito mandatório para preservação da qualidade do material, com processos de separação, lavagem, secagem e inclusive práticas que visam recuperar a qualidade como o processo de pós-polimerização no estado sólido para o PET, que será visto em maior detalhe em outro momento.

Em última análise, como qualquer material, os plásticos se tornarão resíduos após terem seu propósito satisfeito, e esse resíduo, na realidade, pode ser um novo recurso, isto é, uma matéria-prima, a qual deve ser colocada de volta ao ciclo de vida, (ou se não for possível, ser aproveitada em termos de recuperação energética, por exemplo), de modo a fechar o ciclo de produção e consumo, ou eventualmente participar de outros ciclos. De modo assim, aproveitar ao máximo estes materiais em sua capacidade técnica e ambiental. Dessa forma, é preciso considerar um conjunto de ações integradas de reciclagem, *upcycling* e complementares que minimizem as entradas de energia, custos e impactos ambientais no gerenciamento de resíduos poliméricos.

3.1.3 POLÍMERO PET

O polímero poli (tereftalato de etileno) (PET) é um dos termoplásticos mais amplamente utilizados. O sucesso deste material deve-se à sua excelente combinação de propriedades como: rigidez, tenacidade, alta resistência ao calor, brilho, estabilidade à luz, propriedades de barreira a gases, estabilidade química e baixo custo de produção. Em virtude de seu fácil processamento ele pode ser fabricado em diversas formas e é reciclável. No entanto, este polímero de estrutura química apresetada na Figura 1, tende a cristalizar-se, o que se traduz pelo bom empacotamento entre suas cadeias, diminuindo o volume livre, o que no geral melhora suas propriedades mecânicas e o torna opaco e mais impermeável.

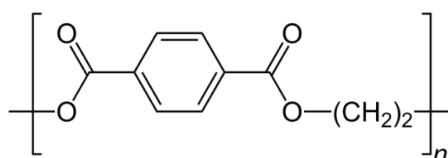


Figura 1. Estrutura química de repetição do PET.

Em polímeros como o PET, coexistem as fases cristalinas (organizadas, e que foram destruídas pela Temperatura de Fusão - T_m) e amorfas (desorganizadas, que ganham mobilidade partir da temperatura de transição vítrea - T_g , sempre menor que a T_m) e quanto mais lento o resfriamento a partir do estado fundido, maior a cristalinidade, ou seja, o percentual de fase cristalina. Quando resfriado abruptamente do estado fundido de forma efetiva, ele pode inclusive manter alguma cristalinidade e deixar o produto transparente, o que fez com que esse polímero tivesse grande aceitação como embalagem de bebidas carbonatadas. Em suma, o processo de cristalização para esse polímero pode ocorrer em temperaturas acima de transição vítrea (T_g) (67°C para amorfo e 81°C para cristalino) e abaixo da temperatura de fusão cristalina (esta pode variar entre 220 e 267°C) (DEMIREL et al., 2011; ZANDER; GILLAN; LAMBETH, 2018).

Este polímero apresenta inúmeras aplicações: é extensivamente usado como fibras, filmes para embalagens, em garrafas para bebidas, embalagens e reforço em materiais de construção civil. É não biodegradável, ou seja, com permanência considerável no meio ambiente e ainda é um dos plásticos de uso único mais utilizados no mercado (ABIPLAST, 2020). Portanto, o retorno desse material à cadeia produtiva é pertinente e oportuno, quando considerado sob a perspectiva de reduzir a demanda de recursos e geração de resíduos deste material.

No Brasil, a maioria do reaproveitamento de materiais poliméricos por parte da reciclagem mecânica acaba mediante as Indústrias de Reciclagem e de Processamento, concentradas nas regiões Sul e Sudeste. O PET é o polímero mais reciclado no país, atingindo um índice de reciclagem de 55% (311 mil toneladas) (ABIPET, 2019). Em relação a essa quantidade, o maior mercado de destinação desse material reciclado ainda é utilizado para atender o setor de indústria têxtil (cerca de 30%), *bottle-to-fiber* (B2F) (caso de reciclagem em ciclo aberto), em partes pelas limitações que a própria oferta de garrafas PET pós-consumo impõe com relação à oferta de embalagens coloridas e contaminação, que dificultam seu retorno à indústria de origem.

A outra parcela (cerca de 25%), dado aos avanços importantes na dimensão da tecnologia da reciclagem mecânica, em particular na última década no cenário nacional, expandiram a atuação deste material também no mercado de embalagens em virtude do crescimento de demanda (GILENO; TURCI, 2021). Como exemplo desses avanços, pode-se citar linhas de separação mais eficientes, empregando diferentes tecnologias, como também a combinação delas, garantindo melhor qualidade na separação, como exemplo: FTIR (Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier), XRF (Espectrometria de fluorescência de raios X), Espectroscopia por Raman etc.

Outros avanços estão também nas etapas de lavagem, com processos de alta performance de qualidade de descontaminação, e na etapa de extrusão para produção de *pellets* grau alimentício, ou seja, que possam ser aplicados novamente em produtos que tenham contato com alimentos (GILENO; TURCI, 2021). O segundo segmento é mais comumente conhecido na linguagem comercial, por *bottle-to-bottle* (B2B), no qual garrafas se tornam novas garrafas e pode, sob cautela, ser aproximada como uma reciclagem em ciclo fechado (algo relativamente recente no país). Essa aproximação em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida, como será melhor discutido mais adiante neste documento, por meio deste panorama deve ter suas premissas justificadas, pois generalizar todas as aplicações, propriedades e funções dos diferentes tipos de garrafas, que elas podem possuir, em somente ‘garrafas’ pode ser capcioso, muito embora esta prática seja recorrente em alguns trabalhos (CHILTON et al., 2010; LONCA et al., 2020).

Não obstante, o cenário possa parecer promissor para a reciclagem do PET, que faturou cerca de R\$ 4 bilhões no ano de 2019 e apresenta uma boa taxa de reciclagem (55%) (ABIPET, 2019). Esse resultado está longe do ideal, dada a urgência da problemática relacionada ao tratamento de resíduos provenientes de materiais plásticos. Neste sentido, as oportunidades de atuação podem em muito ser aprimoradas e expandidas em vistas dos potenciais ganhos não apenas de ordem ambiental, como também social e econômica.

De forma análoga, essa lógica necessita ser aplicada para os outros polímeros que são usados também em larga escala no país, para que índices maiores que 24% de reciclagem mecânica, registrados em 2019 para todos os polímeros (incluindo o PET), sejam atingidos (ABIPLAST, 2020).

3.1.4 MANUFATURA ADITIVA E FILAMENTOS POLIMÉRICOS RECICLADOS

A busca progressiva por maior liberdade de *design* e produção para fabricação de produtos inovadores, que pudessem adquirir conformações complexas, funcionalidades diversas, e que fossem personalizáveis e com capacidade de rápida modificação, impulsionou a concepção de tecnologias como a Manufatura Aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D. As oportunidades relacionadas a este segmento se mostram em ascensão e tendem a trazer inúmeras vantagens para diversos setores nos mais variados níveis. O mercado deste segmento se mostra rentável, com possibilidades de expansão de cerca de USD 12 bilhões em 2020, para algo além de USD 37 bilhões em 2026 (STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2021). Na esfera da indústria de processos químicos, esta tendência também se confirma, não apenas em termos ambientais, mas também de competitividade, ao se reverter em vantagens consideráveis como alta eficiência de produção – devido a economia de consumo

de insumos e redução de geração de resíduos dado que as matérias-primas são depositadas segundo necessidades bem definidas –, e dispensar o uso de ferramentas e moldes. É importante mencionar que a concepção da tecnologia aditiva não vem como uma substituta da convencional como processamento por injeção, extrusão ou outras, como muitas vezes no senso comum acaba sendo entendido e generalizado, mas sim, como mais uma possibilidade de explorar melhor as demandas atuais das sociedades.

Na última década, a impressão 3D ganhou popularidade em vários setores como das indústrias aeroespacial, militar, automotiva, construção, alimentícia, médica e de bioengenharia, e assim, uma gama diversa de componentes (p.e., peças automotivas, instrumentos cirúrgicos, protótipos) pode ser produzida de forma impressa. Além disso, a tecnologia se difundiu para a manufatura de produtos de uso diário e multifacetado como itens de decoração, objetos funcionais, e brinquedos (SHAH et al., 2019).

Dentre as rotas da manufatura aditiva, o método de aplicação mais comum é a Fabricação por Deposição Fundida (FDM) ou Fabricação por Filamento Fundido (FFF). A técnica tornou-se popular por apresentar tamanhos compactos, utilização relativamente simples, preços acessíveis, baixo custo de manutenção, redução da dependência de muitos fornecedores, bem como permite o uso de diferentes polímeros como matéria-prima. Os filamentos usados para impressão 3D são em geral fabricados e distribuídos, utilizando materiais virgens, provenientes de fontes não-renováveis. Apenas alguns, como o poli (ácido láctico) (PLA), derivam de matéria-prima natural, que neste caso, consiste em biomassa obtido pela síntese de ácido láctico (ou lactídeo).

Nos últimos anos, tem crescido o interesse por reciclagem e reutilização de resíduos poliméricos em processos de valor agregado, como a produção de filamentos para MA. Também se intensificaram esforços para que polímeros provenientes do pós-consumo fossem reincorporados à cadeia produtiva. Isso se dá pelo fato, de os filamentos produzidos por materiais reciclados deterem custos bastante inferiores àqueles provenientes de fonte virgem. Tanto isso é verdade que cada quilo de filamento de polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado é comercializado a cerca de US\$ 0,10 enquanto seu homólogo de fonte virgem pode variar entre US\$ 18,00 – 175,00 no mercado (KREIGER et al., 2014). Em uma pesquisa livre de mercado nacional a diferença observada foi de até 67% para o mesmo 1 kg de filamento de ABS entre o reciclado e o virgem (KALUNGA, 2022; F3D, 2022). Além disso outra motivação para o crescimento e a difusão desta prática é a participação de centros de pesquisa, e mesmo, da população em geral, na elaboração de novos produtos com a possibilidade de reciclagem do material, produção de filamentos e impressão no mesmo local, sem depender de centros de

fabricação, e de soluções de logística, além, naturalmente, dos benefícios ambientais (KREIGER et al., 2014; ZANDER, 2019).

Os termoplásticos são materiais ideais para uso na impressão FDM, pois possuem a capacidade de fluir, e depois, solidificar de forma rápida. Se destacam nesse caso aqueles com baixo coeficiente de expansão térmica, que contribui para reduzir as tensões internas causadas durante o resfriamento, mantendo a peça mais próxima do modelo original. Os materiais devem dispor de baixa temperatura de transição vítrea, para que a peça amoleça rapidamente quando aquecida, além de reduzir distorções ocorridas durante a impressão, já que a peça completará o resfriamento antes de enrijecer (LI et al., 2017). Uma ligação secundária forte ajudará a peça a ter melhor aderência entre as camadas, e a temperatura de fusão mais baixa possibilita maior facilidade de imprimir, ainda que com restrições. Os fatores base levados em consideração para classificação de um material consistem na facilidade de impressão, qualidade visual, esforço máximo, alongamento de ruptura, resistência ao impacto, adesão da camada (isotropia), resistência ao calor e fluidez adequada (FERREIRA, 2020).

Em virtude de ser um setor recente, há poucos testes de desempenho, e falta de informações sobre propriedades dos filamentos reciclados na literatura limitando seu emprego em grande escala, dado a influência crucial exercida na qualidade de impressão (PAKKANEN, et al., 2017). O mesmo ocorre com a degradação dos filamentos durante repetidas reciclagens, que necessita ser avaliada em maior nível de detalhe, quanto aos desempenhos técnico e ambiental. Assim, investigar as propriedades dos filamentos reciclados fornecerá o conhecimento necessário para aprimoramento da tecnologia de impressão 3D (MIKULA et al., 2020).

Nesse caso, o processo de produção consiste na transformação de material plástico em *flakes* (flocos) ou *pellets* (granulos), através da reciclagem. A isso se segue a produção do filamento por ação de uma extrusora, podendo ser de escala comercial. No FDM, um filamento termoplástico é desenrolado de uma bobina até uma matriz de extrusão, e forçado através de bocal quando uma pressão é aplicada (KREIGER et al., 2014). Se a pressão é mantida constante, o material extrudado irá escoar a uma taxa constante, mantendo sempre o diâmetro de seção transversal uniforme, aderindo camada a camada até compor o produto completo (Figura 2).

Previamente ao processo de impressão deve ser realizada em *software* de modelagem 3D, a projeção do item a ser impresso. Depois, ocorre o fatiamento em formato G-code, uma linguagem de programação própria para a maioria das impressoras 3D (SHAH et al., 2019).

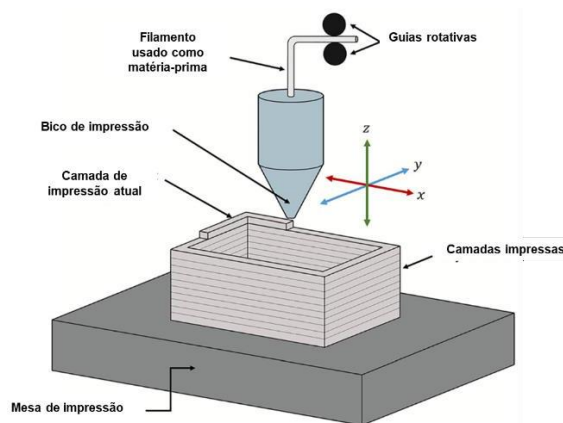


Figura 2. Princípio básico de funcionamento da impressão no tipo FDM ou FFF.

Fonte: Adaptado de SHAH et al., (2019).

A ampliação do setor, aliada a estratégia de mitigação de impactos, pode estimular aplicações alternativas da impressão 3D com potencial de corroborar com a geração de mais valor para a cadeia de reciclagem de resíduos plásticos. Nessa lógica, benefícios sociais também podem ser obtidos, para as cooperativas de reciclagem e associações de catadores (PAKKANEN et al., 2017; CRUZ SANCHEZ et al., 2020). Estima-se que no Reino Unido, em 2018, o custo unitário (por kg) de garrafas plásticas descartadas tenha sido em média de £0.10/kg. Por outro lado, ao serem convertidas em *flakes*, ou lascas, essas podem passar a custar £0.50/kg. Por outro lado, filamentos de PET reciclado podem ser vendidos em média a £20/kg, enquanto produtos elaborados via manufatura aditiva a partir do mesmo material podem chegar até £400/kg (NORRIS, 2018; FÉLIX, 2020).

Os materiais poliméricos mais empregados para esta finalidade são o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e o PLA, cujas práticas de manufatura por filamentos reciclados já foram avaliadas e, talvez por isso mesmo, possam ser encontrados no mercado, ainda que em menor quantidade do que os sucedâneos virgens (PINHO et al., 2020). Além desses, cinco grupos de plásticos estão sendo reciclados atualmente para a produção de filamentos para a MA: polipropileno (PP), poli (cloreto de vinila) (PVC), os polietilenos de alta, e de baixa densidade (PEAD, PEBD), poliestireno (PS), poli (tereftalato de etileno) (PET) (grupo no qual se inclui o polímero poli (tereftalato de etileno glicol) – PETG, um copolímero obtido a partir da copolimerização do PET). De acordo com a literatura, todos esses grupos foram e ainda estão sendo investigados quanto aos seus potenciais de reutilização na forma de filamentos de impressão 3D (MIKULA et al., 2020).

O mercado brasileiro de produção de matéria-prima para a MA a partir de plásticos reciclados é pouco explorado, frente ao potencial de integração das práticas de reciclagem e circularidade, que em conjunto com novos modelos de produção, se desenvolve rapidamente.

Muito embora, outros polímeros tenham potencial de expansão nesse mercado, um candidato natural a ocupar esse contexto é o PET (KREIGER et al., 2014; ZANDER et al., 2018). Tal afirmação se baseia em dois argumentos. O primeiro deles remete ao contexto apresentado na seção anterior, relacionado às vantagens em termos de propriedades e aplicabilidade desse material. Muito embora sujeito a certas limitações de processamento, que serão discutidas mais adiante, o PET reciclado demonstrou ser um material adequado para impressão FDM (ZANDER et al., 2018). O segundo argumento está ligado a lacuna (da ordem de 45%, ou 254 mil toneladas de material não reciclado) na cadeia nacional de reciclagem do PET (ABIPET, 2019). Esse quadro sugere diante da possibilidade de diminuição dessa taxa de não reciclagem nos próximos anos, por conta dos incentivos de circularidade, e de pressões, sobretudo internacionais, para implantação do Desenvolvimento Sustentável, que tendem a aumentar nas próximas décadas. Outras motivações que podem ser apontadas pela escolha do PET são corolários daquelas alegações, que se revertem nos ganhos potenciais de ordens social, econômica, e ambiental, apresentados e discutidos anteriormente. Assim, o interesse na reciclagem e revalorização do PET em benefício da geração de matérias-primas para filamentos para uso em tecnologia de impressão 3D, pode ser visto como uma possibilidade viável, oportuna e bastante próspera.

3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos, tanto na sua fabricação quanto no consumo, tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com este contexto. Uma das técnicas concebidas com esse objetivo é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) (FEE, 2022). O princípio básico da ACV é que todos os encargos ambientais associados a um produto, processo ou serviço devem ser avaliados, desde as matérias-primas até a disposição final do rejeito, de acordo com uma perspectiva sistêmica, conhecida por muitos como do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) (KLÖPPFER, 1997).

Ao considerar a aplicação da ACV é essencial partir da perspectiva de ciclo de vida; ou seja, de que todas as atividades (ou processos) que compõem a ‘vida’ de um produto geram efeitos adversos sobre o ambiente na forma de consumo de recursos, emissões de substâncias no ambiente natural, e uso e transformação do meio físico. De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), ciclo de vida se refere ao “conjunto de estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final” (Figura 3).

Com seu desenvolvimento inicial orientado a melhorar o desempenho ambiental, a ACV se consolidou como recurso de apoio a estratégias voltadas a reduções parciais, ou eventualmente até completas, de consumos e emissões que contribuam negativamente ao ciclo de vida de produtos, processos e serviços. Para tanto, esta atua como técnica quantitativa de diagnóstico (REBITZER et al., 2004).



Figura 3 – Estágios do ciclo de vida de um produto ou serviço

(Fonte: Fundação Espaço Eco BASF www.espacoeco.org.br/)

Para que esses objetivos possam ser atendidos, a condução de um estudo de ACV predispõe que sejam conceituados aspectos ambientais, ou seja, toda e qualquer forma de interação do ciclo de vida de um determinado produto ou serviço com o seu entorno, e impactos ambientais, que consistem em qualquer alteração expressiva do ambiente originada da ação de aspectos ambientais (BAUMANN, H.; TILLMAN, 2004).

3.2.1 APLICAÇÕES E LIMITAÇÕES

O interesse pela metodologia da ACV está em muito relacionado à diversidade de aplicações e usos a que se destina junto aos setores empresarial, governamental, e não governamental, bem como e até, aos consumidores. Por conseguinte, são verificadas distintas vertentes de aplicação da ACV, dentre as quais se destacam: a identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental; comparação de desempenho ambiental de produtos que desempenhem uma mesma função; composição de indicadores de desempenho ambiental; comunicação e educação ambiental; concessão de rótulos (ou selos); projeto de novos produtos e processos, ou remodelação dos já existentes, a partir da variável ambiental; entre outras (SILVA e KULAY, 2006).

Um dos pontos fortes da ACV é a sua abrangência; no entanto, a adoção de um escopo amplo de aplicação acaba por ser também uma limitação, pois induz o estabelecimento de hipóteses, simplificações e generalizações na modelagem do sistema em análise, que acabam por introduzir incertezas aos resultados por ela gerados (HAUSCHILD et al., 2018).

Outras limitações que podem ser apontadas em relação à técnica são de ordem metodológica e se devem em grande parte ao caráter de subjetividade das decisões a serem tomadas no curso do desenvolvimento do estudo. São exemplos disso os procedimentos para definição dos limites do sistema, o tratamento de situações multifuncionais, e mesmo, a escolha das categorias de impacto a serem consideradas durante a análise. Além disso, a inexistência de critérios comuns de padronização de terminologias, origem, qualidade e formato dos dados, ou de adequação do grau de agregação dos mesmos, podem ocasionar distorção dos resultados dos estudos (SILVA e KULAY, 2006; ABNT, 2009). De qualquer forma, a própria técnica prevê mecanismos para atenuação, ou talvez melhor dizendo, especificação e erradicação de tais distorções, a fim de que os diagnósticos que sejam elaborados possam fornecer um quadro sobre desempenho ambiental do objeto de estudo, que esteja perfeitamente adequado às expectativas do tomador de decisão.

3.2.2 METODOLOGIA DA ACV

O método de execução de estudos de ACV é padronizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009), que organizou a tradução das Normas ISO 14040 e 14044. Este se baseia em quatro etapas principais, ligadas entre si de forma iterativa; isto é, com readequações que podem ocorrer ao longo do processo de execução, a partir de ações tomadas em outras etapas (Figura 4). As características de cada etapa da ACV serão apresentadas e discutidas nas seções que se seguem deste documento.

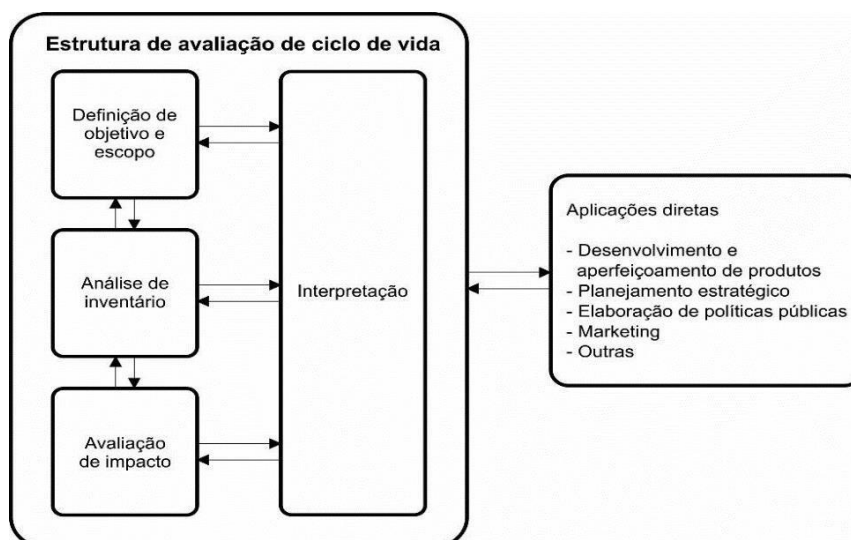


Figura 4. Estrutura da ACV e aplicações diretas da metodologia (Fonte: ABNT, 2009).

Definição de Objetivo e Escopo

O *objetivo* de uma ACV define aspectos tais como no que irá consistir o estudo, suas motivações e utilização (ou seja, para quais fins seus resultados servirão), o público-alvo para qual seus resultados serão comunicados, e até se há intenção de publicação dos mesmos (e em caso afirmativo, como isso se dará).

Durante a definição de *escopo* são conceituados aspectos inerentes à sua aplicação, tais como: sistema de produto, função do produto ou do serviço objeto de análise, unidade funcional e/ou fluxo de referência, as fronteiras de estudo, a forma como será conduzida a coleta de dados, os mecanismos de tratamento de situações de multifuncionalidade, além das categorias de impactos a serem avaliadas e os métodos e modelos usados para conduzir tal processo (ABNT, 2009).

A fim de uniformizar convenções de comunicação, e proporcionar ao leitor mais informações sobre aspectos conceituais e de terminologia associados à ACV, aparecem listadas a seguir alguns desses elementos, de uso frequente durante a realização do estudo. São eles (ABNT, 2009; CARVALHO, 2022):

- a. *Função do produto*: caracteriza a função para a qual o objeto em análise terá seu desempenho ambiental avaliado pela ACV;
- b. *Unidade funcional*: transcreve, em termos quantitativos, a magnitude da função a ser cumprida pelo produto, ou seja, é a base de cálculo sobre a qual está apoiada a análise;
- c. *Fluxo de referência*: quantidade de produto necessária para atender a quantidade de função estabelecida no estudo (ou seja, a Unidade Funcional);
- d. *Fronteiras do sistema de produto*: define a abrangência do estudo para dimensionar as etapas constituintes do ciclo de vida;
- e. *Processo elementar*: menor porção de sistema de produto que pode ser coletado os dados que descrevem consumo de recursos e geração de rejeitos;
- f. *sistema de produto*: conjunto de processos elementares interligados por fluxos de energia e/ou matéria;
- g. *Tratamento de situações de multifuncionalidade*: Tem o intuito de distribuir as cargas ambientais de maneira adequada em situações nas quais mais de um produto emana de certo processo elementar.
- h. *Crítérios de exclusão de dados*: consistem em regras quali-quantitativas a serem usadas para definir os aspectos ambientais considerados pela ACV. Além de contribuições cumulativas mássicas e energéticas a serem medidas em cada processo elementar, essas regras devem

levar em conta ainda o grau de relevância dos aspectos ambientais presentes em cada etapa do ciclo de vida;

- i. *Requisitos de qualidade de dados*: diretrizes a serem aplicadas para efeito de caracterização dos dados que serão coletados, no âmbito das dimensões temporal, geográfica e tecnológica. A definição adequada desses recortes busca conferir robustez e representatividade ao modelo de sistema de produto que será constituído para aplicação da técnica de ACV;
- j. *Categorias e método de Avaliação de Impacto*: determina o enfoque metodológico e as categorias a serem usadas para efeito de quantificação do perfil do objeto de estudo;
- k. *Interpretação e Análise crítica*: verificação do grau de atendimento dos requisitos que foram formulados para efeito de realização do estudo

Análise do Inventário do Ciclo de vida

Nesta etapa ocorre a quantificação dos aspectos ambientais e dos fluxos de matéria e energia que circulam pelas fronteiras que definem o sistema de produto em estudo, em suas interações com o meio ambiente e outros sistemas antrópicos. Dessa ação resulta um Inventário de Ciclo de Vida do sistema em análise (REBITZER et al., 2004).

Os dados coletados devem ser consistentes e representativos da realidade que espelham para que o diagnóstico produzido pelo estudo cumpra com os propósitos a que se destina. Os dados usados em estudos de ACV podem ser de dois tipos: primários ou secundários. Os primários são coletados em campo por meio de medições *in loco*, via registros em boletins de operação, experimentações ou documentos equivalentes. Já os dados secundários remetem a registros mais genéricos, que podem ser obtidos junto a artigos científicos, livros, manuais técnicos, anuários, ou quaisquer outras fontes referenciáveis de informação.

Concluída a coleta, ocorre então o tratamento dos dados. Em termos metodológicos, essa ação consiste em dois procedimentos: (a) ajuste dos dados à Unidade funcional ou Fluxo de referência; e b) tratamento de situações de multifuncionalidade. O ajuste de consumos e emissões à Unidade funcional ou Fluxo de referência compreende expressar os valores de todos os aspectos ambientais coletados em termos daquelas bases de cálculo. Já o tratamento de situações multifuncionais trata da seleção de um procedimento para abordar situações em que determinada etapa do sistema de produto emanam dois (ou mais) fluxos (materiais ou energéticos) com potencial para cumprir funções distintas. O tratamento de situações multifuncionais pode ocorrer por meio da aplicação de fator para alocação de cargas ambientais, ou a partir da expansão do sistema (ABNT, 2009).

Avaliação do Impacto do Ciclo de vida

Esta etapa descreve impactos ambientais associados aos aspectos inventariados, expressando-os em termos quantitativos na forma de efeitos a que são submetidos a natureza e o ser humano, como uma decorrência do atendimento da função para a qual o produto (processo, ou serviço) em análise foi concebido. Em outros termos é a "*fase de avaliação do ciclo de vida que se propõe a compreender e avaliar a magnitude e a significância dos impactos ambientais potenciais para um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto*" (CURRAN, 2012).

Conforme as orientações das normas da série ISO 14040, esta etapa consiste em elementos obrigatórios e opcionais. Como obrigatórios se enquadram a seleção de categorias de impactos e de seus respectivos indicadores; Classificação e Caracterização. Enquanto a normalização e Ponderação são os opcionais por conta de escolhas de valores e risco de subjetividade (SOUSA et al., 2021). Na primeira etapa da Avaliação do Impacto ocorre seleção das categorias que são relevantes, e deverão ser consideradas pelo estudo. Segue-se a isso a Classificação dos consumos e emissões coletados durante a etapa do Inventário nessas categorias de impacto. A classificação é conduzida com base na identificação das questões ambientais para as quais cada fluxo elementar pode contribuir, como esgotamento de água, esgotamento de recursos não renováveis, mudança climática ou eutrofização de água doce etc. Durante a Caracterização, ocorre a descrição quantitativa dos dados inventariados em pontuações de indicadores para as diferentes categorias de impacto. Dá-se o nome de Perfil de Impactos Ambientais ao produto deste processo, que ao ser concluído também encerra o coletivo de elementos obrigatórios da Avaliação de Impactos. As categorias de impacto que aparecem listadas a seguir são apenas algumas das que compreendem o elenco de estudos de ACV:

- **Acidificação:** ocorre a partir da emissão de substâncias solúveis em água que, em primeira instância, ocasiona a redução do pH das chuvas. Dentre as causas de ordem secundária, tem-se: a alteração do teor de acidez do solo e degradação de patrimônios e da vida aquática. Os Potenciais de Acidificação (AP) são em geral descritos em (kg SO₂ eq/ kg emissão) (GUINÉE et al., 2002).
- **Aquecimento Global:** representa o aumento da radiação infravermelha na superfície terrestre, proveniente em especial da crescente quantidade de CO₂, N₂O, CH₄, aerossóis e outros gases na atmosfera, que impedem a dispersão dos raios solares. Os potenciais de Aquecimento Global costumam ser indicados em (kg CO₂ eq/ kg emissão) (HISCHIER et al., 2010).
- **Ecotoxicidade terrestre:** remete ao impacto causado sobre ecossistemas terrestres por substâncias tóxicas lançadas no ambiente. Algumas das consequências finais

deste impacto são a redução da produção agrícola, biodiversidade da flora e da fauna. O potencial de ecotoxicidade (ECT) pode ser descrito em (kg 1,4 DB eq./kg emissão) (HUIJBREGTS et al., 2017).

No que se refere aos elementos opcionais, a Normalização consiste em um procedimento que se propõe a expressar as pontuações dos indicadores para todas as categorias de impacto em uma métrica comum (ou única) (HAUSCHIL et al., 2018). Por fim na Ponderação, os indicadores normalizados de cada categoria de impacto são magnificados pela colocação de pesos, cujo critério usado para seu estabelecimento busca refletir sua importância relativa. A relevância deste elemento opcional está relacionada a capacidade de calcular um único indicador, a partir da soma dos resultados individualizados de cada categoria de impacto (ABNT, 2009).

Interpretação do Ciclo de vida

Envolve a combinação dos resultados das fases anteriores, e visa tirar conclusões, e fazer recomendações para os tomadores de decisão, considerando a sensibilidade e consistência do estudo. Nesse sentido, a Interpretação tem como objetivo realizar uma avaliação crítica do estudo ACV, de modo iterativo, e com o propósito de verificar aspectos estruturais, e aferir premissas conceituais e metodológicas. A etapa também se ocupa de verificar se procedimentos operacionais (p.e., coleta e tratamento de dados, ou de multifuncionalidades) foram conduzidos de maneira consistente com as diretrizes e padrões. Além dessas ações a etapa pode fazer análises complementares para determinar graus de completude, consistência e representatividade do estudo. Fazem parte também deste conjunto de ações de aferição Análises de Sensibilidade e Incerteza (PENNINGTON et al., 2004).

Ao ser aplicada com base no perfil de impacto ambiental, a Interpretação procura identificar gargalos do sistema de estudo em termos de emissões e consumos, e determinar soluções eficientes para a melhoria da qualidade do diagnóstico obtido. A etapa serve, portanto, de mecanismo para melhoria contínua do estudo de ACV, elevando seus graus de precisão, acurácia e, de maneira geral, também a qualidade dos resultados obtidos, além de relacioná-los às aplicações para as quais o estudo se destina (ABNT, 2009).

3.2.3 SITUAÇÕES DE MULTIFUNCIONALIDADE E SUA RELAÇÃO COM OS ENFOQUES DE ACV

Em um contexto como o atual, em que se busca reduzir a disposição final de resíduos, as práticas de reaproveitamento são largamente incentivadas. Como desdobramento imediato

dessas ações, os sistemas antrópicos passam a ser multifuncionais. Em termos objetivos, isso significa que estes são capazes de gerar, simultaneamente, diferentes bens (e/ou serviços), designados pela ACV por coprodutos. Com isso, o sistema passa a ser capaz de atender a mais de uma função (SILVA e KULAY, 2006). São exemplos clássicos de situações multifuncionais a geração de dois (ou mais) produtos a partir de um único processo, ou etapa de um processo (saídas múltiplas) como exemplo processos que ocorrem em biorrefinarias. O tratamento concomitante de diferentes rejeitos em um cenário comum de disposição final (casos de incineração, ou aterramento sanitário), desde o qual se obtenha ao menos um produto (entradas múltiplas). E, o reaproveitamento de um produto cuja função original já se esgotou (portanto, já na condição de resíduo), como insumo para a fabricação de outro bem, que atenda a necessidade diferente da anterior (sistemas em Reciclo Aberto, ou *Open Loop Recycling*: OLR). A Figura 5 ilustra exemplos envolvendo essas três situações multifuncionais.

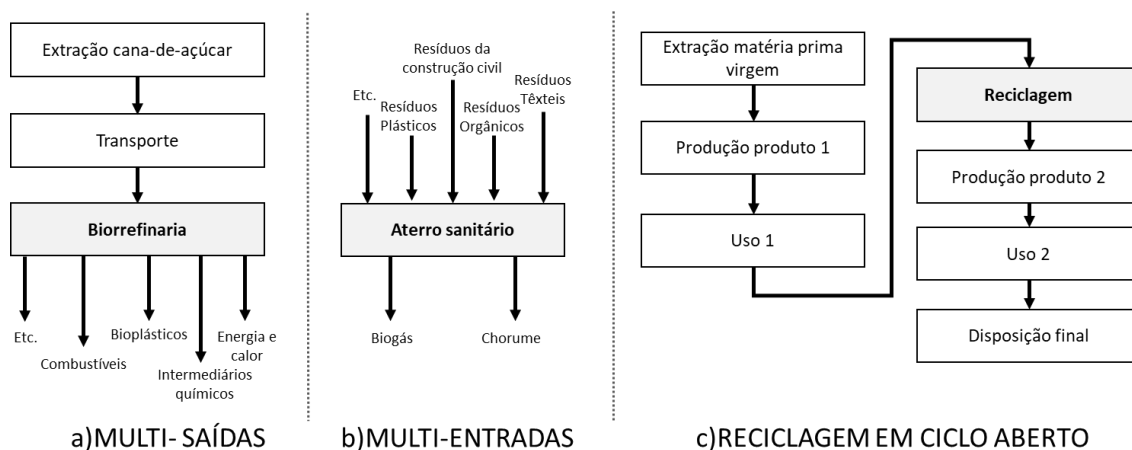


Figura 5. Exemplos de situações envolvendo multifuncionalidade a) Múltiplas saídas; b) Múltiplas entradas; c) Reciclagem em ciclo aberto (OLR).

Fonte: Adaptado de Baumann e Tillman (2004).

A necessidade de expressar a carga ambiental acumulada por um coproduto originário de qualquer destas situações caracteriza um problema catalogado na literatura especializada como tratamento de situações de multifuncionalidade (NOGUEIRA, 2018). Apesar do método ser selecionado para sua abordagem, este irá interferir diretamente nos resultados da ACV. Por conta disso, o tema é objeto de constantes debates que, até onde se tem notícia, ainda não convergiram para um consenso (PELLETIER et al., 2015). A divergência foi inclusive o principal motivador da criação de uma variante ao enfoque Atribucional, usado de forma recorrente até o início do século XXI para elaboração de diagnósticos pela ACV.

Conhecida como ACV Consequencial (ACVC), a abordagem passou a ser vista por muitos pesquisadores como um contraponto ao conceito Atribucional (ACVA), particularmente no que se refere ao tratamento das situações multifuncionais.

Em termos conceituais, a ACVA é uma abordagem de caráter retrospectivo, orientada para a causa dos efeitos ambientais. Seus diagnósticos tendem a ser descritivos (ou estáticos) à medida em que discretizam o sistema de produto em análise, desvinculando-o de outros sistemas antrópicos para efeito de avaliação dos desdobramentos de suas interações com o entorno e o ser humano.

No mesmo domínio, e de sua parte, a ACVC é orientada para verificar efeitos de mudanças diretas, ou indiretas, ocasionadas por uma decisão, ou mudança na demanda por um produto. Dadas essas características, ela irá possuir naturalmente caráter prospectivo, e levar em conta outros sistemas que venham porventura a ser por ela afetados (ou a ela afetar) em função das mudanças de demanda. A consideração de tais formas de relacionamento deverá ocorrer, necessariamente, com sistemas que realizem usos (ou seja, atendam funções) em escalas marginais (SCHRIJVERS, 2016). Em termos aplicados, a ACVA se propõe a descrever fluxos físicos que sejam de fato ambientalmente relevantes (ou seja, que aportem impactos significativos) para o desempenho de um sistema de produto, enquanto a ACVC avalia fluxos, quealém de serem destacados no mesmo mérito, possam ser alterados em resposta a mudanças de demanda de produtos (FINNVEDEN et al., 2009). Para tanto, uma ACVA usará de dados médios para determinar quanto dos impactos gerados deve ser atribuído ao atendimento de certa função por um produto. Já a ACVC fará uso de dados marginais para gerar informações sobre como o atendimento da função em estudo afeta as cargas ambientais (e a partir disso, os impactos), nas perspectivas de médio e de longo prazos. Portanto, e a rigor, a ACVC se presta não apenas a estimar consequências de uma determinada decisão, mas serve também, para investigar como (e quanto) um tomador de decisão seria capaz de influenciar o desempenho ambiental do objeto de estudo a partir de suas ações (EKVALL, 2019; FINNVEDEN et al., 2009).

Ekvall (2019) discute as vantagens e desvantagens de cada abordagem em relação a premissa de que a análise de sistemas ambientais deve atuar como um agente de redução dos impactos negativos sobre o ambiente e a sociedade. A luz dessa hipótese, o autor elege cinco critérios para escolha da abordagem mais coerente e compatível com os objetivos a que se propõe um estudo de ACV, e com outros elementos que perfazem a etapa metodológica de Definição de Escopo. São eles: (i) viabilidade de aplicação; (ii) capacidade de gerar resultados precisos; (iii) compreensibilidade da metodologia adotada; (iv) credibilidade; e, (v) robustez conceitual.

A confrontação de aspectos teórico-conceituais e prático-aplicados das duas modalidades de ACV com esses ditames, sinaliza que a ACVC superaria sua congênere quanto à precisão dos resultados produzidos, por conta de introduzir um caráter de realidade ao processo de geração de informações sobre os vetores que afetam o meio ambiente e o ser humano. Já a ACVA tenderia a ser mais vantajosa que a ACVC nos demais critérios, por (i) requer dados em quantidade (naturalmente) menor de processos do deprenderia a ACVC; e, (ii) poder renunciar a informações relacionadas aos mercados afetados pela produção e uso do produto investigado, uma condição que em muitas circunstâncias pode tornar o estudo inexecutável dados os custos envolvidos. Ainda sob este enfoque, pode-se afirmar que estudos baseados em ACVA são mais compreensíveis, e até intuitivamente claros, por conta da estrutura simplificada, e por isso mesmo, de fácil comunicação em comparação ao que ocorre com a ACVC. Ao adotar este enfoque, o praticante irá se pautar em consequências, e para tanto, fará uso de concepções como produção marginal, ônus evitados e adicionados, e modelos de mercados de difícil compreensão pelo público não iniciado.

Quanto a robustez, o enfoque Atribucional é amplamente mais bem estabelecido em termos de diretrizes e de aplicação do que o Consequencial, ainda que seja menos sensível a escolhas subjetivas do que aquele. O fato de a ACVC considerar para efeito de avaliação consequências sobre processos aos quais o produto em análise não diretamente vinculado (por intermédio de fluxos físicos ou até, de obrigações contratuais), pode fazer com que os tomadores de decisão evitem essa responsabilização, e assim, abram mão de seguir com a análise neste nível. O modelo também estaria sujeito a incertezas que precisariam ser estimadas. No entanto, tal como adverte Ekvall no preâmbulo de sua reflexão, a comparação entre as abordagens não busca selecionar uma abordagem considerando no domínio de aplicação do critério que fora estabelecido. Antes disso, a análise propõe a identificar a modalidade de ACV mais apropriada e coerente com o contexto que se deseja analisar (EKVALL, 2019).

Como já fora mencionado antes nesta mesma seção, a escolha de uma abordagem para aplicação da técnica de ACV irá influenciar as conclusões a serem alcançadas pelo estudo, por condicionar os dados a serem coletados, e a própria forma de modelagem das atividades antrópicas que compõem o sistema de produto. Um exemplo ilustrativo dessa situação remete ao estudo elaborado por Saraiva et al. (2017) sobre alternativas de tratamento de resíduos na cidade do Rio de Janeiro. Ao aplicarem as duas abordagens para o mesmo objeto de análise (e, portanto, a mesma função) os autores verificaram variações da ordem de 30% associadas a impactos na forma de Potencial de Aquecimento Global, em virtude apenas de substituições das demandas energéticas marginais.

As formas de tratamento de situações multifuncionais são objeto de críticas recorrentes de parte da comunidade dedicada ao desenvolvimento da ACV (EKVALL, 2019; EKVALL; WEIDEMA, 2004), pelo fato de não levar em consideração a dependência entre o método e o objetivo de avaliação da técnica. Durante as últimas décadas, muitos estudos foram desenvolvidos com a intenção de tornar a questão mais compreensível, livre de subjetividade, e simples quanto a aplicação. São considerados exemplos bem-sucedidos dessas intenções as reflexões e propostas elaboradas por Bassi et al. (2021); Brandão et al. (2017); Ekvall e Weidema (2004); Pelletier et al. (2015); Ramírez (2009); Schrijvers, Loubet e Sonnemann (2016a, 2016b, 2020, 2021) e Suh et al. (2010).

Seguindo na linha de dirimir conflitos e atenuar antagonismos, e reduzir o grau de subjetividade desse aspecto metodológico, a norma ABNT ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) também fornece orientações e ordem de preferência para que o elaborador do diagnóstico seja capaz de equacionar o problema. Segundo aquela diretriz, sempre que possível, as situações multifuncionais devem ser evitadas, e para que isso ocorra, dois procedimentos podem ser aplicados. O primeiro deles consiste na subdivisão dos processos multifuncionais, de maneira que seja possível, sempre com boa precisão, atribuir cargas ambientais próprias e específicas, a cada coproduto que esteja envolvido diretamente na situação multifuncional. Para tanto, a coleta dos dados que expressem consumos e emissões deve ser realizada de forma cuidadosa, a fim de que a distribuição desses fluxos seja inequívoca quanto às operações consumidoras e emissoras.

O segundo procedimento segue, de certa forma, na direção contrária à que foi sugerida por seu antecessor. Este institui que seja realizada uma Expansão do sistema de Produto em análise, com o propósito de nele incluir as funções relacionadas aos coprodutos. A expansão do sistema de Produto vai ao encontro de imediato, com a filosofia de modelagem adotada pela ACVC, uma vez que (como já fora discutido antes) o objetivo original dessa vertente da ACV é verificar os efeitos ambientais decorrentes de variações na demanda a ser atendida por um produto. Em termos práticos, isso poderia ser conseguido apenas, caso os sistemas antrópicos a serem afetados pelos coprodutos que são gerados pelo sistema de produto em estudo (e a partir disso, as funções desempenhadas por eles), pudessem ser também examinadas pela análise (EKVALL, 2019).

Segundo a norma ABNT ABNT NBR ISO 14044, caso a situação multifuncional não possa ser evitada, deve-se aplicar um procedimento denominado de Alocação para distribuir consumos de recursos e emissões de rejeitos entre os coprodutos. Em primeira instância, a Alocação deverá estar pautada em critérios baseados em relações físicas, a fim de que estes reflitam mudanças quantitativas nos produtos ou funções providos pelo sistema. São exemplos dessa classe de

parâmetros propriedades como massa, número de moles, volume, taxas, títulos e concentrações, teores (p.e., de C ou H), ou propriedades termodinâmicas (entalpia, entropia, energia livre, exergia, entre outros).

Quando, por outro lado, uma relação física não puder ser estabelecida, ou usada como recurso de suporte para a Alocação a norma recomenda que a repartição de cargas ambientais seja realizada tendo por critério os valores econômicos dos coprodutos. Muito embora para muitos esta seja a medida mais coerente para descrever um bem de consumo (ou produção), por se tratar do valor a ele atribuído pela sociedade, os valores econômicos são muito vulneráveis, por estarem atrelados a condições de ordem temporal, geográfica e, fundamentalmente, de mercado. Por conta disso, ao menos na leitura do problema multifuncional feita pela ABNT ABNT NBR ISO 14044, está se tornando a última das propostas de solução do problema, por conta dos efeitos (manifestados na forma de incertezas de método) que seu uso poderia trazer sobre o diagnóstico.

O procedimento de Alocação é aderente com a abordagem praticada pela ACVA. A afirmação se justifica no fato de nesta abordagem metodológica, a tarefa desempenhada pela ACV consiste em estimar impactos associados ao atendimento de uma função, de maneira dissociada da influência de outros sistemas antrópicos. Assim, e como apregoa a Alocação, as cargas ambientais geradas em um sistema de produto devem ser repartidas entre os coprodutos para que aqueles que permanecem no sistema de produto tenham essas parcelas (e apenas elas) computadas. Em muitos casos de ACVA, o preço aparece como critério menos discricionário (até mesmo do que as relações físicas disponíveis) para implementação da Alocação. Em casos dessa natureza, a literatura (FINNVEDEN et al., 2009; SCHRIJVERS, et al., 2016a) sugere a realização de uma Análise de Sensibilidade para aferir o grau de influência que a adoção desse recurso irá trazer sobre os resultados do diagnóstico. De acordo com a ABNT ABNT NBR ISO 14044, a avaliação pode ser feita aplicando-se opções de critérios físicos de Alocação, ao que se segue um relato dos resultados obtidos na forma de discussão desses efeitos.

Já nos estertores dessa reflexão, e apenas e tão somente com o propósito de encerrá-la com um alerta, destaque-se o conteúdo do estudo elaborado por Moore et al., (2017) que avalia o desempenho ambiental do etanol produzido no Brasil considerando a substituição parcial de fertilizantes químicos por vinhaça e torta de filtro. No caso em questão as situações de multifuncionalidade do sistema de produto foram abordadas tanto sob o ponto de vista de Alocação (ou seja, via enfoque ACVA), como de expansão de sistema (ACVC). Muito embora claramente diferentes (como inclusive já seria de se supor), as conclusões obtidas pelos autores são robustas e consistentes, respeitadas todas as condições de contorno estabelecidas para orientar cada situação de análise. Essa constatação faz apenas reforçar a importância do uso de

critérios objetivos e transparentes para selecionar, de forma absolutamente adequada, a modalidade de ACV a ser aplicada.

3.2.4 RECICLAGEM EM CICLO ABERTO (OLR) EM ACV

A ACV Atribucional divide os processos de reciclagem em ciclo fechado para efeito de quantificação de cargas ambientais em duas vertentes: (i) restrita ao ciclo produtivo: caso em que o coproduto gerado em certo sistema é reaproveitado sem que sequer tenha deixado sua cadeia de manufatura de origem; e, (ii) inclui etapas de pós-produção: quando o coproduto emanado de certo sistema é coletado, e retorna ao arranjo original, após ter cumprido certa função (CHEHEBE, 1998). Casos envolvendo ciclo fechado tendem a apresentar baixo grau de complexidade metodológica, pois os coprodutos não transpõem as fronteiras que delimitam o sistema, passando a configurar situações multifuncionais. Por outro lado, em ações de reciclagem em ciclo aberto (OLR), as multifuncionalidades são inerentes, dado que, após não mais ser capaz de cumprir com sua função original um produto (agora na forma de resíduo), será reaproveitado para manufatura de outro, cuja função deve necessariamente ser distinta da anterior. Assim, os dois sistemas de produto envolvidos no ciclo aberto estarão acoplados pela etapa de reciclagem (KLÖPFER, 1996).

A ABNT NBR ISO 14044 admite que reaproveitamentos nas formas de reuso e reciclagem podem implicar que os consumos e emissões associados às etapas de extração de recursos naturais, processamento de matérias-primas, e disposição final sejam compartilhadas por sistemas de produto que compõem o OLR. Segundo a norma, essas intervenções devem ser levadas em conta durante a quantificação de cargas ambientais, muito embora possam alterar propriedades inerentes ao material no uso subsequente a que este se destina. Nesses casos a NBR 14044 recomenda que o tratamento dos processos compartilhados por meio de Alocação ocorra a partir da aplicação de critérios na ordem seguinte: (i) propriedades físicas; (ii) valor econômico (p.e., valor de mercado); e, por fim, (iii) número de usos sucessivos do material reciclado (ABNT, 2009b). A forma de implementação deste último critério é descrita em detalhes na norma ABNT NBR ISO 14049 (ABNT, 2014).

Por se tratar de uma temática complexa quanto aos aspectos conceituais e permeada por exceções, alguns autores separam os sistemas multifuncionais em OLR das demais situações de mesma natureza, como pode ser constatado em: Ekvall (2000); Ekvall et al. (2020); Ekvall e Weidema (2004); Kim et al. (1997); Klöpffer (1996); Schrijvers; Loubet; Sonnemann(2016a); e, Vogdtländer et al. (2001). Olhando a questão em mais detalhes, uma situação multifuncional em OLR pode ocorrer tanto, quando o material é reciclado do sistema em análise, como também, para o caso quando em que este o seja (reciclado) para ele.

No caso de um material ser reciclado desde o sistema investigado, este atuará como substituto de um congênere (reciclado ou virgem), durante a manufatura em outro bem. Essa ação, pode produzir efeitos positivo sobre os sistemas envolvidos no arranjo como redução da taxa de utilização de sistemas de aterramento sanitário, ou incineração, bem como, e também, o menor uso material reciclado em outros sistemas de produtos.

Olhando a questão sob a perspectiva da ACVC o sistema em estudo será expandido para incluir transformações afetadas por aumento (ou redução) da quantidade de material de (ou para) o sistema de produto investigado. Nesse domínio, a OLR se assemelha aos outros casos de processos multifuncionais, em que o atendimento da função adjacente (ou seja, que está associada aos sistemas afetados) irá depender da demanda pela função que é desempenhada pelo sistema em análise. Na prática, porém, pode ser difícil identificar que transformações serão realmente afetadas por uma alteração no fluxo de material que foi reciclado. Este pode substituir um material de mesmo tipo (ou seja, matéria virgem), bem como e até, um material reciclado de outro(s) sistema(s). Também pode substituir tipos completamente diferentes de material, ou mesmo, nenhum material, situação em que uma lógica processual alternativa orienta o funcionamento do sistema do qual será gerado o bem derivado. Em síntese, a reciclagem do material no sistema investigado pode afetar diferentes processos de gestão de resíduos, além dos sistemas de produção nos quais o material reciclado poderia ter sido utilizado em substituição a outro já existente, mas desconhecido (EKVALL; WEIDEMA, 2004). Diante desse quadro, não é incomum que simplificações sejam aplicadas para tornar estudos nessa perspectiva operacionais e factíveis.

Em sistemas envolvendo reciclagem as funções são executadas em diferentes momentos. Caso as situações multifuncionais não puderem ser evitadas, nem os procedimentos descritos na ABNT NBR ISO 14044 puderem ser aplicados a descrição dos aspectos ambientais em relação aos usos e manufaturas de materiais reciclados será dificultada, e caso ocorra, muito provavelmente, apresentará forte grau de incerteza associada. O equacionamento desse problema passa pela aplicação de um procedimento para seleção de métodos de tratamento de multifuncionalidades sem reciclagem em ciclo aberto baseado em aspectos tais como: (i) valores diferentes de impacto ambiental cumulativo para o mesmo material; (ii) taxas de oscilação desses impactos em função dos métodos disponíveis; (iii) variação na ordem de preferências, e na seleção de materiais por conta das disparidades listadas em (ii), capaz até de introduzir, uma implicação significativa no processo de tomada de decisão (NICHOLSON et al., 2009). As decisões quanto à seleção de materiais para processos de reciclagem e gerenciamento de resíduos, são aspectos importantes para melhoria de seus desempenhos ambientais; assim sendo, é de fundamental importância

dispor de procedimentos eficazes para conhecer, informar e justificar (de forma coerente) as implicações ambientais dessas decisões.

Um estudo clássico, mas que permanece atual, envolvendo multifuncionalidades em sistemas com reciclagem e ciclo aberto foi elaborado por Ekwall e Tillman (1997). O procedimento sugerido pelos autores para resolver o problema consiste em aplicar um tratamento em formato de ‘*cascata*’ no nível de cada sistema (Figura 6). De acordo com essa configuração de OLR, o resíduo da Produção do ‘produto 1’ (P1), bem como o ‘produto 1’ em si, quando este não mais puder cumprir com a função para a qual foi projetado e produzido, serão reciclados (R1) para servir de matéria-prima ou insumos no manufatura do produto 2 (P2). Da mesma forma, o resíduo da manufatura do ‘produto 2’ (P2), em associação com este mesmo (tão logo assuma a condição de resíduo) atenderão o processamento do ‘produto 3’, mais uma vez, via reciclagem. Dentro dessa lógica, os ‘produtos 2 e 3’ são produzidos apenas de material reciclado, e ‘produto 3’ será disposto no ambiente no pós-uso.

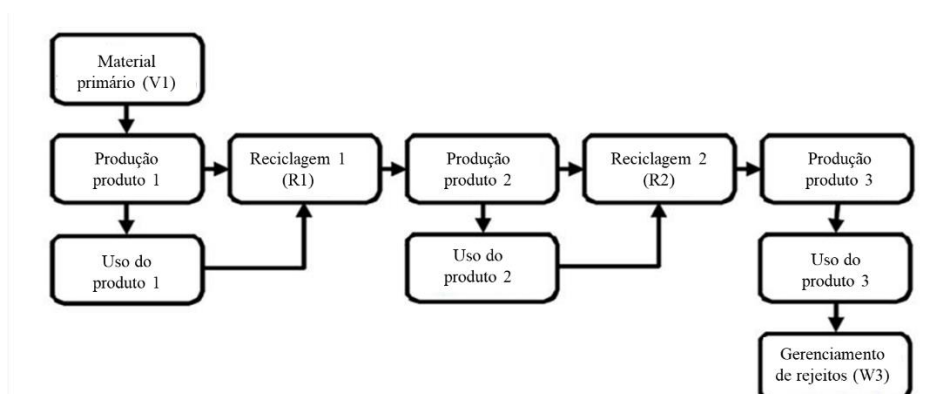


Figura 6. Ciclo de vida em formato cascata dos fluxos de materiais do produto e processos que envolvem a reciclagem de ciclo aberto (Fonte: Adaptado de EKVALL & TILLMAN, 1997).

Há pelo menos três níveis diferentes de sistemas para os quais a situação multifuncional pode ser tratada: (i) o processo de reciclagem; (ii) o ciclo de vida do produto investigado; e, (iii) o ciclo de vida material. Nesse contexto, o termo ‘*cascata*’ é empregado para descrever o fluxo de um material que após ser utilizado no sistema de produto constituído para atender a certa função, será reciclado para outro sistema. Assim, tratar situações multifuncionais em ‘*cascata*’ significa distribuir as cargas ambientais de todos os processos, dado que em muitos deles, estas se associam a um único produto. No entanto, e por outro lado, as etapas de extração e processamento de material virgem, os processos de reciclagem, e o gerenciamento de rejeitos, remetem a todos os produtos da cascata, uma vez que estes são inerentes a todos os produtos que contêm materiais reciclados.

No contexto de reciclagem (ou seja, produtos com funções originais esgotadas seguindo para novos ‘ciclos de vida’ a fim de serem transformados em meios de atendimento de outras funções), existem diferentes métodos para distribuir consumos e emissões dos sistemas de produtos diante de situações de multifuncionalidade (KOUSEMAKER et al., 2021). De acordo com a hierarquia apresentada nas normas ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) e 14049 (ABNT, 2014) o primeiro deles é a Alocação, que para o caso presente consiste em dividir as entradas e saídas do sistema em relação funções critérios, distribuindo assim a carga entre reciclados/coprodutos. Note-se mais uma vez, que a referência feita antes a entradas e saídas do sistema de produto remete à colocação de fronteiras para especificação da porção do espaço sobre a qual a técnica de ACV será aplicada. Tal procedimento é proprietário da ACVA.

Afora a Alocação, os outros métodos propostos para tratar a questão multifuncionais em OLR podem ser classificados em dois grupos. São eles: (i) aqueles baseados em ‘argumentos de justiça’ (ou compensação), típicos de enfoques ACVA; e, (ii) os ‘orientados a mudança’, uma aproximação da prática de expansão de sistema, que corrobora a ACVC. Fazem parte do primeiro dos grupos os métodos de: (a) Cut-off, (b) Perda relativa de qualidade, (c) Rejeito como consequência da extração de recursos naturais, e (d) Extração de recursos naturais como consequência da ausência de reciclagem. Por outro lado, integram o segundo grupo os métodos de (e) aproximação do reciclo em circuito fechado, e (f) 50/50. Cada uma das abordagens está apresentada em mais detalhes na narrativa descrita a seguir. Essas informações foram compiladas junto a Baumann; Tillman (2004).

- **Método *Cut-Off*:** admite que apenas cargas ambientais geradas diretamente por um produto serão a ele atribuídas; ou seja, segundo essa abordagem em um sistema que compreenda o atendimento de duas funções, as cargas associadas a extração de recursos e processamento da matéria-prima virgem são destinadas apenas ao produto que cumpre a primeira das funções relacionadas pelo arranjo em OLR. Já aquelas geradas pela reciclagem, e durante a disposição final, são computadas para o produto que atende à segunda função contida no sistema. Nenhum dado externo ao ciclo de vida do produto que está sendo investigado é necessário, para realizar o tratamento de multifuncionalidades.
- **Método de Perda de Qualidade:** segundo esse enfoque a carga ambiental deve ser atribuída de forma equitativa aos diferentes produtos envolvidos no ciclo de vida em relação a perda relativa de qualidade em cada etapa. No exemplo em tela, as cargas ambientais geradas por ambas as etapas de manufatura, processo de reciclagem, e

tratamento/disposição de rejeitos deverão ser divididas entre os produtos. O fato de ser dificultoso mensurar a qualidade de um material que toma parte da estrutura de diferentes produtos em um sistema OLR, é usual que o critério de valor econômico seja adotado como mecanismo para efetuar Alocação das cargas ambientais entre os produtos em análise.

- **Método de tratamento de rejeito como consequência da extração de recursos:** tal como o título já antecipa, nessa opção o tratamento de rejeitos é considerado como sendo uma consequência imediata, e inevitável, da extração de recursos naturais. Assim, as cargas referentes a gestão de rejeitos, que no encadeamento lógico do OLR vincula-se à segunda função a ser suprida, devem ser contabilizadas para o primeiro sistema do arranjo, onde se dá a extração de recursos naturais. Logo, a vinculação do tratamento de rejeitos à extração de recursos naturais serve de motivador ao uso de material reciclado.
- **Método de extração de recursos como consequência de não reciclagem:** essa perspectiva admite que as cargas da extração de recursos naturais, que são típicas do sistema constituído para atender à primeira função, devem ser contabilizadas para o sistema que se destina a suprir a segunda função, pelo simples fato deste deter as práticas de tratamento de rejeitos. As cargas associadas à reciclagem também são atribuídas aos produtos de origem, de forma distinta da forma como procedem os métodos anteriores usados pela ACVA. Essa leitura busca valorizar produtos que devem ser substituídos por meio da extração de recursos naturais, na medida em que suas funções se esgotem e eles passem a ser rejeitos. É possível dizer que o método incentiva o desenvolvimento e a produção de produtos recicláveis, mas não o uso de materiais reciclados.

As justificativas quanto a que produto deve ser responsabilizado por certo impacto ambiental ocasionado em determinada etapa de OLR são vistas como ‘argumentos de justiça’, pelas abordagens adotadas pela ACVA. Essa constatação é ainda mais evidente para os métodos em que a extração de recursos torna ‘inevitável’ o tratamento de rejeitos ou, se esta é simplesmente uma consequência da reciclagem.

Outra maneira de olhar multifuncionalidades no contexto de OLR seria através dos métodos em que se apoia a ACVC. Estes se baseiam nos efeitos de mudanças, e no que poderia acontecer caso alterações ocorressem nos sistemas de reciclagem. A expansão do sistema é a lógica que está por trás de qualquer desses métodos de tratamento, cujos conteúdos essenciais, que também foram extraídos de Baumann & Tillman (2004), passam a ser apresentados abaixo.

- **Método de aproximação para reciclagem em ciclo fechado:** aqui, um material reciclado irá substituir o material virgem no sistema de destino sem afetar a reciclagem do produto gerado por aquele sistema. Essa alternativa admite ainda, que os produtos podem voltar a ser usados em suas funções originais. O método deve ser aplicado para materiais que não demonstrem baixa de qualidade mesmo após sucessivas reciclagens, como ocorre, por exemplo, com os materiais metálicos. Contudo, o desenvolvimento de novas tecnologias de reaproveitamento e recuperação de propriedades para os plásticos nas etapas de reciclagem, permite que esses produtos sejam cada vez mais reutilizados para atender a suas funções originais. Apesar disso, é sempre recomendável que esse argumento deva ser usado com prudência, e para casos específicos.
- **Método 50/50:** o método assume de forma sumária que o material reciclado irá substituir a matéria-prima virgem em 50%, e outros materiais reciclados em outros 50%. Desse modo, as cargas ambientais da extração de material virgem, e do tratamento de rejeitos são atribuídos de forma igualitária entre a primeira, e a segunda funções. As cargas originadas da reciclagem seguem o mesmo caminho, sendo repartidas igualmente (ou seja, 50/50) entre as funções que com a relação a ela se distribuem a montante e a jusante. Esse método 50/50 mostra-se mais adequado para materiais que sofrem perda de qualidade durante a reciclagem (p.e. papel e alguns tipos de plásticos) que não conseguem ser reciclados facilmente para o mesmo produto.

Os métodos acima descritos são considerados pela comunidade de ACV como as formas mais triviais de tratamento de situações de multifuncionalidade em arranjo do tipo OLR. Por esse motivo, eles foram selecionados para avaliar o caso que orienta o desenvolvimento deste projeto acadêmico-científico. Inclusive, as equações usadas para a aplicação efetiva de cada qual dessas leituras estão disponíveis no Apêndice A deste documento. Apesar de tudo isso, é possível encontrar na literatura técnica, outros aplicáveis para casos de OLR. Além daqueles que consistem de variações dos temas já apresentados, deve merecer destaque a abordagem denominada de '*Carga Evitada*' que também é chamada de '*Reciclagem no fim de vida*'.

Em termos conceituais, a Carga Evitada se baseia no procedimento de *Substituição*, que em linhas gerais consiste em eliminar funções exportadas, descontando processos que são substituídos. Em outras palavras, essa forma de ação trata de incluir a reciclagem nos limites do sistema que fornece o material a ser recuperado, para depois subtrair suas cargas ambientais do total relacionada com a manufatura do material alternativo, o qual, de sua parte seria usado no processamento do produto que a ele se segue no arranjo (que em geral é processado a partir

de matéria virgem). Sob essa perspectiva a reciclagem acumula cargas afora do sistema do produto em análise, por evitar que se faça a gestão de resíduos no ciclo de vida anterior (FRISCHKNECHT, 2010; SOUZA JUNIOR, 2015; KLÖPPFER, 1996).

Dada a semelhança, há pesquisadores que tratam Carga Evitada como uma modalidade de Expansão do sistema; contudo, não há qualquer referência ao método de Substituição como forma de expansão do sistema para casos da reciclagem na ABNT 14044 (ABNT, 2009). Outros, como Werner (2005) argumentam que a Substituição seria conceitualmente equivalente a expansão direta do sistema. Há autores que entendem (e praticam) que Expansão do sistema e Substituição não são sinônimos, sob a alegação de que o primeiro método poderia ser aplicado tanto para estudos de ACVA como de ACVC, ao passo que o segundo se prestaria apenas para ACVC (SCHRIJVERS et al., 2020). Esse relato mostra que o tema não é de consenso na comunidade internacional de ACV. Assim, tratar de situações de multifuncionalidade em reciclagem de ciclo aberto recomenda-se selecionar um método com base em argumentos conceitualmente bem respaldados, e sob o olhar de qual haja aderência com o escopo estabelecido para o estudo. Schrijvers et al., (2016a) oferecem uma estrutura consistente para práticas de Alocação, levando em conta também casos de OLR.

Um alerta importante quanto ao tratamento de multifuncionalidades em sistemas OLR reside nas imprecisões associadas a alguns de seus diagnósticos, que são motivadas por fatores diversos, quase sempre de ordem conceitual e/ou operativa. Um motivador frequente dessas inconsistências são adaptações e modificações realizadas por praticantes para preencher lacunas inerentes ao sistema, como (i) insuficiência de dados sobre todas as etapas do sistema em análise, (ii) desconhecimento da composição dos ciclos de vida a montante e a jusante da etapa de reciclagem, ou mesmo, (iii) o interesse do praticante em analisar apenas recortes dos sistemas em questão, tais como as perspectivas berço ao portão (*cradle-to-gate*), portão ao túmulo (*gate-to-grave*), e portão ao portão (*gate-to-gate*). Há ainda estudos que muito embora declarem que irão analisar situações de multifuncionalidade no contexto de OLR, tratam a questão de maneira superficial, sem estabelecer conexões coerentes com as fronteiras, o tipo de abordagem adotado (ACVA ou ACVC), ou as premissas estabelecidas para a modelagens do sistema.

Por fim, um aspecto relevante para o processo de escolha do método para a solução de situações multifuncionais em ciclos abertos consiste em conhecer o tipo de aplicação a que os resultados de ACV se destinam, ao menos em termos dos grandes grupos de aplicações: respaldo a processos de tomada de decisões; comunicação externa (p.e., rotulagem ambiental, compras verdes ou declarações ambientais); ou, mesmo, uso interno (apoio a decisões cotidianas associadas à manufatura de um produto, ou desenvolvimento de um seu sucedâneo).

Na opinião de Ekvall et al. (2020) da mesma forma que certos requisitos são importantes dependendo da aplicação da ACV, é improvável que um único método de modelagem de reciclo aberto seja adequado a todas essas aplicações.

Apesar de toda a reflexão empreendida nesta sessão da narrativa, a seleção de um método para tratar multifuncionalidades em situações de OLR, estará de alguma forma sujeita a subjetividades, e as escolhas do praticante da ACV. Para amortecer, minimizar, e na medida da possibilidade, eliminar este caráter, o conjunto de orientações genéricas (mas que se provaram bastante efetivas) apresentado a seguir pode ser bastante útil. Na opinião de alguns autores (NCASI, 2012), o método deve:

- Estar necessariamente em conformidade com requisitos das normas ISO 14044 e 14049;
- Ser consistente com o objetivo do estudo;
- Ser coerente com o conjunto de valores que os autores do estudo desejam transmitir;
- Ser transparente;
- Promove a eficiência de recursos;
- Mostrar-se viável, aceitável e inteligível para o público-alvo.

Alguns desses requisitos poderão entrar em conflito com outras recomendações da mesma série, evidenciando assim, o papel do praticante de ACV em decidir sobre quais desses fatores seriam mais importantes para o contexto em análise. Nesse sentido, usar de uma forma para equacionar o problema e transmitir os resultados e conclusões, ou adotar outra capaz de sustentar e demonstrar a variabilidade dos resultados, e ainda recorrer a análises complementares (p.e. Análises de Sensibilidade e Incerteza) e justificativas robustas para complementarem as discussões fará apenas melhorar a transparência e a interpretação dos resultados obtidos.

3.2.4.1 ESTUDOS DE ACV NA PERSPECTIVA OLR

A literatura descreve poucos estudos sobre a aplicação de ACV na avaliação de desempenho ambiental de plásticos em sistemas do tipo OLR. Destaca-se nesse âmbito a pesquisa elaborada por Shen et al. (2010), avalia impactos ambientais da reciclagem garrafa-fibra de polietileno tereftalato (PET) para diferentes casos de reciclagem. Os autores aplicaram três métodos para tratamento das multifuncionalidades identificadas no arranjo em reciclo aberto, sendo dois deles aderentes com o domínio de aplicação da ACVA (procedimentos de ‘cut-off’, e valorização de resíduos), e o outro, que converge com ACVC (expansão do sistema). Nos dois casos iniciais a ACV foi realizada para um escopo de aplicação do tipo

berço-ao-portão (*cradle-to-gate*), enquanto no terceiro deles a lógica adotada foi ampla, do tipo berço-ao-túmulo (*cradle-to-grave*). Os autores notaram que o exercício da reciclagem para o PET em modo OLR reduz os impactos para a maioria das categorias de impacto avaliadas, com ênfase especial para reduções de contribuição no consumo de energia de origem não-renovável (entre 40–85%), e de Potencial de Aquecimento Global (25–75%) em comparação ao PET virgem. Shen e colaboradores (2010) admitem que o método de ‘*cut-off*’ é de mais fácil aplicação que os demais, e que seus resultados são simples de serem comunicados. No entanto, sua lógica impõe que haja simplificação de questões de atribuição para reciclagem em ciclo aberto, especialmente para os estágios do ‘berço’, e do ‘túmulo’. O método de valorização de resíduos mostrou incertezas inerentes aos valores econômicos, que devido a flutuações de mercado, incidiram diretamente, mas nem sempre de forma concreta (como fatalmente iria ocorrer com critérios físicos) sobre a distribuição de cargas ambientais da produção de polímero virgem. Para esses autores a expansão do sistema é o método mais adequado para lidar com sistemas OLR. Apesar de requerer um detalhamento de outros sistemas de produto, o método atende aos propósitos a que se destina ao incorporar perspectivas do pensamento do ciclo de vida em suas ações.

Shen et al., (2010) comentam ainda, que o procedimento de ‘*cut-off*’ reflete a moderna política de gestão ambiental, em que empresas (ou até setores) são vistos como atores de um processo mais amplo, que entre outros aspectos considera na plenitude seus usos reais de energia, e emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Por outro lado, tal comportamento não foi identificado para o método de valorização de resíduos, pois este transfere impactos da produção primária para a secundária (ou derivada). Na visão dos autores, a valorização de resíduos seria a abordagem menos favorável para a indústria de reciclagem, muito embora incentive o *design* de produtos já incorporando o conceito de reciclabilidade, a partir do momento que essa ação se reverte em crédito, por compartilhar parte dos impactos com aqueles. Já a expansão do sistema reflete a eficiência geral da utilização do material, sem que haja influência da distinção sobre os diferentes atores; não obstante, em um contexto real de gestão, em que os encargos e responsabilidades ambientais devem ser atribuídas a empresas ou setores este seria de difícil aplicação.

Seguindo uma linha de argumentação semelhante, Bataineh (2020) avaliou impactos ambientais da reciclagem de PET e PEAD por meio de ACV, comparando-os aos resultados obtidos por *flakes* de PET virgem e pellets de PEAD. Nesse caso, as multifuncionalidades foram tratadas tanto a partir de expansão do sistema sob a perspectiva de Substituição e creditação de cargas, como pelo método de ‘*cut-off*’. Os resultados demonstram benefícios ambientais significativos em relação aos materiais virgens de uso único, além de sugerir ganhos de

Ecoeficiência para o PET e o PEAD. Bataineh argumenta que a escolha dos métodos de tratamento de multifuncionalidades em OLR deve depender dos formuladores de políticas ambientais. Isso porque sob a perspectiva do negócio, os fabricantes se ocupam de reduzir impactos do processo produtivo, bem como aqueles gerados por fornecedores. Além disso, o enfoque de pensamento de ciclo de vida (*Life Cycle Thinking*) é um recurso essencial para melhoria da eficiência da utilização de materiais, bem como para evitar extração desbalanceada de recursos, e promover o gerenciamento racional de resíduos. Portanto, na visão do autor qualquer impacto só poderia ser avaliado em escala global e sob a perspectiva (ampla) do *Life Cycle Thinking* para efeito de elaboração de instrumentos de gestão efetivos nesse campo.

Williams et al., (2010) alegam que os benefícios ambientais da reciclagem em circuito fechado (*Closed Loop Recycling: CLR*) de plásticos foram comprovados por diversos estudos existentes na literatura, ao contrário do que ocorre com práticas de OLR, que à época não haviam sido examinados para muitos materiais. Para ajudar a preencher essa lacuna, os autores compararam dois sistemas equivalentes de drenagem de campos esportivos – sendo o primeiro composto por areia convencional e materiais de drenagem agregados, e o outro, construído com material derivado de resíduos plásticos mistos. A reciclagem em ciclo aberto dos plásticos mistos foi avaliada segundo enfoque de expansão de sistema, e ainda que a análise tenha sido alvo de simplificações os autores qualificaram essa opção como ‘metodologicamente simples’. O estudo concluiu que o sistema baseado em material reciclado apresentava índices de impacto mais baixos de Potencial de Aquecimento Global, e de Demanda de Energia Primária do que o arranjo convencional.

O estudo elaborado por Souza Junior (2015) se propôs a direcionar avanços existentes à época no campo das multifuncionalidades para situações OLR. Após revisar os métodos e procedimentos mais utilizados, o autor verificou a sensibilidade dos resultados de um estudo de caso da indústria de papel e celulose, e avaliou a aplicabilidade de um procedimento de análise multicritério, ponderado por um painel de especialistas em ACV, para auxílio na decisão quanto a escolha do tratamento mais adequado. Os resultados demonstraram que as preferências se distribuíam em termos de hierarquia por (i) expansão do sistema, seguido de (ii) particionamento por valor econômico, (iii) método de ‘*cut-off*’, (iv) particionamento por massa, (v) método 50/50, e (vi) particionamento baseado nos usos subsequentes dos produtos (método não abordado nesta revisão dada sua especificidade de aplicação e grau de limitações).

O emprego de diferentes métodos (ou critérios) de particionamento para tratar situações de multifuncionalidade OLR forneceram resultados diferentes para o estudo de caso em análise, evidenciando como o processo pode influenciar nas conclusões da análise, e a partir disso, nas tomadas de decisão que dela derivam com respeito aos impactos ambientais. Souza Junior

defende que por mais que a norma ISO 14044 seja inconsistente quanto a forma mais adequada de agir diante desse cenário, o uso de uma abordagem multicritério pode auxiliar na seleção e justificativa da escolha do método de a ser utilizado.

3.2.4.2 CONSIDERAÇÃO SOBRE *DOWNCYCLING* PARA OLR EM ACV

Dentro da dimensão da ACV a reciclagem em ciclo aberto pode ser encontrada na literatura em associação ao termo *downcycling*, processo que aparece descrito na seção 3.1.2 deste documento. No entanto, é importante de se ressaltar que o *downcycling* não é proprietário dos sistemas OLR, podendo, portanto, servir também a arranjos CLR (SCHRIJVERS et al., 2016a). Chega a ser comum em muitos estudos disponíveis na literatura, a noção de que a reciclagem em ciclo aberto ocorre justamente por haver perda de qualidade do produto que o impediria de ser (re)aplicado para sua função original após ter sido reciclado. Em verdade, a reciclagem em ciclo aberto se estabelece por fatores diversos, que oscilam desde alterações da demanda do produto primário, (ou seja, de que outros ciclos e aplicações – em geral mais recentes – precisam também ser explorados), até do limite das viabilidades técnica e ambiental de se sustentar um ciclo fechado para certo produto.

Assim, ocorrem com uma frequência superior à que seria desejável, problemas de interpretação quanto aos termos ‘ciclo fechado’ e ‘ciclo aberto’ de produtos e de materiais. Como desdobramento desses entendimentos inadequados, os estudos de ACV acabam favorecendo a CLR em detrimento da OLR, ao se basearem no senso (comum) de que ciclos abertos se estabelecem apenas por conta de *downcycling* (GEYER et al., 2015) e assim, quanto maior for a degradação da qualidade do material reciclado, maior será o impacto ambiental associado (KIM et al. 1997).

Do ponto de vista prático, os dois tipos de processos de reciclagem são complementares para efeito de atender as necessidades da economia circular, de fechamento de ciclo de materiais. No entanto, estes devem ser avaliados em relação aos desempenhos técnico e ambiental de produtos (e serviços) por meio de ACV a fim de verificar da real validade de seus benefícios.

3.3 ESTUDOS DE ACV PARA O PET

Associando a expressividade e a relevância do PET para produção de bens de uso regular pela sociedade moderna, com os efeitos que esses processamentos geram sobre o ambiente, não chega a surpreender a quantidade de estudos disponíveis na literatura em que a metodologia ACV foi aplicada para avaliar contextos em que este polímero esteve envolvido. De maneira geral, essas produções se distribuem em dois grupos. O primeiro deles remete a cenários para

encaminhamento do PET pós-consumo, quando a reciclagem costuma ter seu desempenho ambiental comparado a outros cenários de destinação final. Seguindo nessa linha, Martin et al., (2021) constataram que a reciclagem supera de fato a incineração e o aterramento sanitário em diversas categorias de impacto, com destaque para o Potencial de Aquecimento Global. O segundo grupo observa o ciclo de vida de produtos, e para tanto, usa o desempenho ambiental do PET como referência em comparações com aqueles obtidos por outros polímeros ou materiais. Os trabalhos de Gileno, (2020), Gomes et al., (2019), e Marathe et al., (2019) compilam e revisam estudos nessas duas perspectivas.

Em um estudo recente Bassi e colaboradores (2022) aplicou ACVC e LCC (*Life Cycle Costing*) para analisar as demandas da União Europeia por embalagens de PET. Atuando de forma prospectiva entre os anos de 2020 e 2030, o trabalho quantifica ganhos ambientais e econômicos obtidos por conta de mudanças nos padrões de consumo e na gestão de resíduos. A análise se dá por comparação com práticas usuais, e leva em conta diferentes alternativas de embalagens. Os resultados consideram como essencial haver uma conexão entre sistemas de gerenciamento de resíduos, que deveriam ser mais eficientes, e um mercado robusto de materiais secundários (reciclados). Com tais condutas, Bassi estima uma economia de até 38 Mt CO_{2eq} de impacto no Potencial de Aquecimento Global, e 34 kt PM_{2,5,eq} quanto a Formação de Material Particulado (PMF). Além disso, despesas de 8,3 bilhões €, poderiam ter sido evitadas apenas na forma de custos sociais (BASSI et al., 2022). Sob essa perspectiva, estudos de ACV oferecem uma compreensão holística do ciclo de vida do PET, além de *insights* sobre as etapas do mesmo arranjo, que podem ser utilizados para otimizar fluxos de entrada e saída, de material e energia.

Muito embora a temática tenha sido bastante visitada nas últimas décadas, existem ainda inúmeros desafios a serem superados em termos de análise ambiental de PET, sobretudo junto a novos modelos de produção, e das demandas da Economia Circular. Em particular, faltam ainda estudos que caracterizem as fases de consumo e destinação do material, ou que analisem ciclos de produção onde o PET reciclado está inserido. Seria ainda importante rever os processos de modelagem Atribucional e Consequencial, pois em um contexto típico de mercado, onde competem diferentes produtos, os cenários de consumo e destino tendem não apenas a coexistir, como também, a flutuar.

Boa parte dos artigos se atem em medir consumo de energia, ou o Potencial de Aquecimento Global dos sistemas em análise, deixando de lado outras categorias de impacto relevantes. Outra medida bastante profícua seria ampliar as análises para países em desenvolvimento, para os quais os estudos são escassos por falta de dados e informações sobre os processos relacionados a essa questão.

Há também carência de estudos que analisem novas tecnologias relacionados aos processos de reciclagem mecânica, especialmente no âmbito das operações de lavagem e separação. Por fim, são bem-vindos estudos que avaliem mercados com potencial crescente de expansão para o PET, como o de matéria-prima para a MA, que até onde se pôde ver, ainda não foram avaliadas sob a perspectiva de ciclo de vida. Nesse sentido, e diante de tantas lacunas ainda por serem preenchidas pela academia, realizar estudos de ACV do PET é necessário para compreender melhor os variados aspectos que se originam dessa relação.

3.4 ESTUDOS ACV DE FILAMENTOS RECICLADOS E MANUFATURA ADITIVA

Alguns estudos, foram identificados na literatura a respeito da aplicação de resíduos plásticos para produção de filamentos reciclados como matéria-prima para a impressão 3D. São eles: Kreiger et al., (2014), Mikula et al. (2020), Mohammed et al. (2017), Muñoz et al. (2020), e Schneevogt et al., (2021). Outros associaram ainda a técnica ACV como forma de avaliação dos impactos ambientais como os Gaikwad et al., (2018); Garcia et al. (2021) e Choudhary et al. (2019).

Um traço comum em todas essas produções reside nos benefícios ambientais obtidos a partir dessa prática, nas formas de redução emissões de GEE em relação aos processamentos convencionais, e fechamento (descentralizado) de ciclos de materiais no âmbito da Economia Circular. Apesar disso, observa-se ainda um número bastante reduzido de trabalhos que tratem de avaliar no nível sistêmico, as reais contribuições e consequências ambientais do emprego de filamentos poliméricos reciclados como matéria-prima para MA.

Artigos recentes de revisão examinaram, via ACV, a temática da sustentabilidade e os aspectos ambientais das tecnologias de MA. São esses os casos de Colorado et al. (2020), Cruz Sanchez et al., (2020), Garcia et al., (2018), Khosravani e Reinicke (2020), e Saade et al., (2020). Em todos esses trabalhos, o foco maior de preocupação recai sobre o consumo de energia elétrica dos equipamentos, que podem impactar significativamente o desempenho ambiental da tecnologia. Ao ser comparada às técnicas convencionais, a MA mostra ser vantajosa em relação ao consumo de matéria-prima, e a geração de resíduos, por fazer uso, apenas, da quantidade realmente necessária de material para construção do item. No entanto, o longo tempo de processamento da MA reduz a produtividade tornando muito elevado o consumo específico de energia. Outra constatação frequente nesses estudos foi de que o material utilizado influencia a pegada ambiental do produto em distintas categorias de impacto, causando importantes *trade-off*. Assim, a reciclagem pós-consumo de materiais plásticos para produção de filamentos pode reduzir consideravelmente impactos ambientais dessa prática.

Uma vantagem importante dessa tecnologia reside na simplificação da logística. A possibilidade de juntar a reciclagem descentralizada com a fabricação de peças em locais mais próximos do consumidor, faz naturalmente reduzir as emissões decorrentes de transporte. Essa coordenação vai de encontro ao que ocorre hoje a partir da importação de produtos desde países longevos (em sua maioria da Ásia). Ainda que possam parecer significantes as emissões decorrentes desses transportes em virtude das distâncias (intercontinentais) que precisam ser percorridas, o principal foco de impacto ambiental associado a esses bens, reside, de fato, nas matrizes energéticas dos países onde os bens manufaturados, são de origem predominantemente fóssil. Tais circunstâncias apenas reforçam a importância da aplicação da ACV como recurso de suporte na gestão de impactos ambientais dessa tecnologia disruptiva que cada vez mais se populariza.

3.5 ECONOMIA CIRCULAR DE PLÁSTICOS E ACV

Os modelos de produção atuais, pautados na economia linear, estão chegando ao seu limite, dado que a geração de valor linear não considera a finitude de recursos materiais e energéticos, assim como aumenta a competição por *commodities*, elevando o preço e a instabilidade do mercado, e ainda promove a degradação ambiental, em escala global. Os modelos de produção baseados na Economia Circular (EC) propõem a regeneração do valor do capital e não apenas a extração desse valor; ou seja, buscam o equilíbrio entre economia e meio ambiente, pela eficiência e desenvolvimento estratégico de todo o sistema produtivo, para que haja o mínimo desperdício de recursos e, quando esses acontecerem, que ocorra o reaproveitamento destes em um ciclo contínuo (GONÇALVES & BARROSO, 2019).

De modo geral, uma transição para Economia Circular poderia, até 2040 (i) reduzir o volume de plásticos que entram nos oceanos em mais de 80% ; (ii) diminuir a produção de plásticos virgens em 55%; (iii) gerar uma economia de US\$ 70 bilhões para os governos; (iv) amortecer emissões de GEE em 25%; e (v) criar 700 mil novos empregos, principalmente no hemisfério sul (UNEP, 2022). Portanto, o desenvolvimento de uma EC que venha substituir o modelo econômico linear é uma tendência cada vez recorrente por parte de governos, empresas e da sociedade de forma geral, que carece de modelos resilientes e regenerativos.

Para tornar os materiais poliméricos mais circulares dentro dessa dimensão, três ações fundamentais devem ser tomadas: (i) eliminação de todos os itens de plástico que sejam desnecessários (ii) uso de inovação para garantir que os plásticos ditos necessários sejam reutilizáveis, recicláveis ou compostáveis; e (iii) circulação dos itens de plástico utilizados, para que estes sejam mantidos em atividade sob a perspectiva econômica, e, portanto, fora do meio ambiente (EMF, 2017).

Está sendo discutido pela Organização das Nações Unidas um instrumento de combate à poluição plástica denominada "Fim da Poluição Plástica: rumo a um instrumento internacional juridicamente vinculante" foi adotada pela UNEA-5.2 (Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente), sendo, portanto, uma resolução histórica importante. Espera-se com disso, a criação de um instrumento internacional juridicamente vinculante sobre poluição plástica até 2024, que atenda a diversas alternativas para abordar todo o ciclo de vida do plástico, o *design* de produtos e materiais reutilizáveis e recicláveis, e a necessidade de uma maior colaboração internacional para facilitar o acesso à tecnologia, capacitação, e cooperação científica e técnica (UNEP, 2022).

O crescimento vertiginoso do interesse por esse modelo exige precaução, visto que ainda não existem estruturas harmonizadas para avaliar se uma estratégia atende aos requisitos de redução dos impactos ambientais e sociais. Por outro lado, a ACV e suas abordagens relacionadas, não defendem nenhuma estratégia específica, mas fornecem uma estrutura de avaliação para entender as implicações ambientais, sociais e econômicas de diferentes opções para entregar uma função ou serviço (PEÑA et al., 2021). Dessa forma, a ACV pode servir como meio para avaliar ganhos e ônus de estratégias específicas da EC, visto que se pautam em perspectivas holísticas e robustas para considerar impactos potenciais e abrangem recursos relevantes e categorias de impacto.

A ACV pode avaliar diferentes estratégias relacionadas à eficiência de materiais para avançar na transição para novos modelos de produção. Além disso pode destacar situações de projetos focados na “circularidade” de um recurso individual; ou seja, por presumir que é sempre viável manter os recursos individuais na economia, seja em uso pelo maior tempo possível, ou por meio de ciclos técnicos ou biológicos. Assim, não aparecem como a melhor escolha em uma avaliação mais ampla, e não consideram ocasiões em que manter os recursos na economia por mais tempo pode ser contraproducente (PEÑA et al., 2021). Neste sentido, a aplicação da metodologia ACV para o desenvolvimento, adoção e implementação de procedimentos circulares é crucial para dar suporte a decisões de gestão que levem em conta também o desempenho ambiental.

Ragaert et al., (2017) defendem a complementação das práticas de *design for recycling* e *design from recycling*. A primeira tem como foco de atuação o final da vida útil do produto e a segunda no início da vida útil de outro produto. Os autores argumentam que o design de produtos plásticos possui grande impacto tanto em sua reciclabilidade, como no grau em que ocorra a incorporação de materiais reciclados. Essa estratégia concomitante e complementar de atuação dessas duas práticas de design podem realmente fechar um círculo material. Formas de atingir esse feito seria através da ACV e ainda de Custeio do Ciclo de Vida (LCC – *Life Cycle*

Costing) visando o melhor uso possível dos polímeros reciclados, bem como demonstrar ao público em geral o ganho que deve ser obtido usando estas fontes materiais secundárias.

Pautados em estudos de ACV, Venkatachalam et al. (2022), argumentam que a fim de aumentar a circularidade dos plásticos e manter os recursos o máximo possível em uso, é importante não apenas medir os impactos dos produtos, mas também entender o uso e o design antes mesmo de os produtos serem fabricados. A partir desse racional, os autores desenvolvem estratégias de *design* para reciclagem considerando todas as fases do ciclo de vida de sistema de produtos plásticos. Essas fases foram organizadas e divididos em quatro níveis de atuação ao longo da cadeia de valor do sistema de produtos plásticos e por meio de critérios individuais em cada nível, sendo eles: nível de material, de processo, de produto e de resíduo. Outra contribuição deste trabalho é uma pegada circular específica que considera rotas de produção e descarte de plástico para diferentes localidades. Os resultados dessa análise demonstraram divergências significativas para as contribuições em termos de impactos ambientais para diferentes plásticos e para regiões distintas. Assim, pautar estratégias de *design* ao considerar todo o ciclo de vida, considerando a origem e o destino de insumos e produtos plásticos após o uso é indicado para assegurar uma economia circular sistêmica destes materiais.

3.5.1 INDICADOR DE CIRCULARIDADE DE MATERIAIS E ACV

Corroborando a necessidade de uma economia circular como forma de dissociação do progresso econômico com o esgotamento de recursos, os chamados indicadores de circularidade foram desenvolvidos. A intenção destas métricas possui força na questão de promover soluções que reduzam a demanda de materiais e a geração de resíduos e de destacar as vantagens de combinar estratégias de circularidade complementares (BRÄNDSTRÖM; SAIDANI, 2022). Em vista desta ser uma temática multifacetada e ainda em contínuo desenvolvimento a mensuração de circularidade gera diferentes interpretações (RIGAMONTI; MANCINI, 2021). Conforme avalia Saidani et al., (2019), existem diferentes indicadores que abrangem diferentes propósitos, escopos e usos potenciais. De modo geral, estes indicadores podem atuar em três níveis: micro (produtos, empresas, consumidores), meso (parques eco industriais) e macro (cidade, região, nação e além) (SAIDANI et al., 2019).

Em relação aos indicadores de nível micro, destaca-se o Material Circularity Indicator (MCI) proposto pela Ellen MacArthur Foundation e Granta Design (EMF, 2015) e é o indicador mais citado, elegível e completo que incorpora fluxos de materiais e vida útil (VADOUDI et al., 2022). O MCI é construído essencialmente a partir da combinação de três características do produto: a massa de matéria-prima virgem (V) utilizada na fabricação, a massa de resíduos não recuperáveis (W) atribuída ao produto e um fator de utilidade (X) que considera a duração e a

intensidade de uso do produto (EMF, 2015). Este indicador foi desenvolvido para dar uma indicação de quanto do material de um produto flui de forma circular (VADOUDI et al., 2022). Em sua análise assume-se que qualquer produto fabricado apenas a partir de materiais virgens que acabam em um aterro sanitário é um produto linear. Em contrapartida, qualquer produto que não contenha materiais virgens e que seja totalmente recolhido para reciclagem ou reutilização com uma eficiência de reciclagem de 100% pode ser considerado um produto totalmente circular. A sua escala varia de 0 a 1 e foi projetado para permitir que se avaliasse o nível de maturidade da transição entre o modelo linear e o circular. Este indicador possui algumas premissas e limitações como considerar que o material recuperado ao final do uso possa ser processado com qualidade semelhante ao material virgem original e assume-se que não há perdas materiais na preparação dos produtos coletados para reutilização (EMF, 2015). Por ser um indicador com aplicação rápida e prática e apresentar facilidade de acesso e utilização por parte de empresas ao permitir a identificação de valor circular adicional de seus produtos e materiais, ganhou mais popularidade como forma de mensuração da circularidade (EMF, 2017).

Em termos práticos, este indicador foi empregado para avaliar a circularidade de filamentos de PLA reciclados para impressoras 3D (MUÑOZ et al., 2020). Este estudo analisa a dimensão de reciclagem de plásticos e revalorização de resíduos em aplicações de maior valor agregado, como máscaras de proteção individual durante a pandemia de Coronavírus, os resultados demonstraram uma elevada circularidade para o produto obtido.

Conforme apontado anteriormente, avaliar a circularidade através destes indicadores, em particular do MCI funcionaria de forma mais acertada se ocorresse em combinação com a técnica de ACV. Na medida que, pode possibilitar escolhas estratégicas favoráveis para projetos de Economia circular e orientação na busca de melhores desempenho ambiental de produtos e processos. Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos nesse contexto como forma de ampliar a discussão dessa complementariedade, ao descrever as limitações de cada procedimento, relacionar vantagens dessa união e apontar lacunas que ainda carecem de ser exploradas em estudos futuros (BRÄNDSTRÖM; SAIDANI, 2022; JEROME et al., 2022; RIGAMONTI; MANCINI, 2021).

Lonca et al. (2020) avaliaram a circularidade do PET no mercado norte-americano, tanto para efeito de reciclagem do material para produção de garrafas, como nos setores industriais de filmes, fibras e folhas por meio de uma análise conjunta do indicador MCI e da ACV. Os autores apontam que sistemas de ciclo fechado aumentavam a circularidade do material no nível do produto, mas não no nível do mercado PET, a menos que a taxa de recuperação fosse aumentada.

Essa avaliação conjunta realizada de forma complementar possibilitou identificar, que a melhor estratégia de circularidade estaria relacionada a olhar para todo o conjunto de produtos atendidos pelo material específico e buscar o melhor caso circular de todo o mercado de material ao invés do foco em apenas um produto em particular.

O mesmo procedimento de análise complementar de MCI e ACV foi repetido para outros exemplares no âmbito de reciclagem de resíduos plásticos. Karayilan et al., (2021) avaliaram a cadeia de valor de embalagens plásticas, enquanto Vadoudi et al., (2022) na análise de embalagem plástica de três camadas em dois cenários de fim de vida. O trabalho de Martins (2021) faz uma análise comparativa para resíduos eletroeletrônicos. Em linhas gerais, essa dimensão é ainda incipiente e a literatura carece de mais estudos. Assim, empregar essas duas práticas na perspectiva do presente estudo converte-se em uma possibilidade oportuna como forma de contribuir com a temática.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O método de trabalho adotado para realização deste estudo tem por finalidade o atendimento de maneira adequada e suficiente os propósitos mencionados na seção de objetivos deste documento. Em linhas gerais, este se constituiu de cinco etapas; a saber: (i) revisão da literatura com objetivo de definir aspectos processuais e operativos dos sistemas em análise; (ii) coleta dos dados de fontes primárias (iii) modelagem ambiental dos esquemas que refletem as perspectivas *cradle-to-grave* de reciclagem em ciclo aberto; (iv) análise de desempenho técnico do material obtido dentro da perspectiva analisada; (v) estudo da circularidade do caso em questão através do Indicador de Circularidade de Material (MCI); (vi) elaboração de diagnóstico ambiental por meio da aplicação da técnica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV); (vii) análise dos resultados obtidos e recomendações;

A seção de material e métodos deste trabalho se organiza em cinco frentes principais. Na primeira delas realiza-se a especificação dos processos em análise, na perspectiva de OLR para o estudo em questão; na segunda descreve-se os aspectos relativos à modelagem ambiental. A terceira diz respeito as considerações sobre como ocorreu a análise de desempenho técnico do material e finalmente a última, retrata aspectos do indicador de circularidade de material.

4.1 ESPECIFICAÇÃO DOS PROCESSOS EM ANÁLISE NA PERSPECTIVA OLR

Nessa seção buscou-se apresentar em referência a lógica escolhida de reciclagem em ciclo aberto, um descritivo sobre as especificações dos processos envolvidos em todo o ciclo de vida do polímero PET, na perspectiva da rota processual em análise. Portanto, se faz menção as etapas de produção de síntese do PET virgem a partir da extração de produtos provenientes de fontes de petróleo, a produção do produto primário de garrafas, etapa de coleta, reciclagem do polímero, produção do bem de consumo secundário através da Manufatura Aditiva e a etapa final de disposição em aterro sanitário. Em respeito a etapa de reciclagem e produção do bem de consumo secundário, houve a colaboração de duas empresas para o desenvolvimento deste projeto, sendo, portanto, detalhadas em maior profundidade. A etapa de uso secundário não é especificada enquanto a de uso primário não é contabilizada para efeitos da modelagem ambiental, pois assume-se que os impactos ambientais decorrentes da fase de uso, isto é, durante o cumprimento das suas respectivas funções são desprezíveis, como Garrafa para reservatório de líquidos e suporte para telefone celular, respectivamente.

A contribuição da primeira empresa ocorreu na forma de fornecimento de dados primários. Já a segunda empresa forneceu espaço e equipamentos para realização dos testes experimentais que foram realizados para obtenção de dados primários referentes aos processos

de análise, bem como para a caracterização do filamento e produtos produzidos com o material de PET reciclado.

A motivação de buscar a contribuição das duas empresas para atuar com o projeto em questão, se deu principalmente pelo enfoque nas etapas de reciclagem e produção secundária do ciclo de vida do polímero PET, etapas que ainda carecem dados na literatura, em especial no cenário nacional, podendo assim através dessa colaboração, adquirir maior caráter de realidade e colaborar com a lacuna em questão. A primeira empresa, a Global PET, se relaciona a etapa de reciclagem do polímero PET, enquanto a segunda, a Sinctronics, engloba a reciclagem de polímeros, ou seja, de bens de consumo secundário. Considera-se algumas particularidades próprias das instalações industriais que têm profunda relação com os resultados nos impactos ambientais avaliados neste estudo, tanto pela escala de produção como pela tecnologia empregada. A descrição que se segue, é necessária para a modelagem ambiental por meio da técnica ACV, em vistas do conhecimento da cobertura tecnológica empregada e dos consumos e emissões envolvidos nesse âmbito.

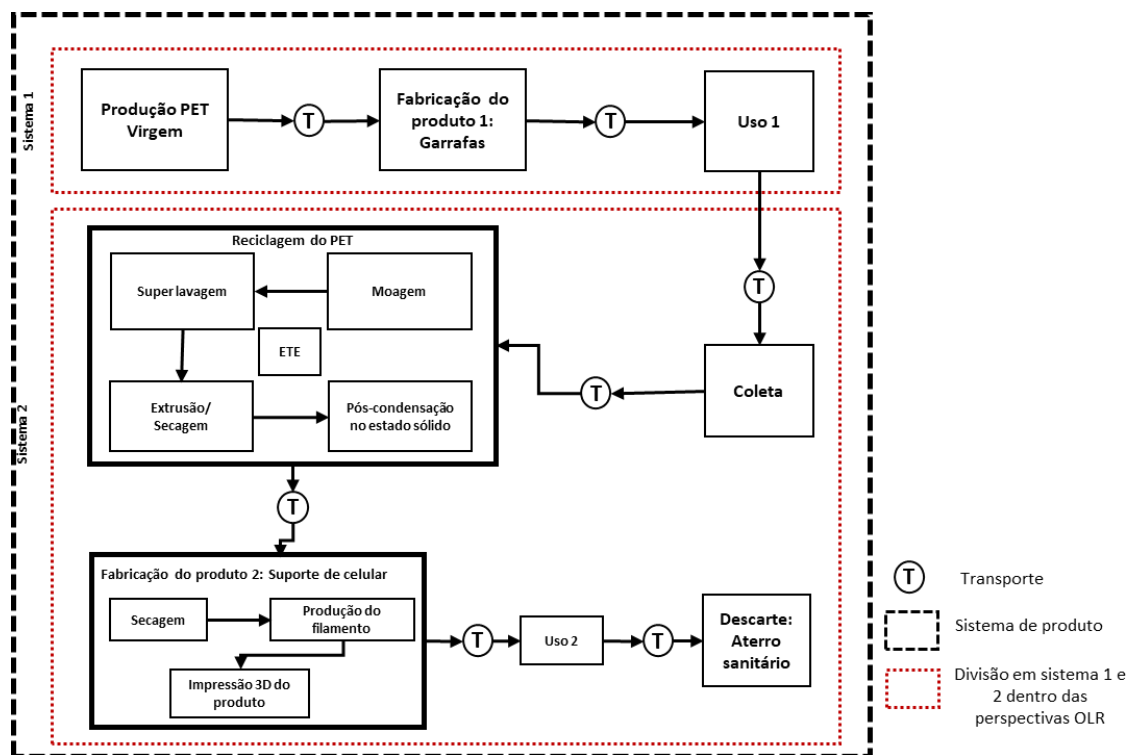


Figura 7. Representação esquemática do sistema de produto considerado neste estudo

A Figura 7 fornece a visão do sistema de produto e dá ideia dos processos envolvidos nesta análise com perspectiva OLR, sendo necessária para fundamentar o entendimento da especificação dos processos. O maior detalhamento desse arranjo será retomado mais adiante na seção 4.2.

(i) *Processos envolvidos na produção do PET Virgem*

Os processos usados para a síntese do polímero PET são normalmente divididos em três etapas: a pré-polimerização, a poli-condensação e a polimerização no estado sólido. Em relação a essas etapas é importante controlar de forma apropriada as principais variáveis do processo, como o perfil dinâmico de temperaturas, o tipo e concentração do catalisador. Esse controle é de fundamental importância para determinar a estrutura do polímero e, conseqüentemente, as propriedades e usos finais da resina.

Pré-polimerização

A etapa de pré-polimerização consiste fundamentalmente na fabricação do bis-2-hidroxi-etil-tereftalato, que é o éster precursor do PET; mais conhecido pela sigla BHET. Tradicionalmente existem duas rotas principais para promoção dessa etapa: a rota de esterificação direta do ácido tereftálico purificado (TPA) com o monoetilenoglicol (MEG) e a rota de transesterificação do tereftalato de dimetila (DMT) com o etilenoglicol (EG) (ROMÃO et al., 2009). Neste estudo a rota selecionada foi a primeira, conforme descrito na base de dados do *Ecoinvent*, que é uma ampla biblioteca de inventários com valores de cargas ambientais (entradas e saídas de materiais, substâncias e energia) associadas ao ciclo de vida de muitos produtos, processos, sistemas de energia, de transporte, de disposição de resíduos, dentre outros.

O processo de esterificação é realizado sob pressão moderada (2,5-5,5 bar) e a alta temperatura (220-270 °C). PTA e MEG são polimerizados na fase líquida para produzir PET amorfo. Água é formada como subproduto durante a reação e é continuamente removida por destilação (FRÖHLICH, 2017). O ácido tereftálico purificado pode ser obtido a partir da oxidação do p-xileno com ácido acético, enquanto o etilenoglicol é usualmente sintetizado a partir do eteno, sendo ambos no Brasil produtos originários da nafta da indústria petroquímica (ROMÃO et al., 2009). O etilenoglicol, no entanto, pode ser também produzido com auxílio de catalisadores a partir do etanol e monóxido de carbono, oriundos de fontes renováveis.

Considera-se a nafta como a principal matéria-prima precursora para a produção de polímeros, uma das frações resultantes do refino do petróleo bruto. Ela inicialmente compreende várias moléculas de hidrocarbonetos insaturados e, portanto, ainda não é adequada como matéria-prima, de forma que necessita de uma etapa adicional, o craqueamento. Em síntese, esse processamento divide a nafta em moléculas menores, insaturadas e, portanto, mais reativas (HISCHIER, 2007).

Poli-condensação

Essa é a etapa em que o PET é realmente produzido. Portanto, o BHET gerado na etapa anterior é então enviado para pré-policondensação em um segundo reator sob vácuo e posteriormente para um reator de poli-condensação de fusão em temperaturas mais altas, chegando a 280°C e ainda sob vácuo crescente. O vácuo é necessário para remover a água e outros produtos secundários e conduzir o equilíbrio da reação em direção ao polímero. O catalisador utilizado neste estágio é quase sempre um composto à base de óxido de antimônio (geralmente Sb_2O_3), por apresentar estabilidade química na presença de estabilizantes à base de fósforo, não induz o aparecimento de cor no produto final e apresenta baixo custo. Ao final desta etapa polímeros são obtidos com grau de polimerização em torno de 100, com massa molar em torno de 33.000 g/mol, podendo ser utilizados para a fabricação de fibras têxteis. Contudo, como a massa molar ainda não é suficientemente elevada para aplicações que requerem maior esforço mecânico e fluidez, como é o caso de conformação em PET grau garrafa por exemplo, necessita-se conduzir a etapa de policondensação no estado sólido, aumentando o custo final da resina (ROMÃO, 2009). O fator limitante da etapa de policondensação é o aumento pronunciado da viscosidade do meio, que dificulta a difusão do MEG e reduz a taxa efetiva de reação (FRÖHLICH, 2017).

Polimerização em estado sólido (SSP)

Durante esta etapa os comprimentos da cadeia do polímero são aumentados pelo calor na ausência de oxigênio e água, por meio de vácuo ou purga com sistema de atmosfera inerte para eliminar os subprodutos voláteis resultantes da polimerização. Ela é utilizada para a produção de PET com alta massa molar ($>30.000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$). A reação é realizada a uma temperatura maior que a temperatura de transição vítrea e menor que a temperatura de fusão por um período entre 10 e 30 h, de maneira que o polímero mantém estado amorfo (ROMÃO et al., 2009). No geral, a reação é impulsionada pela temperatura, pressão e a difusão de subprodutos do interior do *pellet* para a superfície. O produto da SSP é uma resina parcialmente cristalina que pode ser usada para produzir garrafas por meio de moldagem por injeção e moldagem por estiramento-sopro (FRÖHLICH, 2017).

(ii) *Processos envolvidos na Fabricação do produto 1: garrafas*

O processo de formação e fabricação de garrafas e embalagens e uma variedade de outros produtos feitos de PET geralmente começa com a moldagem por injeção e sopro. Pellets de PET com alta viscosidade intrínseca são processadas pela injetora e sopradora a uma temperatura na faixa de 260~285°C, este processo tem uma taxa média de conversão de 97,8% por kg de plástico (HISCHIER, 2007) Em resumo, o processo ocorre a partir de uma extrusora

que injeta a pré-forma, então esta pré-forma obtida é aquecida, esticada e depois soprada com ar comprimido para a conformação da garrafa (HISCHIER, 2007).

A moldagem por sopro por estiramento tem sido usada desde o início da década de 1970, especialmente para detergentes para embalagens, e tem crescido com o uso primário para fazer garrafas de bebidas carbonatadas. Uma das principais é a capacidade de esticar o pré-forma tanto na direção do aro quanto na direção axial. Este estiramento biaxial do material aumenta a resistência à tração, propriedades de barreira, impacto de queda, clareza e carga superior no recipiente (HISCHIER, 2007). Com esses aumentos, geralmente é possível reduzir o peso total em um frasco em 10 a 15% menos do que quando se produz de outra maneira.

O processo de produção de rótulos e tampas não foi considerado para esta análise.

(iii) Processos envolvidos no Uso primário

Na lógica deste sistema OLR, a etapa de uso primário se caracteriza pelo transporte da empresa produtora de pré-formas até a empresa onde ocorrerá o sopro e a moldagem em garrafas, (ou mesmo o transporte de garrafas já moldadas, o que ocorre em minoria), até a empresa que irá realizar o envase do líquido neste produto, dispendendo eletricidade para isso.

Em seguida, pode-se dizer que este produto será transportado até um centro de distribuição, e depois transportado até o local de comercialização do produto, e finalmente encaminhado até o local de consumo de fato do produto. Neste trabalho não foi realizada a consideração dos transportes, consumos elétricos e possivelmente outros consumos e emissões que possam estar envolvidos neste processo que compreende o uso primário. Assim, por conta de ausência de dados representativos deste cenário, este estudo parte, portanto, da premissa de que as distâncias relacionadas na composição da logística descrita devem compreender dimensões que caracterizem a atividade proposta por esta lógica, mas não se reflitam em distorções capazes de comprometer os resultados, justificando, dessa forma, o critério de exclusão de dados.

(iv) Processos envolvidos na etapa de Coleta

A coleta seletiva em respeito aos programas brasileiros apresenta duas modalidades básicas: (1) porta a porta; ou (2) em postos de entrega voluntária em locais de grande fluxo de pessoas. Na primeira modalidade, o esforço é das prefeituras por meio de caminhões de coleta, cooperativas de catadores ou de catadores autônomos. Já na segunda, o consumidor é quem deve encaminhar o material reciclável aos postos de coleta. A estrutura do mercado brasileiro nessa conjuntura pode envolver catadores autônomos, cooperativas de catadores, pequenos, médios e grandes sucateiros (GONÇALVES-DIAS et al., 2006). O projeto em questão agrupa esses processos que podem ocorrer em vários níveis, apenas como ‘Coleta’.

Assim sendo, a etapa compreende os processos de recolha deste material, que ocorre juntamente com outros tipos de polímeros e outros materiais como vidro, papel; recebimento/estocagem; separação; e prensagem/enfardamento do material plástico de PET nos centros de triagem, com o intuito de diminuir seu volume e facilitar o transporte.

Os principais consumos envolvidos nessa etapa se referem ao consumo elétrico para o maquinário que relaciona estas operações de triagem e ao consumo de combustível diesel, proveniente dos caminhões de coleta seletiva, que recolhem esse material nos centros urbanos e os encaminham até os locais de triagem. Para o transporte que compreende a coleta partiu-se de uma distância média de 50 km de trajeto realizado por dia para cada veículo (36 km rodagem na cidade, mais 14 km até o centro de triagem) (PAES, 2018). Este dado provém de fonte secundária, baseada na cidade de Sorocaba, e pode refletir uma boa aproximação de distância para outras cidades médias brasileiras. No geral, após essa etapa o material prensado e enfardado destina-se à reciclagem

(v) *Processos envolvidos na Etapa de Reciclagem do PET*

Com o intuito de um melhor detalhamento e ilustração de como ocorreu o processo de obtenção dos dados provenientes da empresa recicladora, a fronteira relativa as etapas envolvidas nessa empresa podem ser visualizadas na Figura 8. A divisão dos processos, operações unitárias presentes são divididas pela empresa em quatro blocos principais, que refletem as etapas que ocorrem de modo subsequente, e um bloco referente a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). Esses quatro blocos compreendem a: Moagem; Super Lavagem; Extrusão e Secagem e a Pós-condensação, essa divisão, assim como as principais consumos e emissões podem ser observados na Figura 8 e, serão descritos a seguir em maiores detalhes.

Moagem

O processo de moagem é responsável pela descaracterização de garrafas PET nos chamados *flakes*, ou “flocos” de PET, que nada mais são do que pequenos pedaços de PET. Esta etapa consiste em uma sequência de processamentos interligados por esteiras.

Inicialmente os fardos de garrafa PET chegam na empresa e são abertos por um equipamento desagregador, que tem por finalidade separar os blocos de PET que haviam previamente sido prensados para facilitar o transporte até a empresa. Em seguida, as garrafas desagregadas passam por peneiras para retirar todo tipo de sujeira superficial mais grosseira que possa estar retida as garrafas, como terra, areia etc.

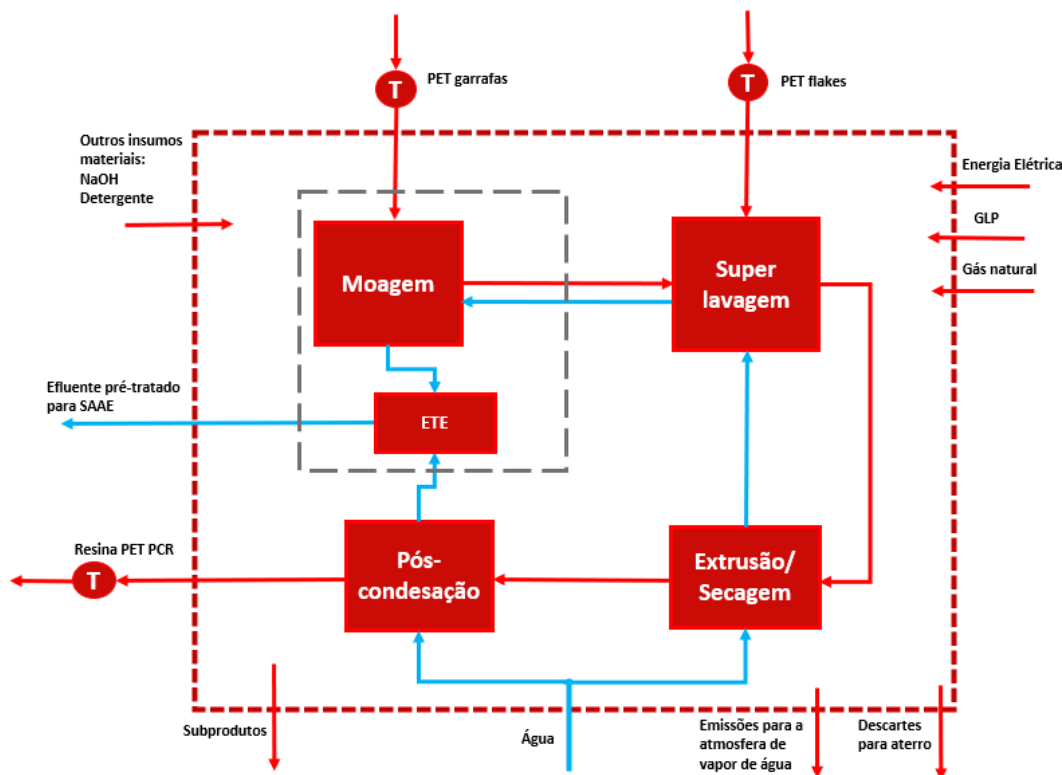


Figura 8. Fronteira envolvida na empresa recicladora de PET

Este material passa então por linhas de separação automáticas e manuais para realizar a separação de outros materiais que possam estar presentes, como outros plásticos e metais (por exemplo, embalagens de PVC, PEAD, PS, pedaços de alumínio etc.) e classificar garrafas PET não desejadas para aquela campanha específica (por exemplo quando se produz *flake* incolor, separam-se garrafas PET coloridas para uso futuro na produção de *flake* verde).

A separação automática das garrafas ocorre essencialmente por meio da tecnologia de NIR (Infravermelho próximo). Neste equipamento sensores para detecção de metais e de outros materiais estão presentes assim como sensores para detecção de cores, como pode ser observado na Figura 9A. Assim, estes sensores avaliam os materiais, de modo o que não é desejado no processo “cai” simplesmente da corrente principal, enquanto o material desejado é ejetado através de jatos direcionados de ar comprimido de volta a linha de separação. Este processo ocorre duas vezes, garantindo maior eficiência e uma separação mais precisa.

A separação manual ocorre na sequência, nela é conduzida uma reavaliação das garrafas de PET separadas. A fim de garantir uma homogeneização do material desejado e eliminar a presença de outros tipos de materiais, ou seja, é conduzido um trabalho mais refinado de triagem, atuando como monitor da qualidade dos processos automáticos anteriores. A Figura 9B retrata este processo. Em seguida, este material separado é encaminhado em esteiras ao Moinho (Figura 9C), onde as garrafas de PET desejadas serão trituradas a úmido, pois dessa

forma o processo ocorre com mais facilidade. A moagem é realizada até que a granulometria requerida seja atingida, os *flakes* obtidos passam por tanques em uma lavagem prévia para retirar o excesso de impurezas pesadas. A Figura 9D ilustra os *flakes* obtidos após a moagem, estes são então condicionados em *big-bags*, para serem direcionados conforme demanda para a etapa de Super lavagem.

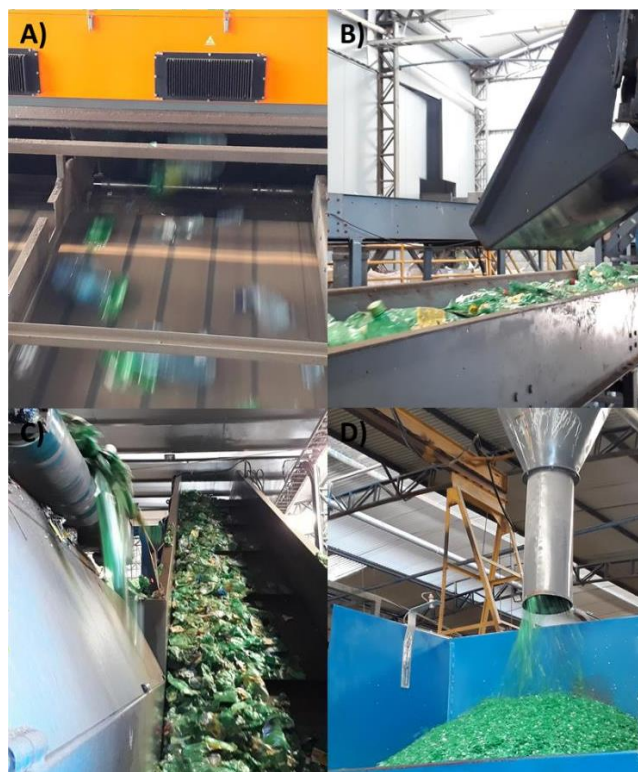


Figura 9. A) Separação através de detector de infravermelho (NIR) B) Linha de separação manual C) Material separado sendo encaminhado para moedor D) *Flakes* de garrafas pós moagem

O rejeito gerado durante o processo de Moagem que não pode ser aproveitado ou vendido como subproduto é encaminhado para aterros sanitários. As etapas subsequentes ao processo não geram rejeitos, somente subprodutos. Ao longo dos quatro processos produtivos são gerados diversos subprodutos, que se configuram como material plástico indesejado, rótulos, tampas, pó de PET etc. Estes materiais são coletados, embalados e direcionados a venda para outras empresas, como por exemplo do setor de tintas, fitas de arquear, etc., que os empregam como matérias primas em seus processos. Estes subprodutos são gerados em maiores proporções nas primeiras 2 etapas, na Moagem e Super lavagem, e vão diminuindo em quantidade até na última etapa, a Pós-Condensação somarem menos de 0,5%.

Super Lavagem

Além da matéria-prima que chega como garrafas a empresa também compra uma parte de *flakes* de PET de outros locais, que realizaram de maneira relativamente similar a etapa de moagem descrita anteriormente. Logo, os *flakes* obtidos na etapa de Moagem anterior, bem como aqueles que foram comprados, vão passar pela etapa de Super lavagem.

Sendo assim, após a etapa de moagem, é necessário remover dos *flakes* de PET diversos resíduos e contaminantes que possam estar aderidos ao material, assim como alguns tipos de adesivo que são empregues para prender rótulos nas garrafas. Portanto, o processo de Super Lavagem de *flakes* se inicia com a separação por densidade, em tanques com longos períodos de residência, nos quais ocorre a separação de resquícios de outros tipos de polímeros que ainda possam eventualmente estar presentes. Neste momento as poliolefinas que possam estar presentes são separadas do PET, uma vez que são polímeros com densidades distintas.

As etapas subsequentes ocorrem em tanques aquecidos nos quais o fluxo de água é direcionado em sentido contrário ao fluxo de material, deste modo uma melhor eficiência de processo é alcançada. Nesta fase detergentes e hidróxido de sódio são também empregados para auxiliar no processo de lavagem. Assim, impurezas retidas nos *flakes* de PET, bem como rótulos são removidos durante estas linhas de lavagem. Em seguida, ocorre o enxague destes materiais, realizado somente com água, cuja função é a retirada de qualquer excesso de produtos químicos do material que foi processado até então. O *flake* super lavado passa por uma centrífuga para que seja previamente seco.

Como etapa final de controle de qualidade, o material passa novamente por um detector de Infravermelho, de modo que o produto saia da lavagem e seja encaminhado para a etapa seguinte com uma ótima qualidade. Por fim, estes *flakes* são embalados e armazenados para posterior uso na etapa de Extrusão. O processamento seguinte aguarda a liberação que é feita baseada em avaliações de amostras em laboratório de Controle de Qualidade e confirmação de normalidade no processo produtivo.

Secagem/Extrusão

A próxima etapa que engloba operações relativas à secagem e extrusão tem duas funções principais, sendo a primeira a de retirar a umidade presente no material. Em seguida, transformar os *flakes* obtidos da etapa anterior em *pellets*, que são pequenos grãos de PET, em formato regular e densidade adequados para alimentar outros processos industriais, que darão origem a novos produtos.

Sobre a secagem do material, o PET é um material que requer uma secagem rigorosa, pois a presença de umidade pode favorecer reações de hidrólise durante o aquecimento, a despolimerização de suas cadeias e, conseqüentemente, redução de sua massa molar. Em virtude dessa questão, a secagem na empresa visa cobrir essa questão, de modo que ocorre a fim de garantir melhor qualidade final do reciclado. Assim, os *flakes*, nessa etapa são alimentados em silos, aquecidos e com circulação de ar seco, que irão retirar umidade do material e em sequência são direcionados para secadores por convecção e infravermelho, que irão secar o material por irradiação, por meio da excitação das moléculas de PET e de água, aumentando a eficiência de secagem de dentro para fora.

O material após passar pelos equipamentos de secagem é encaminhado para as extrusoras que promovem a fusão do material e o transforma numa massa que, sob pressão, passa por um filtro de telas em de aço inoxidável que retém partículas maiores que 78 micrometros (grãos de areia, por exemplo), que comprometeriam o processamento pelo cliente da matéria-prima reciclada para a aplicação na conformação de garrafas e embalagens. A massa filtrada passa por uma matriz de extrusão, ganhando a forma de espaguete que são resfriados numa calha de água, antes de entrar no cortador rotativo que vai cortar o material no formato de *pellets* aproximadamente cilíndricos. A borra gerada no processo da extrusão é aproveitada como subproduto desta etapa.

Este processo foi desenvolvido na empresa em estudo para causar o mínimo de degradação térmica possível, evitando que o material seja escurecido devido à alta temperatura em que esse processo acontece, cerca de 290°C. Nesta etapa como resultado do contrafluxo do processo de extrusão, são geradas borras, outro subproduto do processo.

Os *pellets* gerados neste processo (Figura 10) passam por desagramento, são secos em uma centrífuga e peneirados, para eliminar material com formato não-conforme, como pó, cortes de pequena ou grande dimensão e presença de colados, este material pode ser processado novamente. Os *pellets* conformes são encaminhados para silos onde ocorre a cristalização e as amostras são encaminhadas para o Laboratório de Controle de Qualidade para terem a confirmação de normalidade no processo produtivo. Por meio de transportes pneumáticos este material resultante da etapa de extrusão pode ser encaminhado para armazenamento em *big-bags* ou em silos. O consumo de água nessa etapa não é expressivo, ocorre apenas para resfriamento do processo, através de torres de resfriamento. A água residual é destinada para a etapa de super lavagem.



Figura 10. Pellets obtidos da etapa de extrusão

Pós-Condensação No Estado Sólido

A última etapa tem por intuito realizar a descontaminação final de impurezas que possam estar presentes no material, conseguindo retirar eventuais contaminantes químicos, inclusive do interior do polímero na forma de compostos voláteis, que poderiam transmitir sabor ou odor aos produtos e alimentos embalados em frascos produzidos com resina reciclada. Esse processo também possibilita a regeneração das moléculas de PET que foram degradadas no ciclo de vida anterior do material. Na empresa de estudo este processo ocorre através de bateladas, permitindo que se produza diferentes produtos sem perdas ou redução da eficiência devido à troca de um produto por outro. Desse modo, podem ser gerados produtos com diferentes viscosidades a depender da necessidade desejada.

Essencialmente o processo de pós-condensação no estado sólido é aquele que confere ao extrudado amorfo as propriedades finais de cristalização e viscosidade intrínseca requeridas pelo mercado. O aumento da massa molar ocorre em função do tempo de reação no estado sólido, quanto maior o tempo, maior será a massa molar do polímero obtido, transformando-o finalmente em resina PET-PCR (PET-pós-consumo reciclado), denominação usualmente utilizado na forma comercial. Nesse sentido, este processo ocorre em reatores que vão realizar o tratamento térmico do material a altas temperaturas e ambiente inerte, para promover o aumento da cadeia molecular e retirada de subprodutos, por meio de sistemas de vácuo, sem que a coloração do produto seja afetada. Em síntese, este processo ocorre em 3 fases: 1) Aquecimento dos *pellets* até uma temperatura pré-estabelecida; 2) Platô em condições isotérmicas, durante um período específico, no qual a cinética da reação de pós-condensação ocorre; 3) Resfriamento do material até que se atinja uma temperatura baixa o suficiente, de modo a evitar a degradação do polímero. A Figura 11 retrata os reatores nos quais ocorre o processo de pós-condensação no estado sólido da resina de PET.

A resina que sai desta etapa é encaminhada por meio de transporte pneumáticos para um sistema de peneiramento, que possui detectores que verificam se o material se encontra nas especificações adequadas de viscosidade e se apresenta conformação regular e tamanho uniforme. Caso o material não seja aprovado ele é reprocessado, portanto, as perdas como

coprodutos são mínimas nesta etapa. A água utilizada nesta etapa é empregada para resfriamento das caldeiras de aquecimento, e recircula no processo, sendo depois destinada para a Estação de tratamento de efluentes (ETE) interna da empresa.



Figura 11. Reatores de pós-condensação no estado sólido (SSP)

Utilidades

Os processos de reciclagem pela empresa recicladora foram desenvolvidos com uma grande preocupação de maior eficiência na etapa de lavagem e de economia em relação ao consumo de água. Desse modo, a empresa em estudo desenvolveu otimizações em seus processos para que a reciclagem do polímero PET aconteça como um todo de forma mais econômica, tanto por parte dos equipamentos com características que garantem baixa perda de matéria prima e economia de energia elétrica, como por parte da água empregada nos processos de lavagem e refrigeração.

A água que abastece as fábricas é captada através de poços profundos, recebendo cloração em escala de ppm, sendo então encaminhada para as etapas previamente descritas. A empresa recicladora possui ainda um avançado programa de uso consciente da água com tratamento industrial pós uso. A água empregada nos tanques de lavagem cai no transbordo e é encaminhada para ser reaproveitada no processo de Moagem. Dessa forma, ocorre a recuperação da qualidade da água utilizada pela indústria, possibilitando seu descarte conforme legislação vigente. O efluente gerado no processo de reciclagem possui variações nas concentrações dos contaminantes e sofre processos físicos e físico-químicos sequencialmente: peneiramento para remoção de particulados grosseiros; ajuste de pH, coagulação, neutralização, floculação, decantação, desaguamento por filtro prensa do lodo residual gerado e filtragem final do efluente tratado por filtros de areia e carvão ativado. Após se submetido a essas intervenções, o efluente tratado é retornado para reuso ainda no processo de Moagem.

O lodo desaguado, após ser devidamente armazenado e caracterizado, segue para a destinação final em aterro sanitário.

É notório que processos de reciclagem de polímeros consomem uma quantidade de água elevada, seja para resfriamento dos processos ou para própria limpeza do material e remoção de impurezas, possuindo papel de destaque em termos de aspectos ambientais (MESQUITA et al., 2014). Neste sentido a empresa, organiza a distribuição da água que abastece o sistema de modo que ocorra o reaproveitamento em todas as etapas de maneira subsequente, recircula internamente em algumas etapas e ainda é tratada internamente para ser reaproveitada novamente antes de ser destinada para a estação de tratamento da cidade.

O consumo de energia elétrica ocorre em todas as quatro etapas do processo de reciclagem e em menor quantidade na ETE. A apuração deste consumo foi fornecida através de medidor elétrico da empresa e este consumo foi fornecido pela empresa para as quatro etapas, a respeito de todos os equipamentos e instrumentação envolvidos. Energia térmica também é consumida na forma de Gás Natural e GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), sendo utilizado nos queimadores e nos aquecimentos de fluidos térmicos nas etapas de Pós-condensação, Extrusão e Super-Lavagem. Os valores de consumo de material, químicos empregados nos processos, e os produtos e subprodutos gerados na produção também foram fornecidos.

A respeito do transporte das garrafas e *flakes* que chegam até a empresa, bem como do transporte dos resíduos que são encaminhados para o aterro sanitário, foram fornecidos a capacidade de carga média dos caminhões envolvidos, tal como a distância média das regiões que constituem os principais fornecedores da empresa e a distância até o principal aterro sanitário que recebe os resíduos. O combustível considerado durante a modelagem ambiental é diesel.

(vi) Processos na Etapa de Produção do Bem de Consumo secundário

Os materiais utilizados neste estudo provêm de PET reciclado grau garrafa (que neste trabalho está referenciado apenas como “PET”) e foram fornecidos como doação pela empresa recicladora, localizada na cidade de São Carlos-SP, na forma de *pellets* reciclados super lavados pós-condensados. Os dados relativos à etapa de produção secundária de bem de consumo, a se compor dentro da perspectiva OLR, foi proveniente da contribuição da segunda empresa, localizada em Sorocaba-SP, responsável, dessa forma, pela transformação da resina e produção de um novo produto. A lógica que descreve e ilustra a fronteira do sistema em referência as etapas que ocorreram nessa empresa podem ser visualizadas na Figura 12. As etapas que compreendem a fronteira dentro da segunda empresa, são: secagem da resina, extrusão e bobinamento de filamento de PET reciclado, secagem do filamento, impressão do produto e fase de uso secundária.

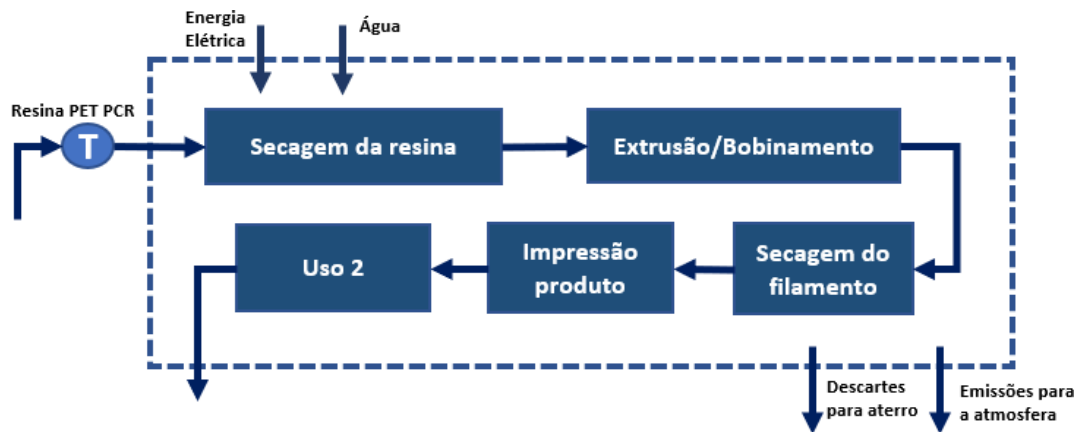


Figura 12. Fronteira do sistema da empresa transformadora da resina PET em um novo bem de consumo.

O filamento empregado como matéria-prima para a Impressora 3D foi desenvolvido pela própria autora a partir destes *pellets*, bem como os corpos de prova que foram necessários para a caracterização da mecânica material através do teste de tração e o suporte para celular que foi selecionado como o segundo bem de consumo, que apresenta função distinta do primeiro – garrafa PET, neste estudo de caso.

O suporte para celular foi escolhido como o objeto de segunda função, pois seria um objeto funcional, de bem de consumo, e de baixa complexidade para ser impresso dentro das condições que este estudo se encaixa, de caráter experimental e exploratório de viabilidade desta via de reciclagem e revalorização secundária de maior valor agregado. Assim, poderia ter sua fase de uso caracterizada facilmente, e poderia ser de fato impresso como objeto de interesseem uma impressora 3D, sendo passível de personalização para utilização individual, por exemplo, proporcionando um maior caráter de realidade a este estudo de ACV.

Por conta da produção de filamentos para Manufatura Aditiva com resina de PET reciclado ainda não estar totalmente estabelecido foi almejado aqui neste trabalho analisar uma nova rota, a partir da reciclagem no cenário brasileiro como apresentado anteriormente. O primeiro trabalho encontrado na literatura que teve por finalidade produzir filamentos de PET reciclado data do ano de 2018, ou seja, o emprego deste material ainda é bastante recente como matéria-prima em impressoras 3D. Dessa forma, ainda não são facilmente encontrados os parâmetros para produção e impressão com esse polímero reciclado, somadas ainda às limitações inerentes a este material em contraposição aos outros materiais que usualmente são empregados, como ABS, PLA ou PETG, sendo discutidas nas seções seguintes. Nesse sentido, o intuito foi de realizar testes experimentais para também estabelecer e otimizara rota de processamento para a condição brasileira e, portanto, a seleção dos parâmetros foipautada em trabalhos encontrados na literatura e adaptada quando necessário (CRUZ SANCHEZ et al., 2020; FERREIRA, 2020; MIKULA et al., 2020; SANTANA et al., 2018; SCHNEEVOGT et

al., 2021; ZANDER, 2019; ZANDER et al., 2018).

Secagem do Material

A secagem do material ocorreu em dois momentos, em estufa da marca Tecnal TE – 394/1, com renovação e circulação de ar. A primeira secagem ocorreu a 120°C por 12 horas, em etapa anterior ao processamento por extrusão. A segunda secagem ocorreu com o material pós processado na extrusora, ou seja, já no formato de filamentos a 70° por 1h. A temperatura foi considerada menor neste caso, pois não haveria a necessidade de secagem acima da Tg do PET, condição necessária na primeira situação, parâmetro também em acordo com trabalhos anteriores. Essa segunda é necessária, pois o resfriamento do material se dá na saída da extrusora a úmido, como será descrito na etapa em seguida. Portanto, antes de ser encaminhado para a impressão necessita ser novamente seco, eliminando assim o excesso de umidade para não comprometer a qualidade do material a ser impresso.

Isso ocorre porque o PET tem a característica de ser higroscópico e hidrolítico, ou seja, tem a tendência de absorver moléculas em sua estrutura e a sofrer quebra em suas cadeias poliméricas em temperatura elevada caso as moléculas de água ainda estejam presentes, por reações de hidrólise. Assim, a presença de água pode influenciar seu desempenho mecânico, tornando-o quebradiço e comprometendo suas propriedades. Essa etapa é fundamental para desenvolvimento do filamento reciclável para a impressão 3D e da obtenção de produtos com qualidade adequada. Durante essa etapa o único consumo associado se dá em termos de energia elétrica necessárias no funcionamento da estufa, que se convertem em energia térmica para a secagem.

Produção do Filamento

Os filamentos foram produzidos em uma mini-extrusora dupla rosca corrotante da marca Ax plásticos com relação L/D (comprimento por diâmetro) de 40, sistema de refrigeração por ar e sistema de vácuo e refrigeração à água. O sistema de produção é integrado de modo que a extrusora, o sistema de refrigeração e o bobinamento dos filamentos foram considerados de forma conjunta ao seu consumo elétrico para análise de desempenho ambiental. Dado que a extrusora possui 8 zonas de aquecimento, o material foi extrudado em diferentes temperaturas.

Inicialmente realizou-se um teste preliminar para verificar qual seria a faixa de processamento mais adequado para processar o material. Sendo assim, as temperaturas que mais se adequaram no processamento foram 155°, 215°, 230°, 235°, 235° 240°, 240° e 210° C. Temperaturas maiores foram testadas, porém o material não conseguia ser conformado em filamento, logo que “pingava” na saída do bico da extrusora. Nesse sentido, temperaturas menores em relação a Tm de fusão do PET tiveram que ser empregadas, possibilitando assim a boa conformação em filamentos, adequados para serem utilizados em impressoras 3D. A velocidade de alimentação na rosca foi de 8 rpm, enquanto a velocidade da rosca foi de 28 rpm.

O conjunto de equipamentos empregados na produção dos filamentos apresenta-se na Figura 13A. Durante o processamento na extrusora, borras são geradas como resíduo dessa etapa e foram coletadas, pesadas e contabilizadas para posterior análise. Um banho de água é utilizado na saída do bico da extrusora. O volume de água empregado acaba sendo utilizado apenas a fim de recirculação, a reposição não é feita de maneira recorrente, ocorre apenas após a evaporação de volume recirculante. Embora, as emissões de vapor de água para a atmosfera possam ser consideradas insignificantes, elas foram contabilizadas como integrantes desta etapa do processo.

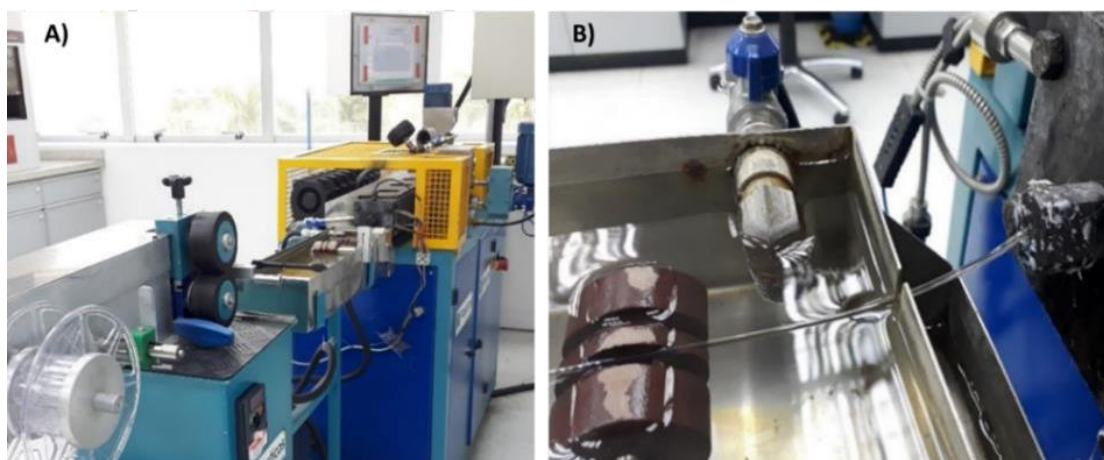


Figura 13. A) Conjunto de equipamentos utilizados na produção dos filamentos: extrusora, sistema de resfriamento e bobinador ; B) Saída do filamento de PET reciclado do bico da extrusora

Na Figura 13B é possível observar o material sendo produzido na saída do bico da extrusora e sendo resfriado no banho. É possível observar também que o material apresenta boa aparência e uniformidade em sua espessura, condição importante para formação do filamento e para a impressão 3D, indicando que o houve um bom processamento na extrusora. A Figura 14A ilustra a resina obtida da primeira etapa na empresa de reciclagem; na Figura 14B o material gerado foi bobinado em carretéis próprios para impressão 3D, com diâmetro de filamento $1,74 \pm 0,5$ mm (Figura 14C), medida obtida através de um paquímetro.



Figura 14. A) Resina PET PCR; B) Carretel de filamentos produzidos C) Filamento utilizado na impressora 3D

Manufatura Aditiva

A impressora 3D utilizada neste estudo é do tipo FDM, na marca GTMAX 3D core AB400, com uma única cabeça de impressão e mesa aquecida, capaz de imprimir peças de até 40x40x40cm. A temperatura de impressão foi de 255-265° C com temperatura de mesa de 70°C. O suporte para telefone celular produzido como bem de consumo secundário através da Manufatura Aditiva, para caracterizar este estudo em termos de desempenho ambiental, técnico e de circularidade, pode ser visualizado na Figura 15. A Figura 16 retrata o filamento produzido de PET reciclado sendo utilizado na impressão.

Em termos de consumos e emissões referentes a essa etapa, contabiliza-se apenas o filamento de PET reciclado e energia elétrica necessária para o funcionamento da impressora. Os resíduos gerados durante a impressão contabilizaram cerca de 5% de massa em relação ao produto gerado e foram considerados. Esse resíduo decorre principalmente do filamento que eventualmente acaba entupindo o bico da extrusora, pois se solidificava na ponta e impede o filamento de fluir durante a impressão, necessitando ser removido. Um cuidado, nesse sentido, é manter o bico de extrusão sempre aquecido, para evitar que o material se solidifique durante a impressão.



Figura 15. Suporte para celular produzido através da Manufatura Aditiva

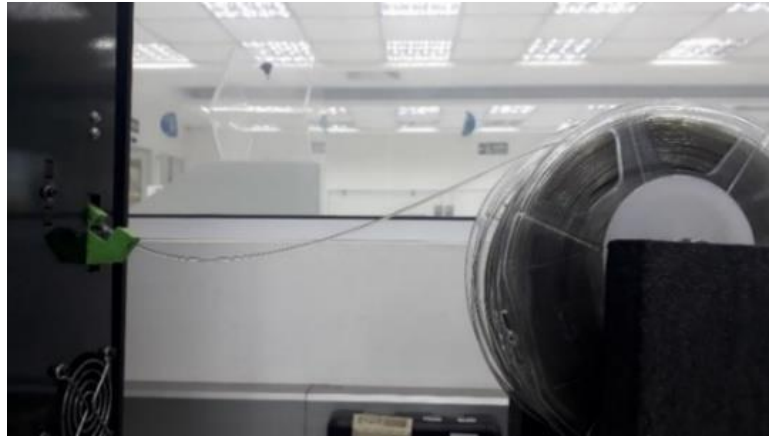


Figura 16. Filamento de PET reciclado sendo utilizado na impressora 3D

No geral, durante uma impressão 3D os parâmetros necessários acabam sendo numerosos. Além de temperatura do bico da impressora e da mesa de impressão, também devem ser ajustados durante a programação em *softwares* que convertem a estrutura 3D gerada em linguagem G-code, velocidades de impressão, altura da camada de deposição, necessidade de suportes, entre outros. Dados em respeito a estes parâmetros de impressão com filamentos de PET reciclado não foram disponibilizados em relação aos poucos estudos que empregaram esse material e estão disponíveis na literatura. Soma-se ainda que as condições acabam sendo bastante variáveis para cada tipo de impressora e para cada filamento gerado. Portanto, não é viável se basear plenamente nesses dados, é necessário realizar testes exploratórios nesse âmbito, para encontrar condições básicas de impressão, como ocorreu neste estudo na forma de testes preliminares.

Como forma de realizar ensaios mecânicos de tração de modo a aferir a qualidade e as propriedades mecânicas do material gerado, foram impressos também corpos de prova conforme a norma ASTM D638-14, cuja forma e dimensões podem ser vistas na Figura 17.

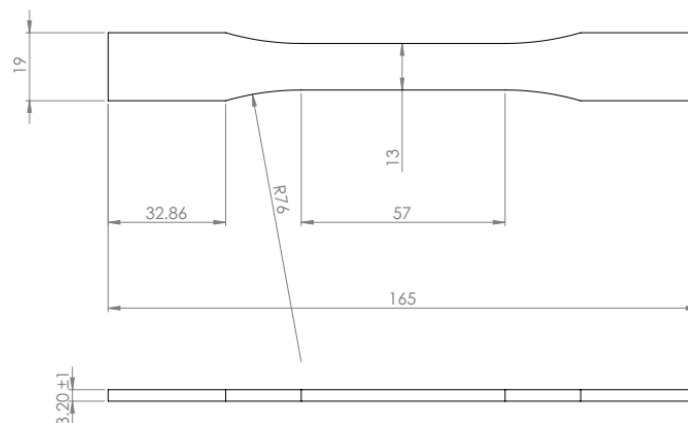


Figura 17 - Peça utilizada para impressão e ensaios de teste de tração mecânica

Fonte: ASTM (2014)

A Tabela 1 resume os principais parâmetros empregados durante a impressão dos corpos de prova, que teve o intuito de simular as mesmas condições nas quais o suporte para telefone celular havia sido impresso. Desse modo, poderia avaliar sua qualidade final. Portanto, estes corpos de prova apresentaram os mesmos parâmetros de impressão do que o produto suporte de celular.

Tabela 1. Principais parâmetros de impressão dos corpos de prova

Parâmetros de impressão	Valor
Altura da camada (mm)	0,30
Preenchimento (%)	100
Velocidade de impressão (mm/s)	60

(vii) *Processos envolvidos durante a disposição final*

No Brasil, a maior parte dos RSU coletados segue para disposição em aterros sanitários (ABRELPE, 2020). Por esta razão este estudo levou em consideração como destinação final aterro sanitários para realização do descarte final do produto secundário - o suporte para telefone celular, após ter sua função cumprida, em um período estimado de no mínimo 1 ano. Sendo assim, os operativos e as principais emissões para essa alternativa são brevemente explorados em seguida, levando em conta a base de dados do *Ecoinvent*. O aterro sanitário utilizado para modelar os dados relativos à distância de transporte dos rejeitos gerados, tanto na empresa de reciclagem do PET (em referência ao rejeito gerado na etapa de Moagem) comona empresa produtora do bem de consumo (na forma de rejeitos gerados durante o processo de produção), foi o de Paulínia- SP. Este aterro foi escolhido por conta da proximidade entre as duas localidades nas quais as empresas se encontravam.

Os aterros sanitários são concebidos para receber todo o tipo de resíduos: resíduos de limpeza pública e domésticos não tratados. O projeto do aterro deve incluir vedação de base e limite, um sistema de dreno de água da chuva, coleta de chorume e um sistema de coleta de gás devido à natureza biologicamente reativa dos resíduos. A restauração do aterro e um período de monitoramento pós-fechamento é obrigatória. As emissões para o ar e para a água dos aterros sanitários podem ser separadas em emissões indiretas e emissões diretas. As emissões indiretas ocorrem a partir da produção de materiais e combustíveis usados. As emissões diretas podem ser divididas em emissões de operações de aterros, como transportes, espalhamento de resíduos e conformação de aterros, bem como de emissões que se originam do próprio resíduo (DOKA, 2009).

As emissões dos rejeitos são geralmente o ônus mais importante dentro da LCIA resultante de um aterro. Condicionada a composição do rejeito, bem como, de sua reatividade e degradabilidade, ocorre a transferência da sua decomposição na forma de gás de aterro e a saída de água do aterro (lixiviado ou chorume). Para rejeitos reativos em um aterro sanitário a produção de gás pode ocorrer até várias décadas. O lixiviado pode conter quantidades significativas de poluentes lavados do material residual em aterros sanitários. A dinâmica temporal dessas emissões é difícil de prever em intervalos de tempo tão longos, mas são governados parâmetros como valor de pH e potencial redox no corpo do aterro, bem como a composição química, especiação química e mineralogia dos resíduos. Normalmente, os aterros desenvolvem um nível de emissão quase estável após uma fase inicial. Durante essa fase, as emissões podem ser altas e precisam ser monitoradas (DOKA, 2009).

Nesse sentido, os bancos de dados utilizado para compor e descrever a tecnologia de disposição final de aterro sanitários faz menção às emissões de curto prazo específicas de resíduos para o ar através do lixiviado de aterro, encargos do tratamento de lixiviados de curto prazo (0 – 100 anos) na estação de tratamento de águas residuais (incluindo descarte de lodo de ETE), tal como emissões de longo prazo do aterro para as águas subterrâneas (após a falha do revestimento de base).

4.2 MODELAGEM AMBIENTAL

Essa seção expõe de forma detalhada e discute as bases da modelagem e análise de desempenho ambiental, que foi conduzida e organizada segundo os preceitos das normas ABNT ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e 14044 (ABNT, 2009b). O espectro de abrangência do presente estudo compreendeu uma abordagem do tipo ‘berço-ao-túmulo’, na qual todos os aspectos relativos ao ciclo de vida são analisados. Assim, uma ACV completa foi conduzida, na qual as quatro fases do estudo de ciclo vida são exploradas, partindo de uma abordagem do tipo Atribucional e Consequencial, como se detalhado nos tópicos a seguir.

Como ferramenta computacional, tanto para cálculos quanto para consultas a banco de dados e relativos a modelagem e análise de desempenho ambiental, empregou-se o software *SimaPro v.9.3*. Planilhas de cálculo foram criadas, para compilação dos dados primários.

(i) Definição do sistema de produto

O sistema de produto considerado no presente estudo está representado genericamente pela Figura 5. A fim de proporcionar um melhor entendimento da correlação entre os ciclos de vida dos dois produtos, foi realizada uma divisão do arranjo nos chamados sistema 1 e sistema

2. O sistema 1 inclui os processos relacionados ao produto 1 – garrafas de PET, enquanto o sistema 2 arregimenta os processos de reciclagem do material equivalente a produção do produto 2 – suporte para telefone celular, com material proveniente da reciclagem do produto 1. Os processos elementares considerados e as respectivas legendas atribuídas na seção 3.2.4 e serão empregadas nas seguintes, dentro desta dimensão OLR foram seis: Fabricação do PET virgem (V1); Produção de garrafas PET (P1); Uso 1 da garrafa como recipiente de bebida (U1); Reciclagem do PET (R); Produção do suporte de telefone celular (P2); Uso 2 do suporte (U2); e, Disposição final em aterro sanitário (W2).

(ii) Função do produto secundário

O produto escolhido como bem de consumo secundário foi um suporte para telefone celular. Como pormenorização desta função, pode-se dizer que como resultado da transformação digital, muitas pessoas trabalham ou lidam diariamente com celulares por elevado período, como participar de reuniões, gravar vídeos, fazer chamadas, realizar vendas, assistir aulas etc. Nesse sentido, um suporte para esse aparelho pode ser necessário para deixar as mãos livres, fornecer apoio tanto na vertical, como horizontal e poder carregar o aparelho na tomada de forma mais prática, promovendo assim, conforto e bem-estar.

(iii) Unidade funcional e Fluxo de referência

A Unidade funcional deste estudo compreende “produzir 01 (uma) unidade de suporte para telefone celular, com a capacidade atender a essa função pelo período estimado de 1 ano”. Sendo assim, para a transformação dos dados obtidos durante a realização deste trabalho na base mássica foi necessário determinar a massa de uma peça de suporte para celular através da impressão 3D (MA). A massa média obtida a partir da impressão foi de 30,12 g.

O fluxo de referência necessário seria, portanto, a massa necessária para obtenção de 1 peça, conforme esse valor mássico. Foi estabelecida uma quantidade para o bem de consumo primário de 3 garrafas (600 ml) com massa equivalente a 80,62g (SRD, 2014) para modelar o sistema de reciclagem em ciclo aberto de outro produto, ou seja, essa quantidade seria necessária, não faltando material, para produzir o suporte do celular considerando todas as perdas envolvidas ao longo do ciclo de vida analisado. Nesse sentido, a lógica analisada prevê produção dos dois bens de consumo, sendo as garrafas os precursores para produção do suporte para celular de filamento de PET reciclado via MA, sendo, portanto, o objeto motivador deste estudo.

(iv) Considerações sobre tipo e qualidade dos dados

Os dados empregados neste trabalho foram obtidos predominantemente através de fonte primária a partir da colaboração de duas empresas localizadas no interior do estado de São Paulo. Primeiramente, a etapa de reciclagem (R) que descreve o sistema OLR expressa-se através de uma empresa recicladora de plástico PET grau garrafa, cuja qual forneceu os dados da produção, consumos, emissões, e descritivo sobre as operações envolvidas etc, Dessa forma, a primeira fonte de dados primários apresenta-se através desta recicladora, a segunda fonte de dados primários provém de outra empresa recicladora e transformadora de resíduos eletroeletrônicos e se refere a produção do bem de consumo (P2), assim como a etapa de uso (U2) deste produto. Por conta da motivação que a própria empresa apresenta de colaborar com pesquisas acadêmicas e desenvolver parcerias com Universidades e por se encaixar nos requisitos necessários para produção do bem de consumo que foi proposto, o que forneceria assim um maior caráter de realidade para o estudo, ela foi escolhida para explicitar este sistema.

As etapas anteriores referentes ao ciclo de vida inicial do polímero PET como extração de recursos (V1), produção do bem de consumo (P1), Coleta (R), assim como a etapa de descarte final (W2), foram obtidos através de dados secundários de bases de dados como *Ecoinvent*, ou através da literatura. A cobertura tecnológica consideradas para efeito da modelagem ambiental deste estudo encontra-se descritas e especificadas nas seções 4.1 deste documento.

A cobertura temporal estabelecida para o estudo correspondeu a meses típicos ao ano de 2020 e 2021. Quanto ao aspecto regional, as duas empresas estão instaladas no estado de São Paulo, embora os resíduos provenientes das garrafas que foram transportados e serviram como entrada na empresa recicladora provêm em sua maioria de outros estados da região Sudeste, e outras regiões do país, como o Norte e Nordeste. Por conta disso, ampliou-se a cobertura geográfica para o território brasileiro de maneira que a geração e o transporte de eletricidade entre outras utilidades consumidas por esse sistema de produto foram modelados a partir de dados médios para o país, coletados do Balanço Energético Nacional de 2021 (ano base 2020) (EPE, 2021).

(v) *Inventário de Ciclo de Vida (ICV)*

O sistema de produto em questão foi composto por apoio de inventários originais coletados junto à base de dados *Ecoinvent* que foram adaptados para as condições nas quais ocorre o estudo. Como exemplos de uso dessa prática os ICVs de geração e transporte de energia elétrica, processamento de gás natural (GN), gás liquefeito de petróleo (GLP), água e outros insumos necessários aos processos.

Tabela 2. Matriz elétrica brasileira com contribuições discriminadas por fonte de geração

Fonte	Participação relativa (%)
Hidroelétrica	65
Biomassa	9,1
Eólica	8,8
Gás Natural	8,3
Carvão e derivados	3,1
Nuclear	2,2
Derivados de petróleo	1,6
Solar	1,6

Fonte: EPE 2021

O ICV de geração de energia elétrica (Grid BR) foi editado a partir do conjunto de dados ‘Electricity high voltage {BR}production mix | APOS,U’ de Ecoinvent para as condições brasileiras, modelados via dados médios para o país, coletados do Balanço Energético Nacional de 2021 (ano base 2020) (EPE, 2021). Os valores em questão, estão descritos na Tabela 2. O modelo utilizado para descrever a produção de água consumida no processo originou-se do conjunto de dados ‘Tap water BR| tap water production, conventional treatment| APOS,U’, que também integra a base de dados Ecoinvent.

O gás natural consumido para suprimento de energia térmica nas diferentes unidades que integram os processos na empresa recicladora de PET, teve seu inventário descrito por meio de modelos elaborados para retratar extrações do recurso ocorridas em campos gasíferos *offshore* localizados no litoral brasileiro, e *onshore* nesse caso, em território boliviano. Essa descrição foi elaborada a partir do estudo de Maciel (2018). A customização do GLP, água e outros químicos foi baseada nas condições nacionais mais recentes, obtidas através de relatórios.

Os ICVs utilizados para descrever as etapas que englobam o sistema 1 e a ‘Coleta’, pertencente ao sistema 2, foram editados a partir dos seguintes bancos de dados: ‘Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade {BR}| production | APOS,U’; ‘Stretch blow moulding {BR}| stretch blow moulding | APOS,U’; ‘Waste polyethylene terephthalate, for recycling, sorted {BR}| treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling, unsorted, sorting | APOS,U’. Por fim, para a abordagem Consequencial, como recurso de modelagem foi realizada a substituição de todas as correntes que haviam sido previamente caracterizadas para a abordagem Atribucional na configuração Apos, U para correntes do tipo Conseq, U. O anexo A.1 apresenta maiores detalhamentos dos ICVs importantes dos conjuntos criados para descrever os sistemas que compreendem a lógica OLR pela abordagem Atribucional. O anexo A.2 apresenta o ICVs para a abordagem consequencial. Os dados do anexo, bem como seus

complementares, são apresentados na forma de fluxos elementares, a fim de resguardar a propriedade intelectual das empresas que forneceram os dados primários.

(vi) ***Tratamento de situações de Multifuncionalidade***

As situações de multifuncionalidade presente neste estudo como o compartilhamento das cargas ambientais em relação aos dois ciclos de produtos são abordadas por diferentes perspectivas de análise. Foram levados em conta argumentos de justiça e orientação a mudança para ilustrar como o emprego de diferentes métodos pode influenciar nos resultados e no processo de tomada a decisão. Nesse sentido, acredita-se ser essencial avaliações nesta natureza para poder fomentar práticas circulares mais robustas em termos de análises de diagnóstico ambiental.

A Tabela 3 apresenta os seis métodos estabelecidos por Baumann, H. & Tillman (2004), conforme apresentado na seção 3.2.4. que são utilizados para análise deste estudo de caso. Os quatro primeiros seguem a abordagem do tipo Atribucional de aplicação da ACV (ACVA). Os dois últimos seguem abordagem do tipo Consequencial de aplicação da ACV (ACVC). O Apêndice B, ilustra a modelagem metodológica para os processos elementares gerais que compreendem o presente estudo.

A Figura 18 expõe de forma mais discriminada os processos elementares que descrevem este estudo e como será organizada a comparação e discussão dos resultados deste estudo em termos da análise de diagnóstico ambiental. Na esquerda desta Figura é possível verificar os métodos que se enquadram na lógica de reciclagem em ciclo aberto, ao considerar a produção de dois bens de consumo de modo correlacionado. Enquanto a sua direita é compreendida a lógica sem reciclagem, ou seja, a produção destes dois bens de consumo de forma independente.

Tabela 3. Métodos para tratamento de situações multifuncionais para processos em OLR

Métodos	Métodos de tratamento de multifuncionalidades para processos em OLR	Abordagem
1	<i>Cut-off</i>	
2	Perda de Qualidade	
3	Rejeito como consequência da extração de recursos	Atribucional
4	Extração de recursos como consequência de não reciclagem	
5	Aproximação para reciclo fechado (CLR)	Consequencial
6	50/50	

A seguir são apresentadas de forma mais pormenorizada, como se dá a análise em termos de diagnóstico ambiental para o presente estudo para cada um destes métodos e algumas considerações relevantes para o entendimento geral.

1) Cut-Off: As cargas relativas ao sistema 1 na função primária não são levadas em conta, é realizado um ‘corte’, assim as cargas ambientais chegam ao sistema 2 zeradas. O desempenho ambiental associado ao suporte para celular passa, portanto, a ser medido a partir da coleta de garrafas PET usadas em sua fabricação (Figura 18 – 1a).

2) Perda de qualidade: Neste caso, o desempenho ambiental associado ao suporte de celular passa a ser medido a partir da produção de resina virgem PET (Figura 18 –1b). A distribuição de cargas ambientais nesse caso ocorre para as etapas comuns aos dois sistemas 1 e 2, isto é, produção de resina virgem de PET, reciclagem e destinação final. O critério empregado para alocação neste método foi o parâmetro de Viscosidade Intrínseca do material, pois pode refletir o ponto de fusão, cristalinidade e resistência à tração do material (Antoon Par). Este parâmetro é bastante usual para averiguar a qualidade do PET de forma comercial por indústrias. Nesse sentido, por esse critério apresentar menos volatilidade e incertezas inerentes do que o critério econômico, foi escolhido para representar a perda de qualidade para este estudo e ser o fator multiplicador das cargas ambientais comuns.

3) Rejeito como consequência da extração de recursos: A principal diferença para este método, como averigua-se pela Figura 18 – 1c, está na responsabilidade das cargas ambientais da destinação final, que nesta perspectiva cabe ao sistema 1, ou seja, o bem de consumo primário.

4) Extração de recursos como consequência de não reciclagem: Esta perspectiva vislumbra que as cargas ambientais da produção da resina virgem sejam atribuídas para o sistema 2, ou seja, o suporte de celular, e as cargas de Reciclagem sejam atribuídas para o sistema 1, ou seja, de Garrafa (Figura 18 – 1d).

5) Aproximação para reciclo fechado (CLR): Neste caso que leva em conta a abordagem Consequencial e, conseqüentemente expansão do sistema, as cargas ambientais comuns são distribuídas entre os dois sistemas, com base em uma lógica de sistema fechado (Figura 18 – 1e). Para este caso a proporção de distribuição desses dois sistemas escolhida foi de 70 % para o sistema 2, suporte de celular, e 30 % para o sistema 1, garrafas. Ou seja, em relação a etapa de reciclagem 70 % do material seria destinado para a produção do bem de consumo suporte de celular, que conseqüentemente necessitaria de 30 % de material virgem para completar sua quantidade necessária para desempenho da função, o oposto se observa para o bem de consumo Garrafa. Essa lógica também é empregada para as outras duas etapas comuns, a produção de resina virgem e a destinação final de forma a totalizar 100 %, em que uma compense a outra. Assim, a destinação final e a produção

da resina virgem seriam atribuídas na forma de 30 % para o sistema 2, e o percentual restante para o sistema 1.

6) 50 / 50: Esse caso a abordagem consequencial também é empregue de forma correlata ao método anterior, mas com a distribuição percentual igualitária das cargas ambientais comuns para os sistemas 1 e 2 (Figura 18 – 1f).

Sem reciclagem: Para efeitos de comparação com cenários onde não ocorreria a reciclagem integrada entre as garrafas e suporte de celular, ou seja, estes bens seriam produzidos, teriam sua função cumprida e seriam descartados sem que houvesse reciclagem. Nesse caso assumiu-se a disposição final em aterro sanitário para ambos os produtos (Figura 18). A modelagem da produção do suporte de celular com o fornecimento direto de resina de PET virgem não ocorreu na prática por meio de testes experimentais como ocorreu com a produção de resina reciclada. Por essa produção não estar dentro do escopo deste estudo de caracterizar o desempenho técnico, bem como a eficiência do material, como ocorre para o caso do material reciclado, esse comparativo ocorreu apenas para efeitos do diagnóstico ambiental. Assumiu-se, portanto, que as resinas virgens poderiam produzir de forma análoga o suporte de celular via Manufatura Aditiva e ter sua função cumprida da mesma maneira. As cargas ambientais destes dois casos serão somadas para fins comparativos com a lógica OLR para todos os métodos, excetuando-se o método Cut-Off que terá sua comparação realizada apenas com o sistema de produto de produção do suporte de celular.

(1) Com reciclagem em ciclo aberto

(2) Sem reciclagem

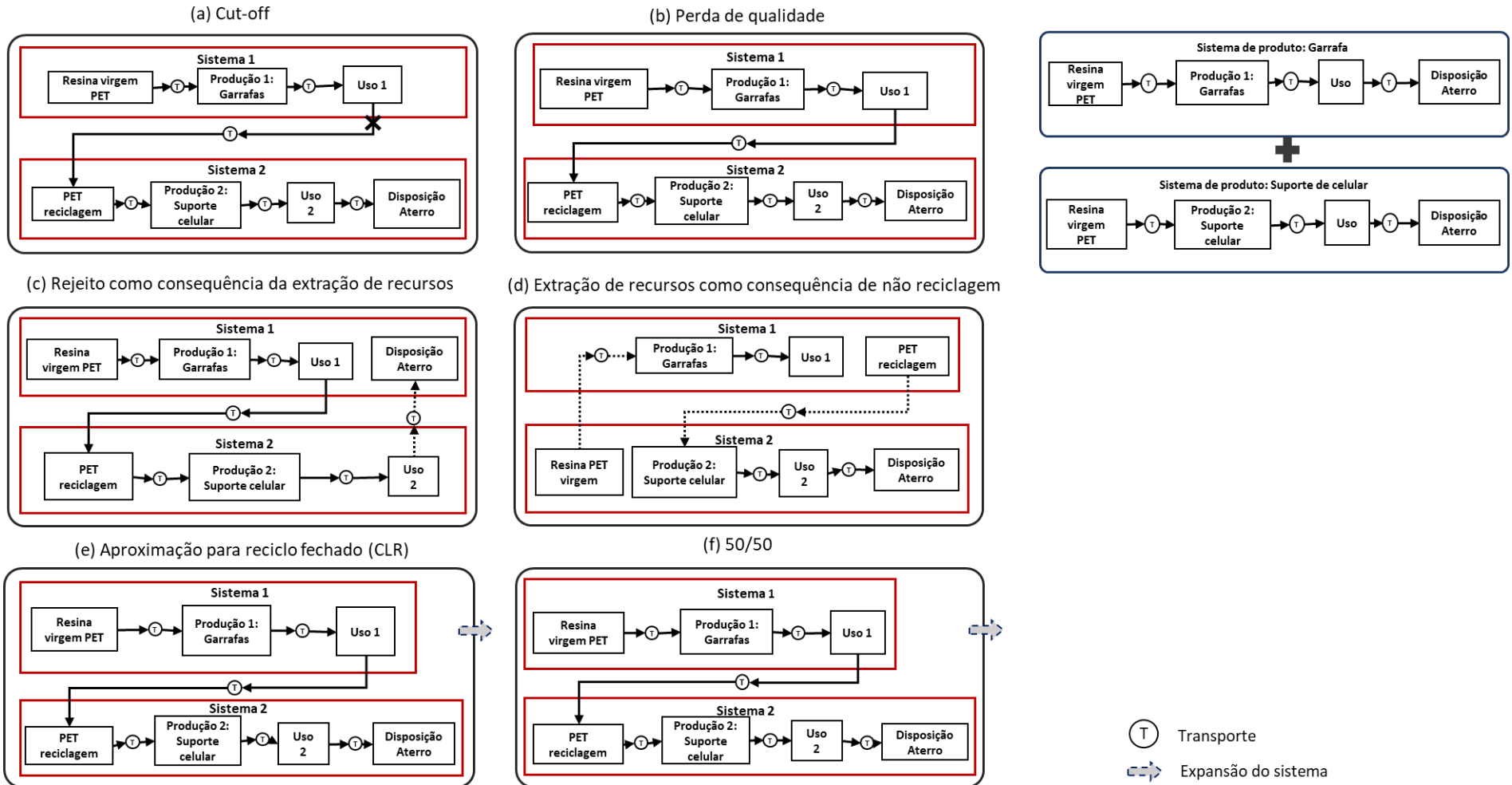


Figura 18 – À esquerda processos elementares que descrevem o sistema do produto através do arranjo OLR, para a produção dos bens de consumo Garrafa e suporte de celular, pelos seis métodos de tratamento de situações de multifuncionalidade. À direita processos elementares que descrevem os sistemas de produto através do arranjo sem levar em conta reciclagem na produção dos bens de consumo Garrafa e suporte de celular.

É importante mencionar que comparações em termos de diagnóstico ambiental serão feitas sempre entre os cenários com reciclagem com aqueles sem reciclagem. Como as abordagens atribucionais e consequenciais têm caráter de modelagem distinto, a comparação entre os métodos de uma abordagem e os cenários sem reciclagem de outra abordagem não é apropriada. Logo, foram compostos cenários sem reciclagem levando em conta as duas abordagens de forma desvinculada. Além disso, é necessário entender que não cabe a comparação entre cada um dos métodos, pois eles analisarão o mesmo estudo de caso, porém seguindo perspectivas metodológicas distintas de considerar a reciclagem em ciclo aberto.

Outra consideração relevante, diz respeito ao processo de reciclagem em si que também pode ser considerado uma situação de multifuncionalidade, por apresentar múltiplas saídas. São elas: (i) o produto principal (resina reciclada de PET PCR); e, (ii) quatro subprodutos referentes as etapas que acontecem na planta recicladora, ainda que em proporção de menos de 10% ao serem somados. Para esta situação o procedimento de Alocação foi empregado usando o critério físico de massa para os quatro casos de abordagem Atribucional, enquanto para os outros dois casos de abordagem Consequencial foram tratados mediante expansão do sistema.

Nesse sentido, foi realizada uma consulta com os diferentes clientes que realizam a compra dos subprodutos da empresa recicladora de PET, para averiguar qual seriam os mercados atendidos. Conforme informado, estes subprodutos apresentam finalidades diversas na forma de constituintes de cerdas de vassouras, multifilamentos para o setor de cordas, fitas de arquear e o setor de tintas. Porventura da limitação de disponibilidade de dados na base Ecoinvent, apenas este último segmento foi considerado para fins de expansão do sistema. À vista disso, o subproduto resultante apenas da etapa de Moagem (equivalente a pó de PET), foi empregado como parte do substituinte do anidrido ftálico, precursor na síntese da resina alquídica usada na produção de tintas alquídicas. Esta prática de substituição por material de fonte reciclado é considerada uma rota de interesse tecnológico e ambiental, pois considerar parte da substituição oriunda de processo de reciclagem reduz o uso de matéria-prima virgem, proveniente de fontes não renováveis (SPASOJEVIĆ, 2015; LORENZETTI, 2006).

(vii) Avaliações dos impactos ambientais

A avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) ocorreu a partir de duas perspectivas. Na primeira delas, o consumo de recursos energéticos foi quantificado em termos de Demanda de Energia Primária (*Primary Energy Demand*: PED) pelo método Cumulative Energy Demand (CED) v.1.09 (FRISCHKNECHT et al., 2015). O CED considera as contribuições das diferentes fontes de energia relacionadas ao sistema avaliado expressando-as como formas de recursos renováveis (Biomassa, RB; Eólico, RW; e Água, RWA) e não renováveis (Fóssil,

NRF; Nuclear, NRN; e Biomassa, NRB). Essa categoria quantifica a energia primária dispendida no atendimento de uma função, de modo a considerar toda forma energia direta e indireta usada para transformar recursos em insumos (ou bens de produção), e estes em produtos (bens de consumo). Nesse cálculo toda energia intrínseca dos recursos naturais é computada, tal como aquela usada na geração de utilidades, operações de transporte e cenários de disposição de rejeitos.

A segunda perspectiva considerada decorre das emissões regulares dos ciclos de vida de cada processo. As categorias de impacto potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential: GWP*), Acidificação terrestre (*Terrestrial Acidification: TAc*) e formação de material particulado fino (*Fine particulate matter formation: PMF*) foram selecionadas para verificar as consequências atmosféricas. Danos devido a perdas de água foram descritos como Escassez de água (*Water Scarcity: WS*) e contribuições de Ecotoxicidade de água doce (*Freshwater Ecotoxicity: FWET*). O GWP para cada rota foi quantificado usando o método do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) v1.03 para um período de 100 anos (IPCC, 2013). A TAc, PMF e FWET foram calculados pelo método ReCiPe2016 Midpoint (H) v. 1.01 (HUIJBREGTS et al., 2017). O WS foi calculado pelo método Boulay et al. (2011) que analisa a pegada hídrica, fundamental para entender onde a água está sendo usada em cada etapa do ciclo de vida. Este método é baseado no consumo até a disponibilidade (Consumption to availability ratio: CTA) para o cálculo das equações de escassez utilizadas. A escolha destes métodos em particular se pautou em estudos anteriores relacionadas a temática de reciclagem de PET e de processos produtivos via Manufatura Aditiva.

(viii) Procedimento para Normalização

A execução do procedimento de Normalização para apresentação dos resultados foi conduzida como forma de tornar os comparativos entre cada uma das categorias de impacto mais inteligível e ainda com o intuito de se obter um indicador único de diagnóstico ambiental. Um diagnóstico único ambiental busca verificar tendências que se instalam devido a integração das diferentes categorias de impacto ambiental avaliadas por um estudo de ACV. Com este propósito é necessário selecionar um cenário de referência para efeito de realização de estimativas. O cenário escolhido como base para efeito da normalização será sempre a rota sem reciclagem para produção de ambos os bens de consumo. É importante para tornar o comparativo mais justo e coerente na composição do indicador único que se faça uma distinção, o método *Cut-off* que parte da lógica OLR, mas considera apenas as cargas ambientais do sistema 2 e é normalizada com o cenário sem reciclagem que também o faz. Os outros métodos ACVA e aqueles ACVC tiveram como base a normalização a partir do cenário sem reciclagem que computa as cargas totais do sistema 1 e 2, conforme apresentado anteriormente. A partir disso, os desempenhos de todas as rotas analisadas pelo estudo partindo da consideração que

ocorra reciclagem, sempre dentro de uma mesma categoria de impacto, foram divididos por seu correspondente obtido pela rota sem reciclagem, gerando assim um Índice Ambiental Normalizado para cada categoria ($IAN^{(k)}$). Esse procedimento está descrito a partir da equação 1.

$$(IAN^k)_i := \frac{(DA^k)_i}{(DA^k)_{SR}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$(IAN^k)_i$: Índice Ambiental Normalizado para a categoria de impacto (k) para a rota (i);

$(DA^k)_i$: Valor do Impacto Ambiental (k) para a rota (i) com reciclagem;

$(DA^k)_{SR}$: Valor do Impacto Ambiental (k) para a rota sem reciclagem

Esgotada essa etapa, todos os valores de desempenho para uma mesma rota (que a partir da normalização passaram a ser resultados adimensionais) puderam então ser somado, gerando assim valores de Indicador Único (IU_i) para cada arranjo (equação Eq. 2)

$$IU_i = \sum IAN^k_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

(IU_i) : Indicador Único para a rota em análise (i)

Apenas para facilitar a visualização dos resultados gerados na forma do Indicador Único (IU) empregou-se um procedimento adicional ao processo de elaboração do índice. Este consiste em outra normalização, e irá resultar no parâmetro definido Indicador Único Normalizado (IUN_i). Para que isso ocorresse adotou-se mais uma vez o valor de IU para a rota sem reciclagem como referência. A equação (Eq. 3) ilustra essa operação

$$IUN_i = \frac{IU_i}{IU_{SR}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

(IUN_i) : Indicador Único Normalizado para a rota (i);

(IU_i) : Indicador Único para a rota (i);

(IU_{SR}) : Indicador Único para a rota sem reciclagem.

4.4 CONSIDERAÇÕES PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉCNICO

Como forma de avaliar as propriedades térmicas, de viscosidade intrínseca e mecânicas do filamento produzido a partir da resina de PET reciclada, que serviu como matéria-prima para a Manufatura Aditiva, assim como dos corpos de prova impressos através dessa tecnologia, caracterizações do material foram realizadas a fim de fundamentar o desempenho técnico. Outra razão desta análise se relaciona ao intuito de garantir o cumprimento da função proposta de suporte para telefone celular para os propósitos da condução da avaliação de desempenho ambiental, por meio da técnica de ACV.

Análises Térmicas

Com o intuito de avaliar as degradações que o material PET reciclado poderia sofrer durante o processo de produção do filamento e durante a impressão, foram conduzidas Análises Termogravimétricas (TGA) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), que foram também realizadas no laboratório da empresa (Sintronic). Uma vez que os dados disponíveis na literatura ainda são bastante escassos com este material para esta finalidade, tiveram que ser testadas diferentes temperaturas de secagem e processamento e ainda outros parâmetros na extrusora e na impressora 3D, desse modo avaliar o comportamento térmico deste material nestas condições é essencial.

(i) Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC

Em síntese, a análise de DSC pode ser definida como uma técnica capaz de medir as temperaturas e o fluxo de calor associado as transições dos materiais em função da temperatura e do tempo. Os eventos térmicos associados a esta análise são divididos em transições de primeira e segunda ordem. Os de primeira ordem apresentam variação de entalpia, sendo endotérmico ou exotérmico e dão origem a formação de picos na análise DSC, como exemplo a fusão temperatura (BANNACH et al., 2011). As de segunda ordem caracterizam-se pela variação da capacidade calorífica, porém sem variação de entalpia. Logo estas transições não geram picos, como exemplo pode-se citar transição vítrea e relaxações de tensões térmicas da cadeia polimérica (HÖHNE et al., 1996).

A análise DSC foi realizada com o equipamento Mettler Toledo DSC Gas Controller 200, Star System. Foram realizadas duas corridas nas amostras de PET reciclado na forma de *pellet*, filamento e corpo de prova, em cadinho de alumínio com fluxo de Nitrogênio de 50 mL/min. A primeira corrida teve razão de aquecimento de 20°C/min de 30 a 320°C, enquanto a segunda corrida teve razão de aquecimento de 10°C/min de 30 a 320°C. A primeira corrida teve por

finalidade eliminar a influência de processos de aquecimento/resfriamento que o material pode ter sido previamente submetido.

O cálculo do grau de cristalinidade (χ_c) da amostra é expresso em %, usando a equação (3) e a entalpia de fusão padrão do polímero 100% cristalino. A entalpia de fusão padrão para o PET 100% cristalino é de 140 J/g. (BRANDRUP et. al, 1980).

$$\chi_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H^\circ} \quad (\text{Eq. 4})$$

(ii) *Análise Termogravimétrica - TGA*

A análise termogravimétrica consiste, em suma, na avaliação da perda ou ganho de massa de um material submetido a um programa de aumento de temperatura (BANNACH et al., 2011). Esta análise permite conhecer os efeitos que o aquecimento pode provocar no material, possibilitando estabelecer a faixa de temperatura adequada para uso e com isso evitar degradações que poderiam ocorrer e com isso evitar falhas mecânicas, por exemplo (ZATTERA et al., 2005).

Foi utilizado o analisador termogravimétrico TGA 1 Mettler Toledo Star System. As amostras de massa foram analisadas em cadinho de Alumina, sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 250mL/min, operando com aquecimento de 20°/min da temperatura de 30 até 600° para amostras de PET reciclado na forma de *pellet*, filamento e corpo de prova.

Análise Viscosidade Intrínseca

O estudo reológico dos materiais, no estado fundido ou em solução, permite obter informações importantes a respeito das propriedades de resistência ao escoamento e deformação dos materiais, assim como a influência da massa molar. No caso dos polímeros, o tamanho de suas cadeias e o enovelamento entre elas causam muita fricção interna e resistência ao escoamento. Em particular para o PET, seja para material virgem e reciclado, a medida mais difundida para fornecer, ainda que indiretamente, a massa molar é a viscosidade intrínseca. Logo, esta análise se mostra mais adequada para sugerir o comportamento reológico deste material, na medida que este polímero é hidrolítico, principalmente em temperaturas próximas às do processamento do ensaio de índice de fluidez (outra técnica bastante empregada para esta caracterização reológica), podendo degradar durante o mesmo, fornecendo dificuldades experimentais e erros na medida (MANCINI et al., 2004).

Nesse sentido, como forma de caracterizar as propriedades reológicas do material obtido e avaliar como os diferentes processamentos durante a Manufatura Aditiva influenciaram seu comportamento e ponderar a degradação ocorrida foi realizado o teste de Viscosidade Intrínseca (IV). Essa análise foi conduzida para o material nas três etapas de processamento, isto é, para o *pellet* obtido da empresa recicladora, para o filamento produzido a partir do processamento por extrusão e para os corpos de prova que foram impressos através da tecnologia de impressão 3D, de forma triplicada para as últimas duas etapas. Essa análise foi conduzida conforme as diretrizes da norma ASTM D 4603 – 03, (em solução de fenol / 1,1,2,2-tetracloroetano (60/40 % m) a 30°C. Foi utilizado um viscosímetro de vidro do tipo Ubbelohde para líquidos transparentes, tamanho 1B, série 32660 e banho termostático para viscosidade cinemática modelo Q303SR26 Quimis. Esta análise ocorreu no laboratório de controle de qualidade da empresa recicladora (Global PET).

A obtenção da massa molar numérica média (M_n) foi obtida a partir dos resultados de IV, o cálculo de M_n ocorreu de acordo com a equação 20, de Berkowitz (BERKOWITZ, 1984). Segundo o autor, a validade da equação foi verificada para massas molares de 2000a 200000 g/mol, a partir de medidas de viscosidade intrínseca (condizentes às utilizadas nesse estudo).(MANCINI et al., 2004).

$$M_n = 3,29 \times 10^4 (\eta^{1,54}) \quad (5)$$

Análise mecânica

Teste de Tração

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados no laboratório da empresa Sintronics, em um equipamento Instron 3366 com capacidade de carga de 10 kN, com velocidade de 50 mm/min e com 1193 mm de comprimento útil do corpo de prova para teste por meio de procedimento baseado na norma ASTM D638-14. A partir dos ensaios realizados analisou-se o limite de resistência a tração (LRT) que mede a capacidade de um material suportar carga de alongamento até a sua ruptura. O LRT é dado dividindo a força perpendicular aplicada ao corpo de prova pela área da seção transversal do corpo de prova (ASTM, 2014). A unidade do limite de resistência a tração é dada em MPa. Além disso foram analisados os resultados de alongamento de ruptura, valor dado em porcentagem que mede o alongamento do material até a sua ruptura durante o teste e o modulo de elasticidade.

4.5 INDICADOR DE CIRCULARIDADE DOS MATERIAIS

Com o intuito de avaliar a circularidade do produto obtido por meio da rota de reciclagem em ciclo aberto descrita no item 4.1, o indicador MCI foi selecionado para essa finalidade. A seleção deste indicador se pauta pela consideração de ser um indicador que avalia apenas um produto e não uma família de produtos, é robusto no quesito do uso de material reciclado, trata do material quando em fim de vida e considera a eficiência do processo de reciclagem (EMF, 2015).

Este indicador se apresenta com valor único, que varia entre 0 e 1, sendo que este último indica uma maior circularidade. Para sua avaliação ele leva em conta os insumos do processo de produção, ao englobar o consumo de componentes virgens, reciclados e reutilizados como insumos durante os processos de produção. Outro quesito considerado é a longevidade e intensidade de uso do produto em comparação com a média do setor – isso explica a durabilidade do produto, bem como o reparo, a manutenção e o consumo compartilhado. É considerada ainda a eficiência da reciclagem em duas dimensões: do processo de reciclagem do material que foi usado como matéria prima no produto e a do processo de reciclagem desse material utilizado no produto após sua vida útil. E por fim, a destinação pós-uso, refletindo as porções que estariam dispostas em aterro sanitário, reutilizada ou reciclada (EMF, 2015). Além disso, considera as seguintes premissas:

- Não ocorre favorecimento explícito de ciclos fechados, ou seja, a matéria-prima reciclada não precisa ser proveniente do mesmo produto, assim como o material coletado para reciclagem não precisa retornar a produtos de mesma função e permite uso do material em outros sistemas;
- Ciclos biológicos não são considerados;

Em suma, o cálculo através do indicador MCI é baseado na combinação de equações que consideram a quantidade de material virgem usada (V), a quantidade de resíduos atribuídos ao produto (W) e o fator de utilidade do produto (X). A Tabela 4 apresenta os parâmetros envolvidos no cálculo, suas definições e coluna mais à direita explicita de forma agrupada como serão obtidos os dados para análise no presente estudo. Enquanto a Tabela 5 exhibe o conjunto de equações empregadas para o cálculo deste indicador juntamente com comentários.

Tabela 4. Parâmetros a serem utilizados no cálculo do MCI

Parâmetros	Unidade de medida	Definição	Forma de obtenção dos dados
M	kg	Massa do produto	Experimentalmente
Fr	%	Porcentagem de matéria-prima de fontes recicladas no produto	Calculado
Fu	%	Porcentagem de matéria-prima de fontes de reuso no produto	-
Fs	%	Porcentagem de matéria-prima de fontes biológicas	-
V	kg	Massa de matéria-prima virgem usada no produto	Calculado
Cc	%	Porcentagem do produto coletada e destinada à compostagem	-
Ce	%	Porcentagem do produto coletada e destinada à recuperação de energia	-
Cr	%	Porcentagem do produto coletada e destinada à reciclagem	Estimado
Cu	%	Porcentagem do produto destinada à reutilização	-
Ec	%	Eficiência do processo de reciclagem do material que foi utilizado no produto que quando em fim de vida, foi destinado à reciclagem	Estimado
Ee	%	Eficiência do processo de recuperação de energia	-
Ef	%	Eficiência do processo de fabricação da matéria-prima reciclada para ser utilizada no produto	Experimentalmente
L	anos	Vida útil média real do produto	Estimado
Lav	anos	Vida útil média real de produtos de mesma função	Estimado
U	quantidade	Número médio real de unidades funcionais atingidas durante o uso do produto	Estimado
Uav	quantidade	Número médio real de unidades funcionais obtidas durante o uso do produto médio de mesma função	Estimado
W	kg	Massa de resíduos irre recuperáveis associados ao produto	Calculado
W0	kg	Massa de resíduos irre recuperáveis associados ao produto que vão para aterros, geração de energia ou outro tipo de processo no qual o material não é recuperável	Calculado
Wc	kg	Massa de resíduos irre recuperáveis gerados no processo de reciclagem de partes do produto	Calculado
Wf	kg	Massa de resíduos irre recuperáveis gerados na produção de matéria-prima reciclada para o produto	Calculado
LFI	-	Índice de linearidade	Calculado
X	-	Utilidade do produto	Calculado
F(X)	-	Fator de utilidade em função da utilidade X do produto	Calculado
MCI _p	-	Indicador de Circularidade do Material de um produto	Calculado

Fonte: Adaptada de EMF (2015)

Tabela 5. Equações e comentários relacionados ao cálculo do MCI

Equação	Comentário
<p>1 $V = M \times (1 - F_R - F_U - F_S)$</p>	<p>A fim de obter a quantidade de material virgem usada no produto é necessário saber a porcentagem de material de origem reciclado, de reuso ou biológico.</p>
<p>2 $W_O = M \times (1 - C_R - C_U - C_C - C_E)$</p>	<p>Para obter a quantidade de resíduos irrecuperáveis associados ao produto leva-se em conta a porcentagem de material coletada e destinada à reciclagem, reuso, compostagem ou recuperação energética.</p>
<p>3 $W_C = M \times C_R (1 - E_C)$</p>	<p>Para o cálculo da quantidade específica aos resíduos irrecuperáveis do processo de reciclagem, é necessário porcentagem de material coletado e destinado a reciclagem e a eficiência do processo de reciclagem do material que foi utilizado no produto e que, quando em fim de vida, destinou-se à reciclagem.</p>
<p>4 $W_F = M \times \frac{FR(1-EF)}{EF}$</p>	<p>O cálculo de resíduos irrecuperáveis associados ao processo de fabricação da matéria prima reciclada utilizada no produto necessita da porcentagem de material de origem reciclada e a eficiência do processo de fabricação da matéria-prima reciclada</p>
<p>5 $W = W_O + \frac{(W_C + W_F)}{2}$</p>	<p>A massa de resíduos irrecuperáveis é composta pelos indicadores de resíduos irrecuperáveis associados ao produto, da fabricação da matéria prima reciclada utilizada no produto e do processo de reciclagem deste produto em seu fim de vida</p>
<p>6 $LFI = \frac{V+W}{2 \times M + \frac{WF-WC}{2}}$</p>	<p>O cálculo do Indicador de Fluxo Linear (LFI, em inglês) associado ao produto é composto pelos parâmetros obtidos pelas equações anteriores. Este índice é um valor entre 0 e 1, no qual 1 representa que o fluxo é completamente linear e 0 que o fluxo é completamente restaurativo, circular.</p>
<p>7 $X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \times \left(\frac{U}{U_{av}}\right)$</p>	<p>A utilidade do produto para ser obtida leva em conta sua vida útil (L), a vida útil de produtos de mesma categoria (L_{av}), a quantidade de funcionalidades do produto (U) e a quantidade de funcionalidades dos produtos de mesma categoria (U_{av}).</p>
<p>8 $F(X) = \frac{0,9}{X}$</p>	<p>O valor de 0,9 é uma constante pré-estabelecida por EMF (2015) pela qual o valor de X é dividido a fim de encontrar o Fator de utilidade F(x) do produto</p>
<p>9 $MCI = 1 - LFI \times F(X)$</p>	<p>O Indicador de Circularidade dos materiais é calculado por meio do Indicador de Fluxo Linear e do Fator de utilidade</p>

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉCNICO

Análises Térmicas

Os resultados obtidos através das caracterizações das amostras nas diferentes etapas de processamento por DSC e TGA podem ser vistos na Figura 19, que demonstra o comportamento térmico do material na forma de *pellets*, filamento e o corpo de prova impresso através da tecnologia 3D.

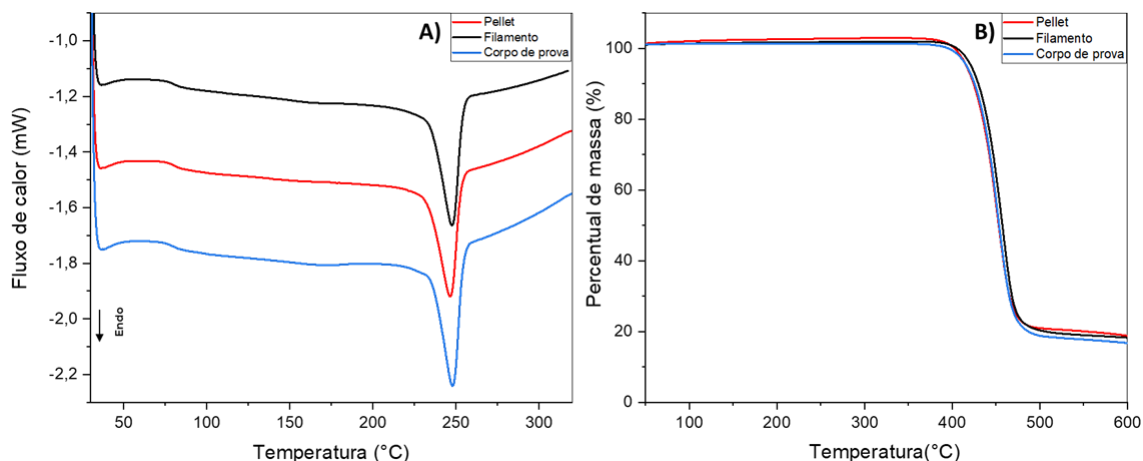


Figura 19. A) Curvas de calorimetria de varredura diferencial B) Curvas da análise termogravimétrica

A respeito da análise por meio da técnica de DSC através da análise do segundo aquecimento, por meio do gráfico da Figura 19A e Tabela 6, notam-se curvas bastante similares, assim como os parâmetros referentes a Temperatura de transição vítrea (T_g) para as três amostras, com uma faixa de 86 – 88° C; a Temperatura de fusão (T_m) na faixa de 246 – 248° C e, entalpia de fusão do material (ΔH_f) na faixa de 48 – 56 J/g.

A partir das entalpias analisadas, o grau de cristalinidade do polímero PET foi obtido para as três amostras. As diferenças observadas de temperatura e cristalinidade variaram de forma pouco expressiva, embora tenha ocorrido a diminuição de massa molar entre os processamentos que ocorreram de modo subsequente como se ve no item a seguir, indicam uma boa estabilidade térmica do material frente aos diferentes processamentos.

Tabela 6. Propriedades térmicas do material analisado nas diferentes condições de processamento

Material	T_g (°C)	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	%Xc
Pellet	86,0	246	55,4	39,6
Filamento	87,1	247	48,2	34,4
Corpo de prova	87,7	248	50,1	35,8

A título de comparação, a Tabela 7 remete dois trabalhos que avaliaram as propriedades de filamento de PET reciclado pós-consumo a respeito de suas propriedades térmicas analisadas através da técnica DSC. O primeiro estudo de Ferreira (2020) considera a forma *flakes* para produção dos filamentos, ao passo que Zander et al., (2018) considera a forma *pellets*, de modo análogo ao presente estudo. Dessa forma, os valores obtidos nestes trabalhos estão, de um modo geral, coerentes com os aqui desenvolvidos, e ainda se observa uma variação de 19% a 28% maior de cristalização em relação ao menor valor do material desenvolvido no presente trabalho.

Tabela 7. Propriedades térmicas do PET reciclado analisado na literatura

Material	Tg (°C)	Tm (°C)	ΔH_f (J/g)	%Xc
Filamento *	70,7	248	39,1	27,9
Filamento **	80,6	250	47,1	24,9

Fonte: * Ferreira (2020) **Zander et al., (2018).

A respeito das análises Termogravimétricas através da Figura 19B e Tabela 8, observa-se que as amostras apresentam curvas quase superpostas com um único evento de perda, indicando a presença de apenas um tipo de polímero na amostra e a ausência de contaminantes voláteis em quantidades importantes. O início da degradação para as amostras do PET nas três condições, na forma de *pellets*, filamentos e corpos de prova impressos ocorre na faixa de 391 – 395° C (considerado neste estudo como a temperatura de *onset*) e é completado na faixa de 480 – 495° C. Nota-se ainda uma estabilidade térmica ligeiramente maior para as amostras na forma de filamentos e na forma de corpo de prova. As amostras apresentaram massa residual na faixa de 18 – 22%, indicando que alguns aditivos e/ou cargas inorgânicas poderiam estar presentes nos polímeros. Os valores obtidos foram concordantes também com os analisados para os filamentos de PET reciclado por ZANDER et al., (2018).

Tabela 8. Propriedades térmicas do material analisado em diferentes processamentos

Material	TGA		DTG
	T°C onset	% Massa residual	T°C
<i>Pellet</i>	391	21,2	481
Filamento	398	20,1	493
Corpo de prova	395	18,8	491

Nesse sentido, pode-se dizer, de modo geral, que as temperaturas empregadas durante a extrusão, para produção do filamento, que ocorreu na faixa de 230 - 245°C, e as temperaturas utilizadas durante a etapa de impressão para a produção dos objetos impressos, na faixa de 255 – 265°C, provavelmente não causaram degradação térmica significativa ao polímero, como observa-se com sua estabilidade térmica no comparativo das três amostras (T_{onset}). E assim, os processamentos não comprometeram o comportamento térmico dos produtos produzidos.

Análise de Viscosidade

Os resultados de viscosidade intrínseca e massa molar podem ser visualizados na Tabela 9. A diminuição da viscosidade observada de 17% para a primeira transformação, e de 7% em relação à última é coerente com as degradações o material acaba sofrendo em cada uma destas etapas, decorrente de ataques químicos (água, oxigênio etc), desgastes mecânicos e fusões. Assim, é submetido a diferentes tensões de cisalhamento em níveis diferentes temperaturas, que acabam sendo responsáveis por quebras nas cadeias poliméricas, levando à diminuição da sua massa molar e naturalmente da sua viscosidade intrínseca.

Tabela 9. Resultados de Viscosidade Intrínseca e Massa Molar de rPET

Amostras de rPET	$[\eta]$ dL/g	Mn (g/mol)
<i>Pellets</i>	0,803	23467
Filamento para impressão 3D	0,667 ± 0,002	17633
Corpo de prova impresso	0,622 ± 0,003	15835

Não obstante, a diminuição de viscosidade e massa molar observada não comprometeu a deposição do material em camadas durante a impressão, ou seja, a fluidez se mostrou adequada para realizar a impressão de objetos (corpos de prova e o suporte para telefone celular). Além disso, a produção secundária por MA pode ser mais bem aproveitada para favorecer maiores proporções de materiais reciclados em oposição a outros processamentos convencionais de materiais plásticos na indústria, como processos de injeção-sopro que requerem altos valores de viscosidade intrínseca ($> 0,8$ dL/g) (Chacon et al., 2020; Berg et al., 2016). A fabricação FDM parece menos sensível às condições do material no processamento e viscosidades mais baixas podem ser usadas. Embora, ensaios futuros ligados especificadamente à aplicação final poderiam verificar este aspecto. Assim, produtos com maior valor agregado poderiam ser obtidos através desta tecnologia, além do mercado de produtos de fibra de PET, normalmente atendido por IV na faixa $<0,7$ dL/g.

No geral, foram obtidas boas condições tanto de processamento, como de produto a partir de material reciclado em sua totalidade e sem adição de aditivos, conforme ilustrado no presente estudo de caso. Assim, essa via de produção pode contribuir também com futuros ciclos de reciclagem, por conta de maior facilidade com a separação, funcionalizando melhor a lógica de circularidade através de estratégias de maior reciclabilidade, que consideram o *design* como quesito chave.

A etapa SSP conduzida na empresa de reciclagem de PET, mostrou-se relevante para as propriedades e uniformidade do material reciclado pós-consumo, com a produção de *pellets* reciclados de melhor qualidade. De forma a se obter um valor de IV superior de 0,803. Assim, influenciando positivamente no processamento do filamento para impressão FDM subsequente. O estudo realizado por Pinter et al., (2021) também demonstra a relevância do SSP, mas no contexto da reciclagem garrafa-a-garrafa em circuito fechado, de forma que após onze ciclos repetidos de reciclagem a proporção de 75% de PET reciclado e 25% de PET virgem, os resultados indicaram que mesmo após essas múltiplas reciclagens a qualidade final não foi comprometida. Nesse âmbito, essa etapa se mostra bastante importante para obtenção de um produto com qualidade superior e, por esta razão, poder ser empregado em uma gama mais diversa de aplicações, através da MA.

Análise Mecânica

A análise das propriedades mecânicas para o estudo em questão através da realização de ensaio de tração mecânica. A Figura 20 ilustra os corpos de prova que foram impressos. As propriedades mecânicas de limite de resistência a tração, módulo de elasticidade e deformação até a ruptura para os corpos de prova impressos podem ser verificadas na Tabela 10. Para uma melhor ilustração deste processo a Figura 21 retrata a visão lateral e frontal do corpo de prova pós) ensaio de tração, na qual pode se observar o preenchimento em camadas.



Figura 20. Corpos de provas produzidos na impressora 3D.



Figura 21. Visão lateral e frontal da fratura do corpo de prova após ensaio de tração

Tabela 10. Propriedades mecânicas dos ensaios realizados com o PET reciclado impresso.

Análise	Ensaio de tração mecânica		
	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Deformação até a Ruptura (%)
Corpos de prova	$37,7 \pm 5,6$	$771 \pm 29,4$	$7,64 \pm 1,5$

Novamente apenas para ilustrar o comparativo com a literatura, a Tabela 11 apresenta dados obtidos para corpos de prova impresso 3D com PET reciclado, corpos de prova injetados (manufatura convencional) e ainda, um comparativo com outro material, o ABS, visto que este material é o mais comumente encontrado de forma comercial para a tecnologia 3D. Além disso, o estudo com o ABS foi realizado no laboratório da empresa que colabora com este estudo, de forma que as condições de produção do filamento e de impressão foram realizadas nos mesmos equipamentos. Tal circunstância tende a diminuir as disparidades e incertezas que podem estar presentes nesta comparação, visto que os equipamentos e condições de processamento podem variar bastante e influenciar nos resultados obtidos.

Tabela 11. Propriedades mecânicas de PET e ABS reciclado na literatura em diferentes processamentos

Comparativo com a Literatura	Ensaio de tração		
	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Deformação até a Ruptura (%)
rPET injetado *	$68,0 \pm 1,00$	2994 ± 801	3,20
rPET Impresso 3D *	$35,1 \pm 8,00$	2112 ± 196	3,50
rPET Impresso 3D **	38,6	1640	4,30
rABS Injetado ***	39,2	-	30,1
rABS Impresso 3D***	33,0	-	8,30

Fonte: *Zander, et al (2018); ** BASF Ultrafuse rPET (2019); *** Leon Garcia et al., (2021)

A respeito da análise dos corpos de prova que foram produzidos, estes apresentaram resistência à tração e deformação até a ruptura com valores próximos a literatura no comparativo com o mesmo tipo de manufatura. A maior variação foi observada a respeito do Módulo de elasticidade, que mesmo dentro do erro não estariam próximos ao observado por ZANDER et al., (2018) e BASF Ultrafuse (2020). E assim, os resultados de desempenho mecânico apresentam consonância para os mesmos impressos em 3D registrados na literatura com polímeros reciclados.

Ademais disso, pode-se dizer que o suporte para telefone celular produzido com os mesmos parâmetros de impressão nas quais os corpos de prova foram impressos, apresentou visualmente desempenho adequado para sua aplicação. Em vista que não apresentou qualquer adversidade durante o cumprimento de sua função até o presente momento (1 ano desde sua impressão até o momento da defesa desta dissertação). De modo geral, esse arranjo (material/processamento) se melhor aprimorado poderia ser empregado também em uma gama variada de outras aplicações, além da aqui proposta por um suporte para telefone celular. Isso possibilitaria a expansão do mercado de reciclagem em ciclo aberto com aplicações de maior valor agregado.

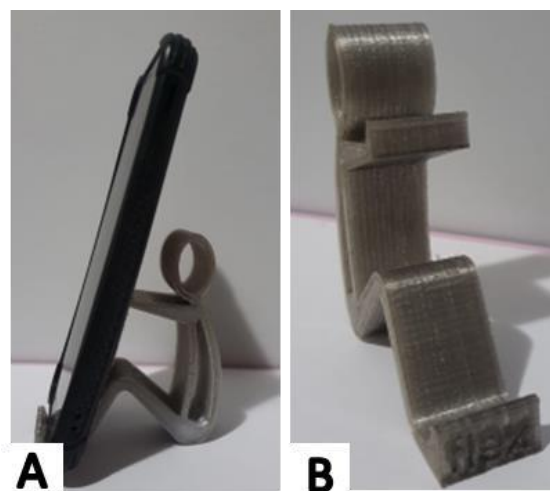


Figura 22. A) suporte de celular produzido - Vista lateral; B) Vista frontal ilustrando a capacidade de personalização do produto

Muito embora este estudo não tem como propósito a comparação entre as tecnologias por manufatura convencionais e aditivas, pode-se dizer que poderia ser esperado um desempenho superior para a produção de produtos, da primeira sobre a segunda. Isso decorre porque na impressão 3D por conta da deposição em camadas, o material acaba não sendo totalmente dispersado de forma homogênea, o que favorece a formação de espaços vazios nas interconexões, colaborando para desfavorecer as propriedades mecânicas.

Isto se dá ao contrário da injeção, onde ocorre um maior direcionamento e empacotamento das cadeias e, conseqüentemente, uma melhor dispersão do material, como nota-se tanto para o PET reciclado quanto para o caso do ABS reciclado (Tabela 11).

Em última análise, o comportamento mecânico superior para a manufatura convencional sobre a manufatura aditiva deve ser avaliado sob a real necessidade em questão e as condições de quando uma é preferível a outra. De qualquer forma, ambas apresentam limitações técnicas, custo e eventualmente disponibilidade, assim como melhores ou piores desempenhos ambientais em relação a alguma categoria e, assim este *trade-offs* devem ser analisados e ponderados.

5.2 DESEMPENHO AMBIENTAL

5.2.1 ABORDAGENS ATRIBUCIONAIS

5.2.1.1 POR CATEGORIA DE IMPACTO

O diagnóstico de desempenho ambiental segundo a abordagem Atribucional para a produção de uma unidade de suporte de telefone celular conforme a lógica sem reciclagem e a com reciclagem em ciclo aberto (OLR), por quatro perspectivas distintas aparecem descrita na Tabela 12. Essa caracterização foi realizada para as categorias de impacto ambiental de Potencial de Aquecimento Global (GWP) pelo procedimento que não leva em conta o carbono biogênico e pelo método que realiza essa consideração, Demanda Primária de Energia (PED), Escassez de água (WS); Formação de material fino particulado (PMF); Ecotoxicidade aquática (FWET) e Acidificação terrestre (TAc). Os resultados mostraram a superioridade do arranjo OLR sobre seu congênere sem reciclagem ao reduzir os impactos em quase todas as categorias analisadas. A seguir uma breve discussão dos resultados com enfoque das diferenças metodológicas de cada uma das perspectivas será conduzida a fim de estabelecer um melhor entendimento dos resultados obtidos para cada categoria analisada que acontecerá na sequência.

(a) Cut-off

A abordagem ACVA *Cut-off* não considera cargas da primeira vida do ciclo, enquanto os outros três métodos o fazem. Nesse sentido, os resultados obtidos são naturalmente inferiores para este método e não podem ser comparados entre si, conforme discutido anteriormente. Os resultados globais obtidos para os desempenhos ambientais são analisados com o comparativo para a produção do mesmo produto, mas por material não reciclado, isto é, de fonte de resina virgem (desde o petróleo). Em outras palavras, analisa-se a produção de suporte de celular a partir da via com reciclagem de forma pareada com a via sem reciclagem, mas considera o sistema de produção de suporte de celular apenas (Figura 16).

Tabela 12. Desempenho ambiental para a produção de uma unidade de suporte de celular por meio da abordagem ACVA

Categoria de impacto	Unidade	Sem reciclagem		OLR			
		Sistema 2	Total	Cut-Off	Perda de qualidade	Rejeito como conseq	Extração de recursos
GWP	g CO ₂ eq	420	640	354	536	565	552
GWP uptake	g CO ₂ eq	304	502	240	404	429	419
PED	MJ	16,3	23,6	13,7	20,0	21,0	20,5
WS	L	5,48	9,44	5,10	8,51	9,04	8,27
PMF	mg PM 2.5 eq	0,736	0,983	0,679	0,889	0,921	0,897
FWET	g 1,4-DBeq	18,5	39,7	18,8	31,2	33,1	31,8
TAc	g SO ₂ eq	2,19	2,88	2,02	2,58	2,69	2,63

Desse modo, a comparação para esta perspectiva deve ocorrer com a coluna sistema 2 da via sem reciclagem (Tabela 12). A partir da análise dos resultados nota-se ganhos da ordem de 6 a 22 % entre todas as categorias analisadas, com exceção da categoria FWET que apresentou desempenho ligeiramente inferior.

A execução de estudos segundo a perspectiva *Cut-off* é notadamente, a forma mais usual encontrada na literatura para lidar com situações multifuncionais decorrentes da reciclagem em ciclo aberto. Essa forma acaba sendo preferida por conta da simplicidade na modelagem dos sistemas envolvidos e por decorrência da indisponibilidade de dados de ciclos anteriores ou futuros ao que se está analisando. Em termos de vantagens desse método, pode se atribuir o olhar mais focalizado para o produto em que se está analisando e com isso possibilitar de forma mais localizada e rápida a identificação de pontos de atuação e a promoção de melhorias, como é o caso na grande maioria de estudos concebidos por empresas. Contudo, com práticas circulares cada vez mais sendo difundidas, olhar apenas um recorte do ciclo de vida total a que esse material pode ser submetido pode ser visto como insuficiente, para identificar e promover ações em relação aos consumos e emissões de inúmeros ciclos compartilhados que se ‘encerram’ e ‘renascem’, na medida que ocorre a alteração de função entre diferentes produtos. Essa visão se mostra ainda mais atuante com o avanço nas tecnologias de reciclagem de plásticos, que possibilitam maior reciclabilidade, em particular para o PET.

(b) Perda de qualidade

Para a análise de diagnóstico ambiental via método de Perda de qualidade foi necessário obter um fator de alocação (Q), que para este estudo de caso foi obtido a partir de critério de Viscosidade Intrínseca (IV), conforme apresentado anteriormente (seção 4.2). O valor considerado para o produto garrafas foi de 0,78-0,85 dL/g (Valor médio 0,815 dL/g) (ANTOON

PAR). Enquanto para o suporte de celular o valor foi obtido experimentalmente (Tabela 9) sendo de 0,622. Posto isso, as cargas ambientais das parcelas comuns aos dois sistemas foram multiplicadas por este fator, como descrito na Tabela 13.

Tabela 13. Fator de alocação para modelagem via método Perda de Qualidade

Sistema	Equação de fator de alocação	Valores considerados a partir do critério de IV
1 (garrafa)	$\frac{Q1}{(Q1 + Q2)}$	$\frac{0,815}{(0,815 + 0,622)}$
2 (suporte de celular)	$\frac{Q2}{(Q1 + Q2)}$	$\frac{0,622}{(0,815 + 0,622)}$

A partir da comparativo dos resultados globais obtidos com a relação total sem reciclagem sob essa perspectiva verifica-se desempenho superior para todas as categorias analisadas. A condução do diagnóstico ambiental por meio dessa perspectiva se mostra interessante por apresentar uma visão mais sistêmica ao correlacionar as cargas de consumos e emissões que cabem aos dois produtos e são compartilhados entre eles.

Para o presente estudo de caso aplicar critério econômico por este método não seria adequado, logo que não levaria em conta o aumento de valor agregado que o produto secundário teve pós reciclagem na forma de suporte de celular, que seria em muito superior aos do produto primário garrafas. A forma como o método proposto por Baumann, H. & Tillman (2004) apresentado na seção 3.2.4, considera ‘perda de qualidade’ pode ser considerada obsoleta, pois ao justificar que o critério econômico seria a forma mais adequada para atribuir a perda de qualidade entre ciclos, não leva em conta a questão de *Upcycling* e *Downcycling*. Estudos recentes como o de Tanguay et al. (2021) com o propósito de superar estas limitações trazem novas abordagem para mensurar perda de qualidade, capaz de ser aplicada tanto para casos de reciclagem em ciclo fechado como aberto.

Em todo o caso, a adaptação que foi conduzida no método de Baumann, H. & Tillman (2004) de utilizar um critério físico como a IV, como forma de correlacionar a perda de qualidade, se mostra eficiente e adequada para este estudo e cumpre o propósito de correlação da perda de qualidade aos dois ciclos de produto. Com isso o diagnóstico ambiental, pôde contar com maior caráter de realidade no tratamento de multifuncionalidade, ao empregar um importante parâmetro recorrente no mercado de resinas de PET para garantia de qualidade durante as produções.

(c) Extração de recursos como consequência de não reciclagem

A análise de desempenho ambiental por essa via se baseia no argumento de justiça de atribuir as cargas ambientais da extração de recursos naturais para serem contabilizadas no sistema em que ocorre a gestão de rejeitos. Na presente análise, portanto, as cargas ambientais da extração de recursos são atribuídas para o sistema 2, enquanto as cargas referentes a reciclagem das garrafas são atribuídas ao sistema 1. Essa inversão pode parecer inusitada ao pensar em termos práticos na responsabilização dos diversos agentes e para a proposição de políticas de gestão de resíduos envolvidos na cadeia do PET. De todo modo, o exercício metodológico com o presente estudo de caso é pertinente para verificar como se dá a contribuição por processos elementares na composição das cargas ambientais de cada sistema, como se pormenoriza no tópico a seguir. Os resultados obtidos, conforme descrito na Tabela 12 também demonstraram ganhos ambientais em todas as categorias analisadas em detrimento do comparativo com a via sem reciclagem com as cargas ambientais totais.

(d) Rejeito como consequência da extração de recursos

O diagnóstico ambiental para a produção de uma unidade de suporte de celular para este método se baseia no argumento de justiça da atribuição das cargas referentes a disposição final para o sistema que gerou a primeira demanda por extração de recursos naturais, ou seja, o sistema 1 do produto garrafas. Desse modo, as cargas ambientais desse processo elementar foram somadas às cargas já proprietárias do sistema 1, para os outros processos elementares não houve alteração na forma de atribuição das cargas. Para as categorias analisadas a categoria FWET foi aquela que demonstrou maior contribuição para a disposição final em aterro sanitário com cerca de 8% do resultado total obtido, as outras categorias apresentaram menos de 0,5 % de contribuição dessa etapa no cômputo geral. Essa discussão entre sistemas e como ocorreu a contribuição para o resultado total como está apresentado na Tabela 12 e se retoma no tópico a seguir. Observou-se a redução de impactos em todas as categorias analisadas com a lógica de reciclagem em ciclo aberto ao comparar a lógica sem reciclagem.

Esse método demonstra uma perspectiva interessante para atribuição de cargas ambientais e se mostra oportuno para fomentar a circularidade de resíduos plásticos. Por meio da penalização do sistema 1, isto é, aquele que gera a demanda por extração de recursos naturais, por atribuir as cargas de disposição final. Assim, essa lógica poderia estimular mais reciclagem e incentivar e creditar sistemas que fazem uso de material reciclado.

Análise comparativa entre sistemas

É importante notar que os métodos seguindo a abordagem Atribucional analisam a produção de suporte para celular sob diferentes perspectivas de modelagens para consideração de tratamento de multifuncionalidades. No entanto, as causas que acarretaram os impactos, listados na Tabela 12, são comuns a todas as formas de vislumbrar o diagnóstico ambiental do presente estudo de caso, com exceção apenas da *Cut-Off*, que não possui as cargas relativas do sistema que relaciona o ciclo de vida de garrafas.

Nesse sentido, o conteúdo que se segue busca identificar e discutir estas causas para cada uma das categorias de impacto ocorreu com resultados normalizados por sistemas. Essa análise serviu como guia de referência para a proposição de ações de melhoria para a rota de produção do produto investigado – suporte de celular. O procedimento de normalização conduzido encontra-se detalhado na seção 4.2 (viii). Como a normalização ocorreu a partir do cenário sem reciclagem, este computa a soma 1 nas Figuras analisadas a seguir, enquanto os outros métodos compreendem o quanto obtiveram como resultado para este total, esse procedimento foi escolhido para preservar a tendência de cada um dos métodos.

(i) Potencial de Aquecimento Global (GWP)

Os resultados gerais obtidos de forma normalizadas para a categoria GWP podem ser visualizados na Figura 23, que distingue as contribuições de cada ciclo de vida do material, ou como convencionado anteriormente sistema 1 para o ciclo da garrafa e sistema 2 para o ciclo do suporte de celular.

É possível analisar em um primeiro momento, que a maior fonte de contribuição dos impactos parte das contribuições relativas ao sistema 2, em maior ou menor proporção conforme a perspectiva OLR analisada. Em relação a tríade de métodos que considera as cargas do sistema 1, aquele que fornece maior penalização para o sistema 2 foi o método ‘Extração de recursos como consequência de não reciclagem’, atribuindo ao sistema 1 apenas 9,3% de contribuição na análise global. Enquanto, a menor penalização foi observada para o método ‘Rejeito como consequência da extração de recursos’, de forma que 37,5% de contribuição foi conferida ao sistema 1, demonstrando maior balanço entre as cargas ambientais de cada ciclo. Novamente enfatizando, o método ‘*Cut-Off*’ deve ser comparado apenas a porção que compreende o sistema 2 no cenário sem reciclagem, assim obteve-se uma redução de 17% para esta categoria. Outra observação que vale ser mencionada é o mesmo valor computado para o método ‘*Cut-Off*’ e o ‘Rejeito como consequência da extração de recursos’, embora tenha havido aspectos distintos nas modelagens da lógica OLR.

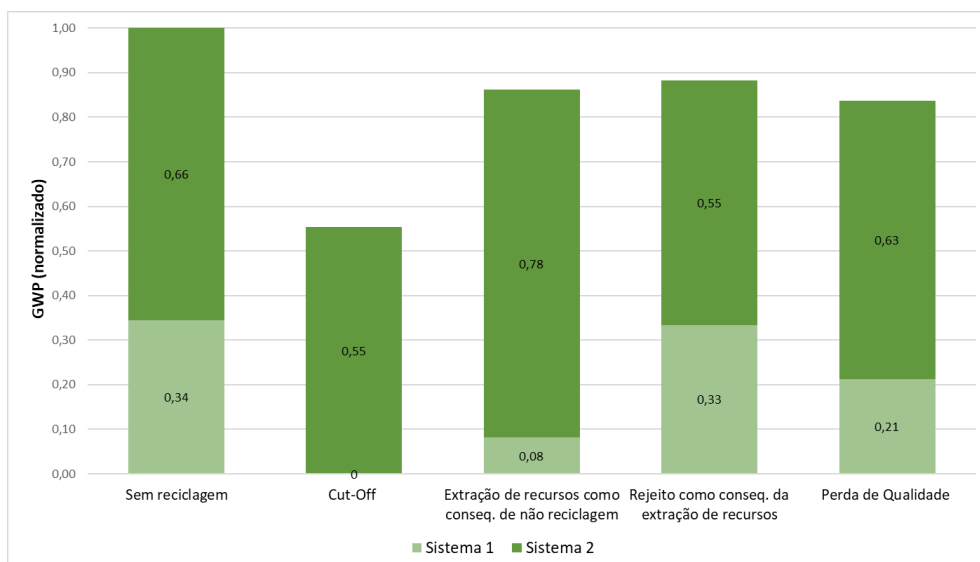


Figura 23. Desempenho ambiental da categoria de impacto GWP entre sistemas

Em termos gerais dos processos envolvidos na produção do bem de consumo na segunda vida do ciclo PET, a contribuição da categoria GWP vem notadamente das etapas envolvidas na produção secundária, que envolve a secagem, produção de filamentos e impressão 3D do produto tanto para as rotas que utilizaram reciclagem em ciclo aberto quanto para as que utilizam resina PET virgem de forma direta para a produção do produto. Esta etapa de produção secundária, em particular, comum a todos os sistemas 2 acabou por carregar expressivamente as cargas ambientais. A produção através da tecnologia FDM é fortemente dependente da eletricidade (1,17 KWh para a Unidade Funcional). Esse fator acaba contribuindo em maior proporção para ambas as rotas avaliadas, dada a relação de um produto com baixa massa que é gerado a partir de uma atividade altamente dependente do consumo elétrico.

Em relação aos sistemas que fazem uso da lógica OLR, dada a diferença impulsionada pela unidade funcional, os impactos associados à etapa de reciclagem do PET acabam sendo muito amortecidos. De qualquer forma, as principais fontes de contribuição de impacto referem-se ao consumo elétrico em primeira instância, tanto para o processo de triagem e reciclagem e em segunda instância, para o consumo térmico na forma de gás natural como parte dos processos da reciclagem.

As emissões totais relacionadas ao transporte, em particular do local de triagem do material já disposto de seu primeiro ciclo de vida e separado de outros resíduos até o local que ocorre a reciclagem per se representam 3,7 % do valor total obtido para o sistema 2. Essa contribuição, embora pequena é um importante indicador da contribuição dos transportes rodoviários, fonte relevante de emissões de GEE no país. O transporte Rodoviário contribuiu em 2016 com cerca de 13% de todas as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) do país (SIRENE, 2021).

No contexto brasileiro, ao analisar a logística que ocorre no arranjo, observa-se que o maior foco de atuação recai sobre as distâncias expressivas entre os centros de coleta/triagem e as localidades que de fato realizam a reciclagem, do material. Com parte deste material podendo ser transportado a distâncias de mais de 2.000 km entre diferentes regiões do país. Essa situação se expressa justamente, por conta de os centros de reciclagem estarem, majoritariamente, localizados na região Sudeste e Sul do país. Por isso, acabam tendo que atravessar longas distâncias das regiões Norte e Nordeste para serem reciclados, aumentando assim a contribuição de impactos por conta das emissões relacionadas a queima de diesel.

Para o sistema 1 relativo ao ciclo de vida das garrafas, as contribuições de CO₂ eq referem-se principalmente à produção de xileno e etileno, precursores da produção de resina PET virgem. Outras fontes importantes de contribuições se referem ao consumo de energia elétrica e térmica para os processos de produção e conformação da garrafa.

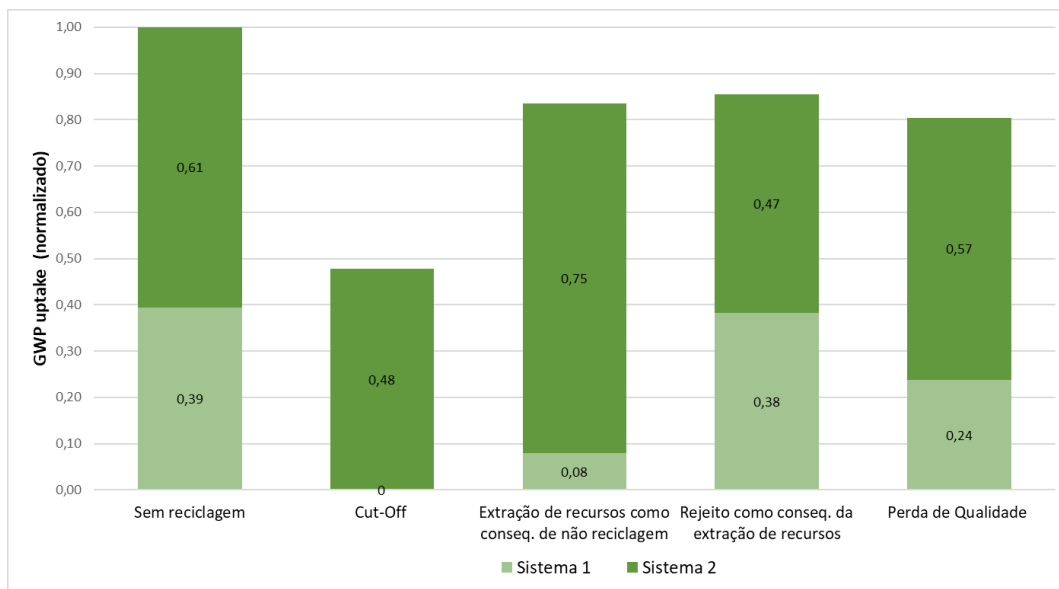


Figura 24. Desempenho ambiental da categoria de impacto GWP uptake entre sistemas

Outra maneira de avaliar a categoria de impacto do GWP seria levar em consideração as emissões biogênicas de CO₂, conhecidas por *uptake*. Essa forma avalia diferentemente da anterior, ao sustentar o conceito de carbono neutro para considerar os fluxos de CO₂ biogênico, o carbono ficará imobilizado neste estado ativo por longos períodos. Assim, aspectos como potencial fixação de CO₂ do meio ambiente e status de CO₂ (ou seja, emissão) são relevantes para análise, pois trazem essa visão complementar. Nessa perspectiva, a captação de CO₂ pela fotossíntese pode gerar créditos de emissão de GEE. Nesse sentido, o balanço de carbono considerando fluxos de CO₂ biogênico é metodologicamente respaldado pela norma ABNT NBR ISO 14.067.

A Figura 24 apresenta os resultados obtidos, observa-se uma tendência de comportamento similar, embora os resultados via a consideração *uptake* fornece valores inferiores do que a consideração anterior sem *uptake*. Essas reduções observadas para avaliar a mesma categoria, mas sob diferentes visões são resultado da fotossíntese da cana-de-açúcar, cuja biomassa abastece a matriz elétrica brasileira. Em vista que a energia elétrica é uma fonte considerável de contribuição tanto do ponto de vista para as rotas com e sem reciclagem. Os ganhos se devem ao sequestro de carbono que ocorre durante o cultivo da cana-de-açúcar e à ação fotossintética. Estima-se uma taxa média de absorção de CO₂ de 449 g/kg de cana-de-açúcar in natura (Paula et al., 2010).

(ii) *Demanda Primária Energética (PED)*

O impacto total de PED pode ser visualizado de forma normalizada na Figura 25 por contribuição de sistema. A tendência observada anteriormente em relação a parcela de cada sistema para cada um dos métodos é mantida para esta categoria também. Em relação ao foco dos impactos para o sistema 2 ocorre em termos de utilização de fontes 'renovável, fóssil' (NRF), 'Renovável, água' (RWA) e 'Renovável, biomassa' (RB). As contribuições em termos de RWA apresentam o maior percentual para os diferentes métodos seguidas de RB e NRF. Essas contribuições têm origem predominantes na influência que a rede BR exerce, via consumo de energia elétrica. O sistema 1 obteve uma inversão com as maiores fontes de contribuição em termos de NRF, seguidas de RWA e RB. Essa característica sob o ponto de vista de NRF, refere-se principalmente ao aporte da produção de xileno e etileno para a produção de resina virgem de PET e em grande parte ao consumo de GN para a demanda térmica, necessária aos processos de produção de resina virgem e nos processos de conformação de garrafas.

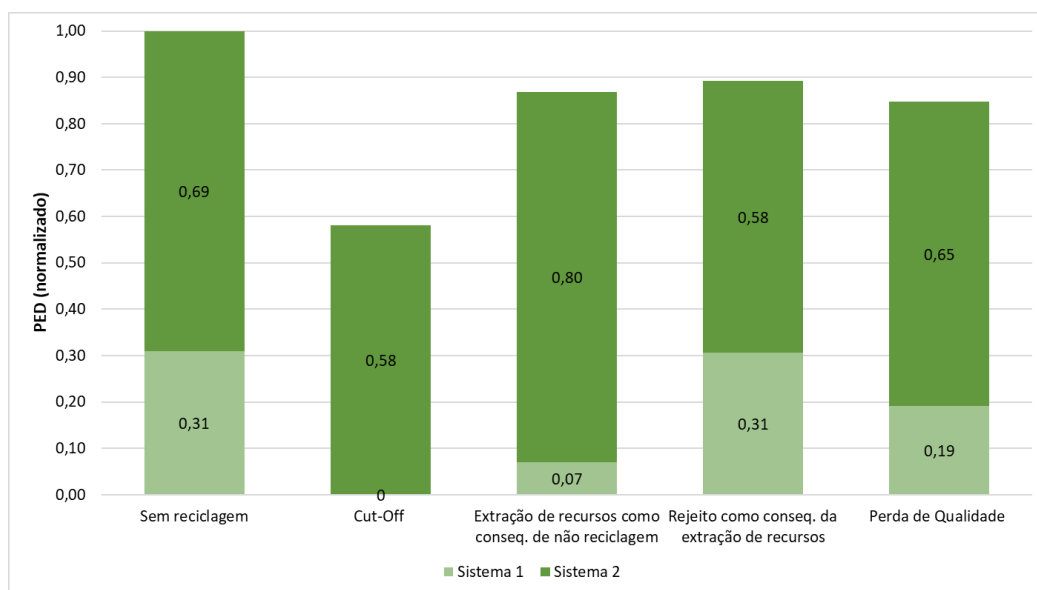


Figura 25. Desempenho ambiental da categoria de impacto PED entre sistemas

(iii) *Escassez de água (WS)*

A categoria Escassez de água traduz-se em termos de pegada hídrica, ou seja, é uma medida para mensurar os impactos ambientais diretos e indiretos da demanda de água ao longo do ciclo de vida em análise. A tendência de comportamento se mantém para esta categoria também entre os métodos e, observa-se ainda maior equilíbrio entre as parcelas das cargas entre os dois sistemas (Figura 26).

O perfil de contribuição para o sistema 1 foi relacionado aos ativos xileno, etileno e outros precursores para produção de resina PET, como o PTA, refletiram a principal demanda por água. O processo referente à fabricação de garrafas também apontou uma importante fonte de consumo de água, movida por conta do resfriamento dos equipamentos utilizados nesta produção. Para os processos que compõem o sistema 2, isto é, a segunda vida do uso do material PET, referem-se principalmente ao consumo de energia elétrica, através da irrigação da terra para produção de cana-de-açúcar que será posteriormente aproveitada na transformação do bagaço da cana.

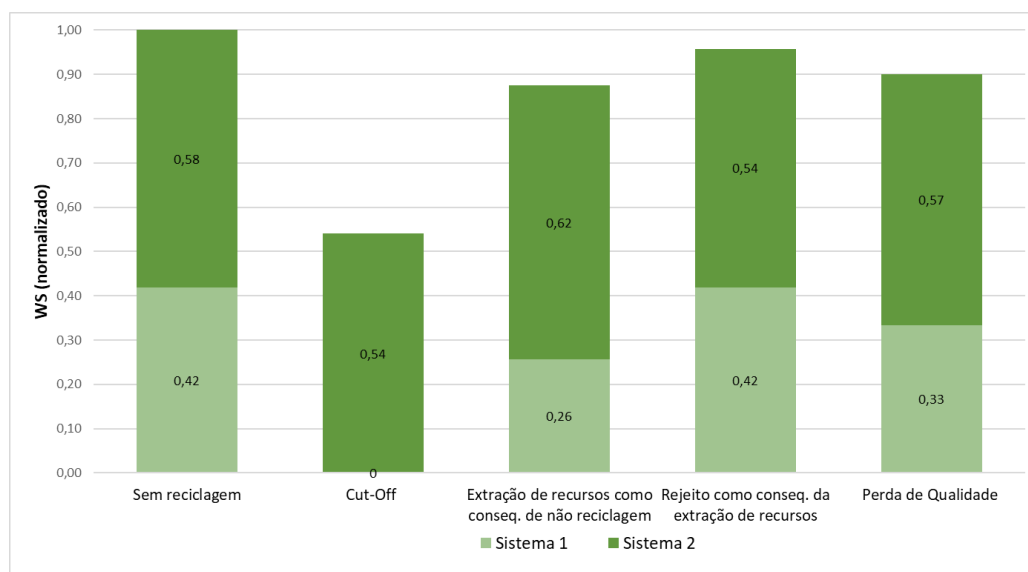


Figura 26. Desempenho ambiental da categoria de impacto WS entre sistemas

(iv) *Formação de material particulado fino (PMF)*

No tocante a formação de material particulado (PMF) está associada a vários efeitos adversos à saúde e à redução da expectativa de vida (Fantke et al., 2015). A Figura 27 retrata a contribuição segundo esta categoria, verifica-se para esta categoria que no cômputo total de cargas a parcela originária do sistema 2 tem de 74 a 90% de influência. Como os processos são de natureza intensiva em energia, a geração de eletricidade é novamente um importante impulsionador dos impactos nesta categoria, principalmente na forma de eletricidade a carvão,

o tratamento da produção de cana-de-açúcar, a combustão e a geração de eletricidade a partir do bagaço da cana-de-açúcar. A produção de xileno e etileno para produzir resina PET virgem em respeito ao sistema 1 também são as principais fontes de contribuição para a poluição do ar na forma de PMF.

Stefaniak et al., (2022) alertam sobre partículas e vapores potencialmente perigosos, causadores de diversos malefícios à saúde humana, que são liberados durante os processos de reciclagem distribuída, produção de filamentos e durante a impressão 3D. Avaliar a liberação de particulados ou vapores desses processos é relevante para garantir melhor sustentabilidade da tecnologia FDM em espaços distribuídos. Pode ser necessário ter próximo a esses locais de produção exaustores ou câmaras fechadas nas impressoras para mitigar os efeitos de uma exposição prolongada a esses compostos.

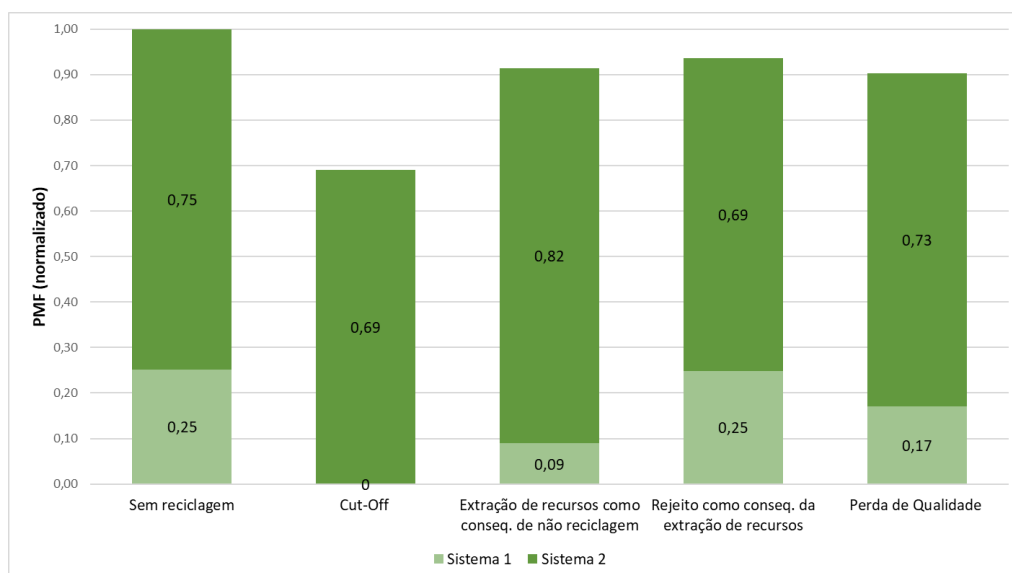


Figura 27. Desempenho ambiental da categoria de impacto PMF entre sistemas

(v) Ecotoxicidade de água doce (FWET)

Para FWET a influência da eletricidade também foi sentida nesta categoria, principalmente no que diz respeito à energia proveniente de usinas a carvão, de gás natural e de resíduos dos processos relacionados a energia eólica (Figura 28). Essas contribuições estão associadas aos rejeitos de mineração de carvão e de rejeitos sulfídicos da operação de mina de cobre. Os impactos relacionados à extração destes minérios e desses recursos energéticos fósseis, e dos resíduos plásticos gerados durante todos os processos produtivos de manufatura dos produtos, somados ao descarte final geram como resultado o lixiviado formado em aterros sanitários, parte do qual percola para as águas subterrâneas de forma a contabilizar impactos para esta categoria.

Como o método ‘Rejeito como consequência de extração de recursos’ atribuiu as cargas da disposição final em aterro para o sistema 1, observa-se para esta a categoria a inversão da influência para a contabilização total. Outra observação relevante é como os cenários sem reciclagem levam em conta a disposição em aterro sanitário tanto para o descarte das garrafas como para o suporte celular e, visto que esta categoria possui forte atuação das cargas desse processo elementar, a inversão de contribuição do sistema 1 e sistema 2 também ocorre neste caso.

Por fim, o método *Cut-off* apresentou valores equivalentes a lógica sem reciclagem para esta categoria, esse comportamento demonstra certa causalidade, pois as modelagens e os inventários que compreende a cada um são distintos em termos de origem da matéria-prima. A análise por esse método pode ter salientado algum efeito particular desta categoria em específico, muito embora não tenha sido observado para as outras perspectivas metodológicas, que apresentaram valores inferiores.

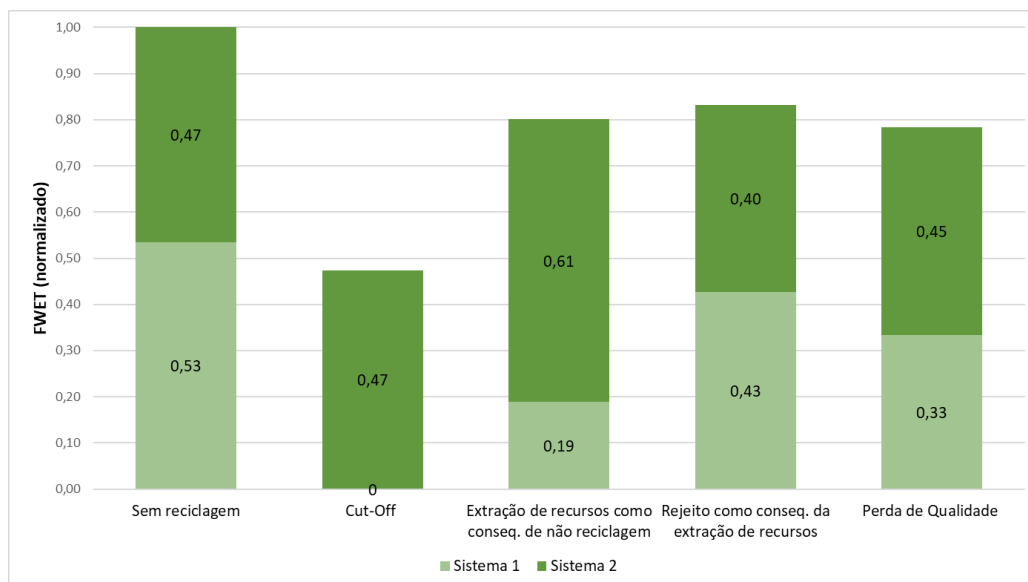


Figura 28. Desempenho ambiental da categoria de impacto FWET entre sistemas

(vi) *Acidificação Terrestre (TAc)*

Os impactos da categoria TAc se originam principalmente dos poluentes SO₂ e NO_x. Para a análise deste estudo (Figura 29), partem principalmente dos processos de produção de xileno e eteno, bem como da queima de carvão para geração de eletricidade cuja participação na malha BR 2020 foi de 3,1% para o sistema 1, que utilizaram a resina virgem PET.

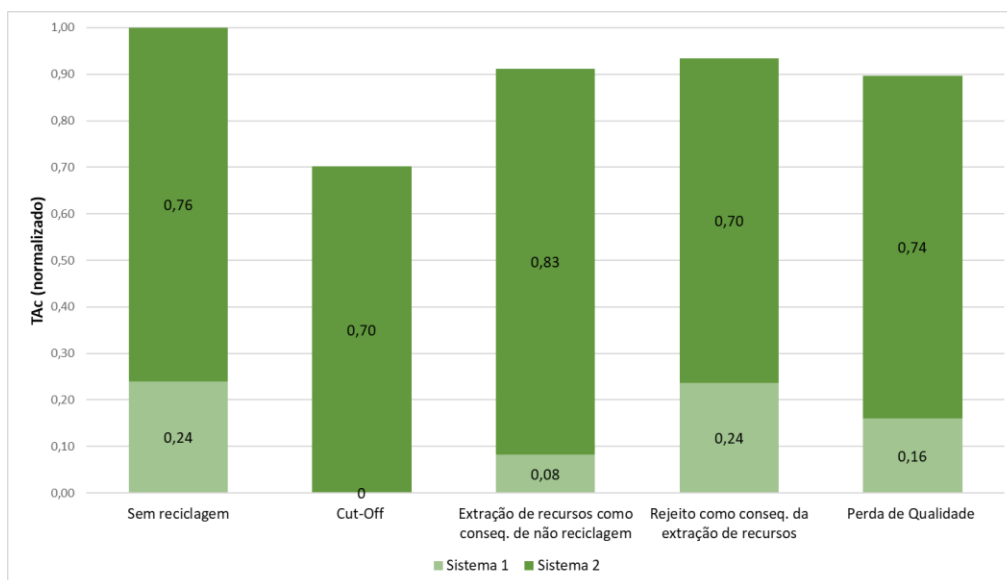


Figura 29. Desempenho ambiental da categoria de impacto TAc entre sistemas

Para os sistemas 2, a contribuição de TAc vem mais uma vez da influência considerável da eletricidade na manufatura do suporte de celular. O carvão e o diesel utilizados nas termelétricas (1,6% da rede nacional) são fontes importantes desses poluentes. A produção de cana-de-açúcar para queima de biomassa para geração de energia elétrica (9,1% da rede nacional) também causa impactos, na forma das emissões de amônia gasosa (NH_3), outro importante poluente para o TAc. Os transportes envolvidos em todo o conjunto do sistema de produto avaliado são também fontes importante dessas emissões.

5.2.1.2 COMPARAÇÃO VIA INDICADOR ÚNICO

Conforme mencionado anteriormente este estudo pretendia-se conduzir uma avaliação para verificar o diagnóstico ambiental em âmbito global, a fim de verificar tendências de comportamento e possibilitar conclusões complementares as anteriores já explanadas. A Tabela 14 traz os valores intermediários de ($IANik$), bem como os resultados finais, na forma de (IUi) e também de Indicador Único Normalizado ($IUNi$) para todas as lógicas OLR e suas congêneres sem reciclagem, que tiveram desempenhos ambientais verificados por este estudo. As equações que elucidam as operações adotadas encontram-se descritas na seção 4.2 (viii). Os resultados da avaliação de $GWP uptake$ não foram contabilizados para efeito de cálculo do indicador único. A comparação via indicadores únicos não só ratifica o melhor desempenho da rota envolvendo OLR por meio das diferentes perspectivas metodológicas e da rota sem reciclagem discutido na seção 5.2.1.1, como também quantifica a magnitude de vantagem desse comparativo. Impactos menores foram obtidos de 10 a 15 % ao analisar os valores de $IUNi$ em relação ao arranjo que não considera a reciclagem, tomada como linha de base para os seus congêneres.

De maneira geral, verifica-se que a categoria que apresentou as maiores reduções em relação ao cenário base a partir da média geral obtida pelos quatro métodos foi a GWP, enquanto as categorias que apresentaram menores reduções foram a WS, PMF e TAc de forma empatada.

Tabela 14. Descrição de valores intermediários (*IAN_{ik}*) e finais dos Indicadores Únicos de (*IU_i*) desempenho ambiental da produção de uma unidade de suporte de celular segundo as lógicas OLR e seus congêneres sem reciclagem

Categoria de impacto	Unidade	Valor do Impacto Ambiental					
		Sem reciclagem		OLR			
		sistema 2	Total	Cut-Off	Perda de qualidade	Rejeito como conseq.	Extração de recursos
GWP	g CO ₂ eq	420	640	354	552	565	536
PED	MJ	16,3	23,6	13,7	20,5	21,0	20,0
WS	L	5,48	9,44	5,10	8,27	9,04	8,51
PMF	mg PM 2.5 eq	0,736	0,983	0,679	0,897	0,921	0,889
TAc	g SO ₂ eq	18,5	39,7	18,8	31,8	33,1	31,2
FWET	g 1,4-DBeq	2,19	2,88	2,02	2,63	2,69	2,58
Índice Ambiental Normalizado para as categorias de impacto analisadas							
<i>IAN_{GWP}</i>	-	1,00	1,00	0,84	0,86	0,88	0,84
<i>IAN_{PED}</i>	-	1,00	1,00	0,84	0,87	0,89	0,85
<i>IAN_{WS}</i>	-	1,00	1,00	0,93	0,88	0,96	0,90
<i>IAN_{PMF}</i>	-	1,00	1,00	0,92	0,91	0,94	0,90
<i>IAN_{FWET}</i>	-	1,00	1,00	1,02	0,80	0,83	0,79
<i>IAN_{TAc}</i>	-	1,00	1,00	0,92	0,91	0,93	0,90
<i>(IU_i)</i>	-	6,00	6,00	5,48	5,23	5,43	5,17
<i>(IU_{Ni})</i>	-	1,00	1,00	0,90	0,86	0,90	0,85

A confluência de todos esses resultados de impacto permite obter três conclusões principais. A primeira delas é de quem sem dúvidas realizar a reciclagem por uma lógica de ciclo aberto, possibilitou ganhos ambientais em praticamente todas as categorias de impacto analisadas, excetuando a categoria de FWET sob o olhar do método *Cut-Off* que apresentou resultados equivalentes. A razão geral das diferenças observadas entre as lógicas com e aquelas sem a reciclagem decorre predominantemente, do efeito da extração de recursos provenientes de fonte de petróleo, para produção de ativos precursores da resina de PET virgem para produção dos dois bens de consumo de forma isolada.

A segunda conclusão vem da análise das diferentes perspectivas da tríade de métodos da ACVA que levam em conta a contabilização total das cargas, de forma que se tirado uma média desses valores obtém-se $5,27 \pm 0,14$ de *IU_{Ni}*. Isso sugere uma boa concordância em respeito ao

diagnóstico ambiental, tanto entre os valores normalizados para cada uma das categorias como para o resultado global. Sendo assim, muito embora diferentes procedimentos metodológicos tenham sido conduzidos para tratar multifuncionalidades, decorrente do compartilhamento de cargas via dois ciclos de vida conectados por conta do OLR, resultados concordantes puderam ser obtidos.

A terceira conclusão diz respeito aos ganhos e perdas que uma análise sob a ótica do método *Cut-Off* traz. Primeiramente em relação aos ganhos, realizar uma análise somente por esta perspectiva pode ser interessante para destacar os principais pontos de atuação e proposição de melhorias de forma mais localizada para um produto ou processo específico. Contudo, sobre as perdas, em um mundo cada vez que almeja práticas circulares, com diferentes *loops* entre produtos ou processos de forma a haver mais conexões, avaliar de forma mais sistêmica como se dá essa relação, em particular, de reciclagem, entre esses ciclos é necessária a fim de verificar propriamente se é essas práticas são contraproducentes do ponto de vista ambiental, independentemente de os ciclos serem fechados ou abertos. Assim, as visões do método *Cut-Off* com qualquer um dos métodos da tríade que considera as cargas ambientais do ciclo de vida anterior, são complementares em uma lógica de modelo de economia circular, pois uma visão sistêmica é fundamental para que impactos menores sejam alcançados dentro de cada ciclo de vida, e de forma somada entre os ciclos de vida que compartilham cargas ambientais. Esses achados sugerem propostas de ações baseadas na capacidade de cooperação entre os diferentes agentes da cadeia de produção de material virgem, de reciclagens e de produções subsequentes com material plástico reciclado, especialmente para o PET como aqui evidenciado, para práticas mais limpas, resilientes e sustentáveis como um todo.

Assim sendo, a análise aqui conduzida via ACVA da conexão de dois sistemas que cumprem funções distintas, sobretudo para um segmento ainda inexplorado ambientalmente de conversão de garrafas de PET em produtos de valor agregado, capazes de personalização através de matéria-prima para a tecnologia de MA, como o suporte de celular tomado como exemplo. Demonstra-se, portanto, ganhos ambientais ao examinar essa rota através da reciclagem, do que utilizar resinas virgens de PET como matéria-prima para o mercado de MA que projeta crescente expansão. Na forma de mais uma alternativa para ampliação do leque de opções de aplicação de material reciclado pós-consumo, antes concentradas nos mercados de fibras e de garrafas.

5.2.1.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ACVA

Assim como outras técnicas analíticas, as estimativas ambientais feitas pela abordagem ACV são decisões que os profissionais devem tomar durante o desenvolvimento dos modelos que retratam as realidades investigadas. Este procedimento introduz incertezas que devem ser dimensionadas para que se conheça o grau de confiabilidade dos diagnósticos. No presente estudo, a investigação de incertezas torna-se ainda mais recomendada devido à variabilidade das fontes de dados utilizadas para descrever os processos de produção do PET virgem, uma

vez que estes foram compostos por dados secundários. Portanto, a análise de sensibilidade foi aplicada a este estudo para avaliar os dois principais precursores para síntese de PET e produção de pellets virgens - xileno e etileno.

A análise de sensibilidade foi utilizada para investigar as incertezas associadas aos impactos ambientais calculados na primeira vida do ciclo, ou seja, para produzir garrafas, e como esses impactos repercutiriam de forma acumulada nos resultados globais na produção do suporte para celular, e para os três métodos da abordagem ACV que possuem essa consideração. Esta análise visa verificar como as incertezas intrínsecas influenciam o parâmetro que mais contribui para causar esses efeitos em cada situação (entradas do modelo) por meio de variações de aumento ou diminuição de 2, 5, 10, 15 e 20 percentuais. Para tanto, foi empregado o método *one-at-a-time* (OAT), uma abordagem simples, mas altamente eficaz em avaliações desse tipo (Saltelli, et al 2004).

A Figura 30 apresenta os resultados da aplicação do método OAT às seis categorias utilizadas para compor o perfil único ambiental deste estudo para os três métodos que computam cargas do ciclo de vida progresso ao suporte de celular, qual sejam: Extração de recursos como consequência de não reciclagem; Rejeito como consequência da extração de recursos e Perda de qualidade. Os resultados obtidos podem ser discutidos em três tópicos.

O primeiro deles se refere a análise discretizada por composto, nota-se uma maior sensibilidade nos resultados observados para o xileno do que para o etileno com desvios de quase 3,5% para as variações positivas ou negativas para o primeiro, enquanto o segundo obteve variações de até 1,5% para os maiores valores percentuais. Em outras palavras, mais que o dobro da variação percentual é observada na forma de aumento ou redução dos impactos ambientais para as categorias avaliadas. Essa relação pode ser explicada, pois o xileno contribui de maneira mais intensa para o processo de produção de resinas virgens de PET seguindo a dependência de 0,65 kg de xileno/1 kg de Ácido Tereftálico Purificado (PTA), e 0,86 kg de PTA/1 kg de resina PET virgem. Enquanto o etileno é usado para produzir óxido de etileno, este é usado para produzir etilenoglicol, que é usado na proporção de 0,33 kg de etilenoglicol / 1 kg de resina PET virgem. Além disso, foram observadas variações mais pronunciadas em termos de aumento do que diminuição percentual dos dois compostos, principalmente para o etileno.

O segundo tópico compreende os resultados por categoria, verifica-se que todas as categorias de impactos foram sensíveis de acordo com as variações, exceto a categoria FWET, que apresentou uma variação inexpressiva de menos de 0,5% e apenas para reduções de 10, 15 e 20% de xileno. As categorias que demonstraram as maiores sensibilidades a partir das variações percentuais positivas ou negativas foram a GWP e PED tanto para o etileno como

para o xileno. As outras categorias WS, PMF e TAc apresentaram variações intermediárias se alternando na ordem a depender do método ou do composto em análise.

Por fim, o último tópico de discussão se refere as diferenças entre os três métodos. Nesse sentido, averigua-se menor linearidade para o método Perda de Qualidade, motivadas principalmente pelos perfis das categorias de impacto PED e TAc. De modo geral, os outros dois métodos apresentaram perfis bastante lineares. Outra observação interessante é o menor desvio do valor base (0%) para o método Perda de Qualidade, para a análise do composto xileno.

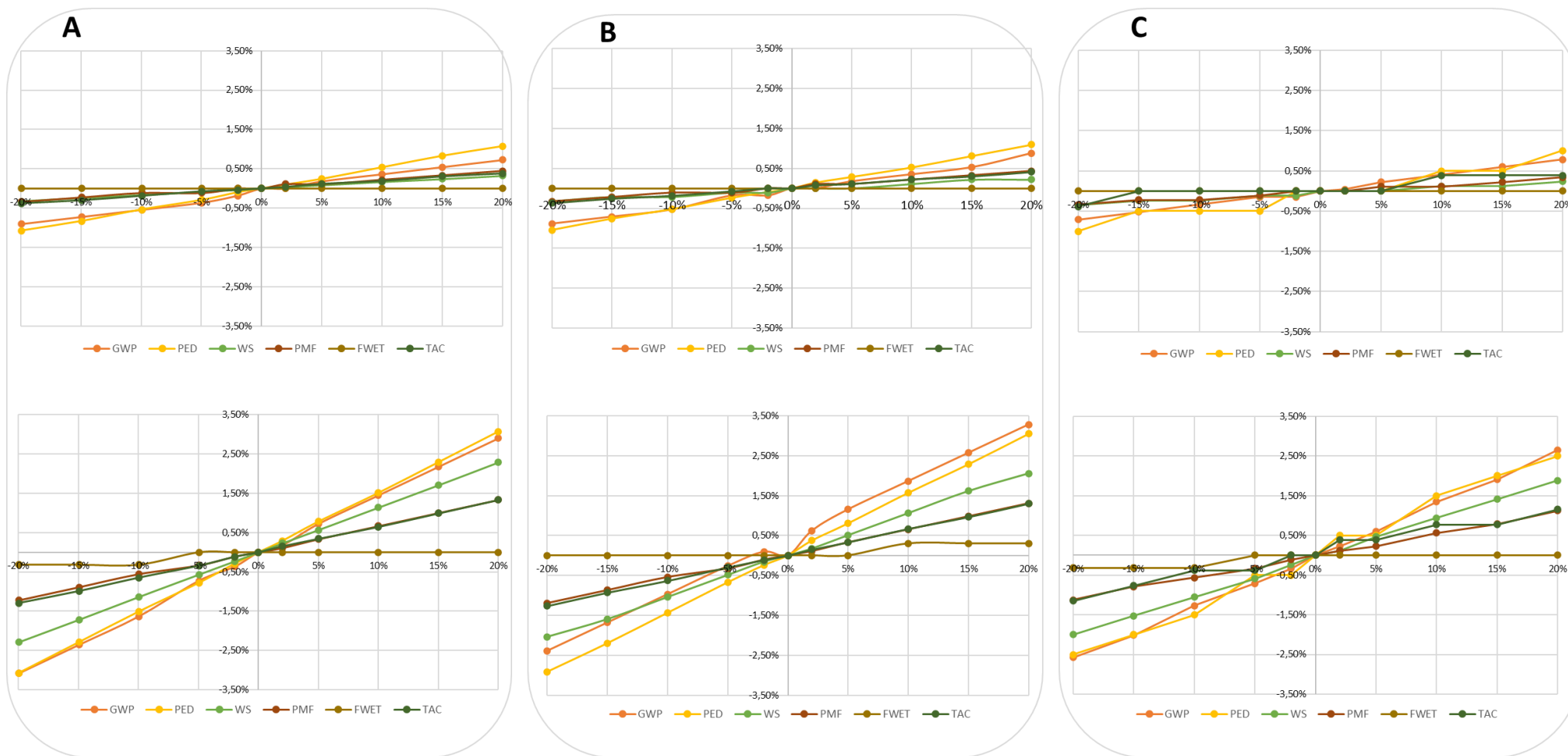


Figura 30. Resultados da Análise de Sensibilidade ACVA entre os métodos A) Extração de recursos como consequência de não reciclagem; B) Rejeito como consequência da extração de recursos; C) Perda de qualidade. Os resultados apresentados na parte superior remetem ao composto etileno, enquanto a inferior para o xileno

5.2.2 ABORDAGENS CONSEQUENCIAIS

5.2.2.1 POR CATEGORIA DE IMPACTO

A Tabela 15 apresenta o diagnóstico de desempenho ambiental segundo a abordagem consequencial para a produção de uma unidade de suporte de telefone celular conforme a lógica sem reciclagem e a com reciclagem em ciclo aberto (OLR), por duas perspectivas distintas. Essa caracterização foi realizada para mesmas categorias de impacto ambiental já apresentadas para abordagem Atribucional. Percebe-se que os resultados obtidos para o método CLR e 50/50 foram os mesmos, pois embora as considerações metodológicas de atribuição de cargas sejam distintas, como o presente estudo de caso teve o escopo de analisar apenas dois ciclos não foi observada diferença para o cômputo geral, embora diferenças puderam ser observadas na análise entre sistemas, como se ve adiante. De toda forma, o exercício metodológico de analisar é válido em termos de discussão para auxiliar no processo de tomada de decisão com maior robustez.

Os resultados obtidos via abordagem a ACVC também revelaram ganhos ambientais para o arranjo OLR sobre o arranjo que não considera reciclagem na forma de diminuição de impactos para todas as categorias analisadas. Na sequência, uma breve discussão com enfoque das diferenças metodológicas de cada uma das perspectivas é conduzida como forma amparar o entendimento geral, antecipando os resultados discricionários por categoria.

Tabela 15. Desempenho ambiental para a produção de uma unidade de suporte de celular por meio da abordagem ACVC

Categoria de impacto	Unidade	Sem reciclagem	OLR	
			50/50	CLR
GWP	g CO ₂ eq	656	562	562
GWP uptake	g CO ₂ eq	517	426	426
PED	MJ	23,97	20,72	20,72
WS	L	11,25	9,92	9,92
PMF	mg PM 2.5 eq	1,018	0,934	0,934
FWET	g 1,4-DBeq	48,3	37,7	37,7
TAc	g SO ₂ eq	2,81	2,61	2,61

(a) 50/50

O Método 50/50, respaldado por Baumann, H & Tillman (2004) como uma das perspectivas mais triviais para OLR, pensada para uma lógica em cascada prevê a atribuição do ônus de cargas da produção de material virgem e tratamento de resíduos ao primeiro e ao último

produto em proporções iguais, as equações originais da lógica podem ser visualizadas no Apêndice A. Esse método promove uma lógica subjacente de que a oferta e a demanda por material reciclado são necessárias para permitir a reciclagem. Sendo assim, o uso de material reciclado e a produção de produtos recicláveis são preferíveis quando os impactos ambientais da reciclagem são menores do que os impactos combinados da produção de material virgem e tratamento final de resíduos (NICHOLSON et al., 2009). Contudo, o presente estudo de caso busca analisar como se dá a lógica de OLR apenas para dois ciclos. Nesse sentido, adaptações tiveram que ser conduzidas para atribuição de cargas entre os sistemas 1 e 2. De modo, que houve a atribuição igualitária das cargas comuns, ou seja, produção de material virgem, tratamento de resíduos e da reciclagem. As cargas proprietárias de cada sistema como os processos de manufatura de cada produto continuaram sendo atribuídas a cada um deles.

(b) Aproximação para ciclo fechado (CLR)

O método de aproximação para ciclo fechado na forma de atribuição de cargas, considera que cada produto é igualmente responsável pelos impactos ambientais associados à produção de material virgem, reciclagem e tratamento final de resíduos. O ônus nesse caso, atua como impacto médio, distribuído igualmente entre os produtos, dependendo do número de vezes que a reciclagem ocorre na cascata de produtos (NICHOLSON et al., 2009). Novamente, para a análise metodológica por essa lógica para o presente estudo de caso adaptações tiveram que ser conduzidas na medida que somente dois ciclos estão relacionados e somente uma reciclagem ocorre. Assim, a análise para este método acabou sendo como um corolário do anterior, para este caso em particular.

Em vista que o produto suporte de celular é aquele que se almeja usufruir do material reciclado o percentual maior foi a este sistema considerado, no caso sendo de 70%, enquanto o sistema de garrafas ficou com o percentual restante. As cargas da parcela de tratamento final de resíduos seguiram a da distribuição de produção de material virgem, por razão do estímulo que o sistema 1 gerou desta demanda, ficando, portanto, com 70 % destas parcelas, enquanto o sistema de suporte de celular ficou com o percentual restante. Assim como na perspectiva anterior, as cargas proprietárias de cada sistema permaneceram atribuídas aos mesmos.

Análise comparativa entre sistemas

De forma análoga, a discussão empreendida para a abordagem ACVA a abordagem ACVC depreende as mesmas causas que acarretaram os desempenhos ambientadas, contudo, com a diferença de modelagem relacionada a expansão do sistema para lidar com as situações multifuncionais. Assim sendo, como forma de evitar a reincidência de discussão, a que se segue

procura focalizar nos aspectos particulares observados para essa diferença de modelagem. Essa análise também contribuiu como guia de referência para a proposição de ações de melhoria para a rota de produção do produto investigado – suporte de celular. O procedimento de normalização utilizado seguiu o mesmo racional da análise ACVA e encontra-se detalhado na seção 4.2 (viii).

(i) Potencial de Aquecimento Global (GWP)

O desempenho para a lógica sem reciclagem na soma geral acabou sendo decido para esta categoria por conta da contribuição superior do sistema 1, em vista que as contribuições relativas ao sistema 2 acabaram por se equiparar, pelo menos em termos do método 50/50 (Figura 31). Isso decorre por mérito do cenário sem a integração por reciclagem por aportar maiores cargas relativas à disposição final em aterro sanitário das garrafas no primeiro ciclo, com valor de 29 a 40% superior em relação aos métodos CLR e 50/50, respectivamente.

No que se refere, aos procedimentos de expansão do sistema para tratamento de multifuncionalidade é necessário discutir o efeito que o Anidrido ftálico exerce na compensação de cargas para todas as categorias que se seguem, mas em particular para esta, na forma de 3,45 g de CO₂ eq por UF. Essa prática corroborou na compensação de impactos, em particular, em termos de GN, energia elétrica e principalmente, da demanda por xileno, ativo de origem fóssil. Embora, seja uma quantidade baixa em relação ao coletivo global é uma característica bastante interessante de considerar das abordagens do tipo ACVC. Ao passo que, a prática de expansão de sistema afeta os sistemas periféricos e, portanto, o funcionamento de seus mercados (WEIDEMA, 2003).

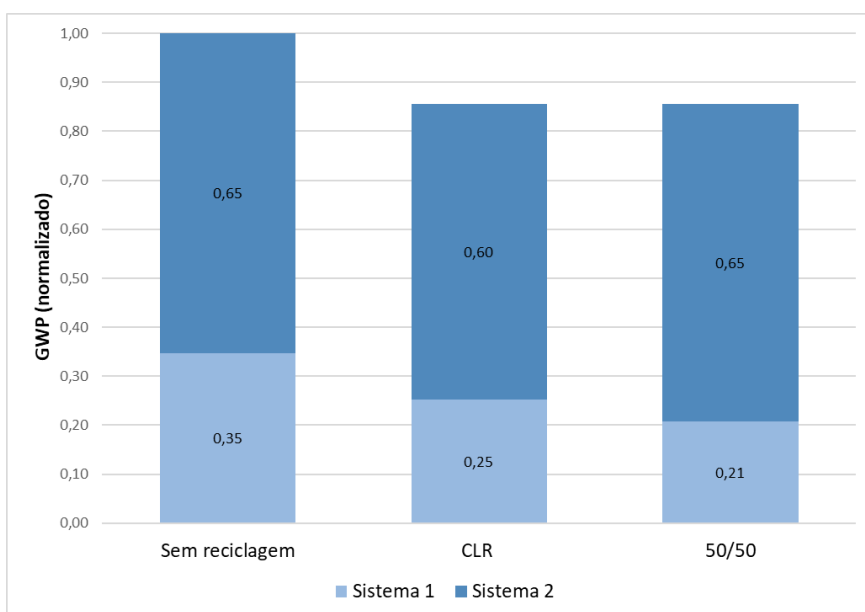


Figura 31. Desempenho ambiental da categoria de impacto GWP entre sistemas

A análise para a categoria GWP uptake, que leva em conta a influência do CO₂ biogênico apresentada na Figura 32, conservou as tendências apontadas pela maneira anterior para a contribuição para as parcelas de sistemas no cômputo geral. De forma que a variação entre as duas, se retém principalmente por conta da questão energética, motivada pelos créditos gerados por conta do carbono biogênico, que estão presente nos processos de geração elétrica via biomassa.

Ao analisar a análise global para o GWP uptake a partir da Tabela 15, observa-se que esta apresentou valores ligeiramente superiores do que GWP, ao contrário do que fora observado para a análise por abordagem ACVA, na qual obtiveram-se reduções da ordem de 12% para o cenário sem reciclagem e 15% para os arranjos OLR. Para essa constatação é importante salientar a justificativa justamente, porque não devem ser conduzidas comparações entre as duas abordagens, pois cada uma parte de considerações particulares de modelagens no tratamento de multifuncionalidade e fazem uso de inventários que partem de dados médios ou dados marginais como já discutido e podem levar a resultados variados.

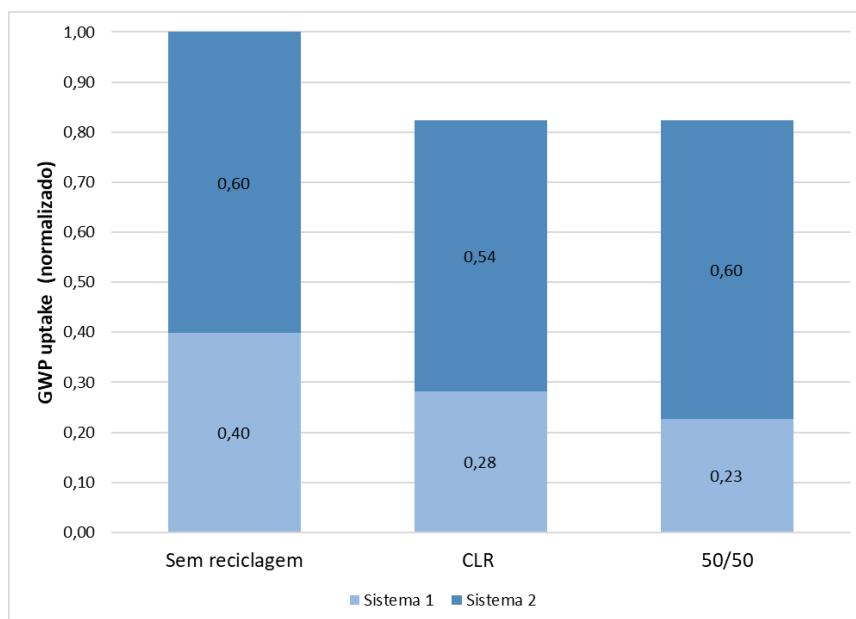


Figura 32. Desempenho ambiental da categoria de impacto GWP entre sistemas

(ii) Demanda Primária Energética (PED)

A contribuição de PED por unidade de suporte de celular produzida conforme abordagem ACVC reporta as mesmas causas já comentadas anteriormente. Com contribuições para NRF com 41%, para RWA com 28% e para RB com 23%, os outros 8% couberam a não-renovável nuclear, renovável eólica, solar e geotérmica e não-renovável biomassa, tanto para o cenário que não considera reciclagem como para o arranjo que o faz. Em respeito as análises por aporte

de sistema através da Figura 33, nota-se que mais uma vez o sistema 2 exerce a influência predominante para a avaliação global para a modelagem consequential, resultado da expressiva influência da dependência de energia elétrica para os processos envolvidos que acabam por carregar as cargas ambientais.

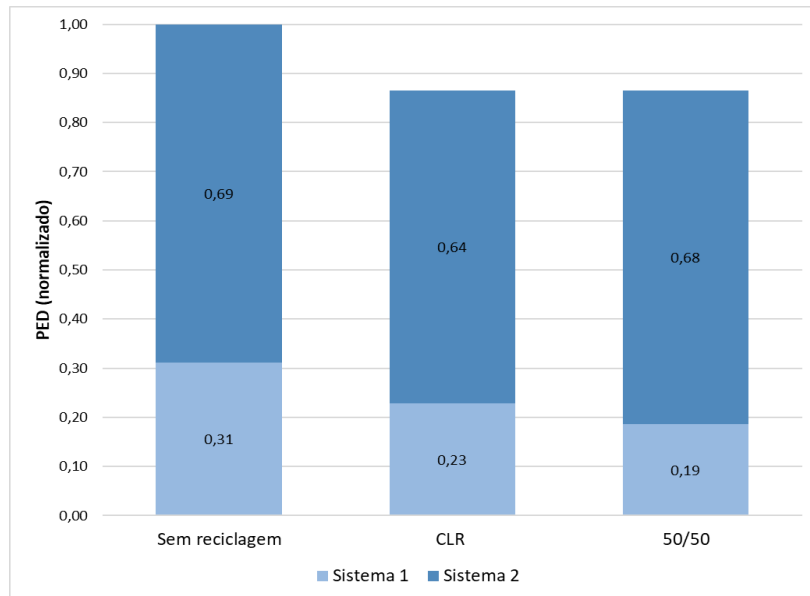


Figura 33. Desempenho ambiental da categoria de impacto PED entre sistemas

(iii) Escassez de água (WS)

No tocante a categoria WS, observa-se um maior equilíbrio em relação às contribuições que cabem a cada um dos sistemas, embora o sistema 2 ainda forneça a maior colaboração (Figura 34).

Durante a análise por contribuições por processo na contagem geral de cargas notou-se a influência negativa da contabilização de cargas para o processo de tratamento de efluentes. Nesse sentido, este apresenta a característica de ser multi-entradas, de modo que diversos processos marginais e, em vários níveis dentro da cadeia de produção da resina virgem de PET, da manufatura da garrafa, da sua reciclagem e da produção de energia elétrica como um todo acabam por contribuir com a geração de efluentes e, conseqüentemente a necessidade de tratamento pelo sistema responsável. Sendo assim, estes são tratados por meio de expansão do sistema, e segundo estudos que pautaram a elaboração do método WS, por Boulay et al 2011 (BOULAY et al., 2011a & 2011 b), o tratamento de água pode ser empregado para contornar a questão de escassez hídrica, na forma de perda de funcionalidade anteriormente proporcionada pela demanda deste recurso hídrico diante dos processos que são necessários. Em outras palavras, litros de água são considerados evitados por conta de água tratada, que possibilita a recuperação da sua funcionalidade e, portanto, sua disponibilidade para outras atividades

quaisquer que sejam necessárias e dependentes de água, ou seja, não seria necessária uma demanda extra de água, como via extração em poço, por exemplo. Essa prática como um todo, conferiu compensação de cargas ambientais.

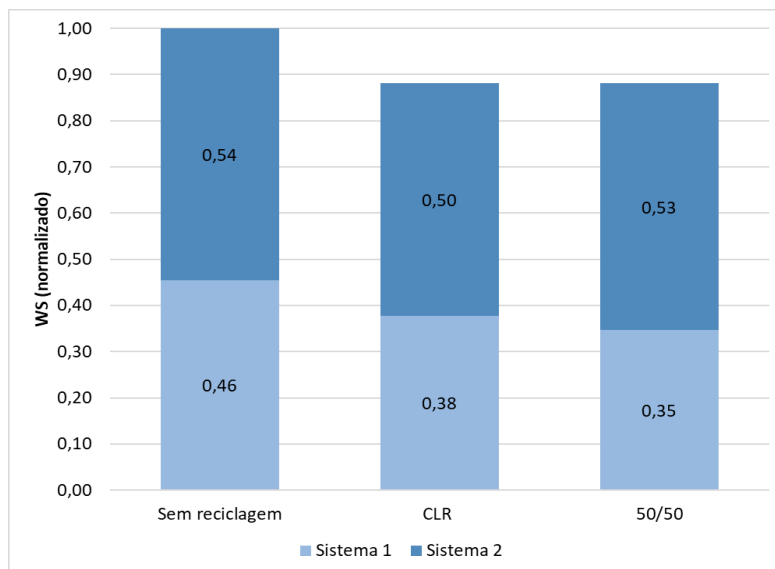


Figura 34. Desempenho ambiental da categoria de impacto WS entre sistemas

(iv) Formação de material particulado fino (PMF)

A Figura 35 retrata as contribuições para esta categoria, observa-se que maiores procedências couberam ao sistema 2 e foram de maneira mais decisiva em termos de impacto do que aquelas conferidas ao sistema 1. Na forma de mais de 74% do total do ônus para o cenário sem reciclagem de 77 a 80% para os cenários CLR e 50/50, respectivamente.

Conforme já observado por (Carvalho, 2022), os processos relacionados a mineração de Paládio são considerados processos multifuncionais que, por esse motivo foram tratados por meio de expansão de sistema neste estudo. A natureza dessa multifuncionalidade sucede por razão da sua produção que para cada 1,0 g Pd (sempre em termos médios) extraído gera outros 4,38 kg Cu, 3,16kg Ni (95% w/w), 343 mg Pt e 27,4 mg Rh, para as minas de Pd instaladas na Federação Russa, maior produtor mundial do metal (ALTHAUS et al., 2007). Essa produção como um todo onera fortemente o meio ambiente, sobretudo em virtude das demandas energéticas que predispõe: 36 MWh/kg Pd em termos de energia elétrica, que para estar disponível na área de lavra faz uso de geradores operados com óleo diesel; e, 169 GJ/kg de energia térmica, também proporcionada pela queima de combustíveis fósseis. Para tanto, foram identificados processos marginais para obtenção de todos os metais indicados acima, sendo as cargas ambientais que a eles estão associadas, descontadas de sua extração, e por conseguinte, também dos totais atribuídos as rotas avaliadas. No presente estudo, como diversos processos marginais fazem uso de Cobre essa contribuição acaba sendo significativa. De maneira que essa contribuição levou ao amortecimento dos impactos avaliados em todas as categorias, porém de forma mais expressiva para as contribuições relativas dos impactos de PMF e TAc.

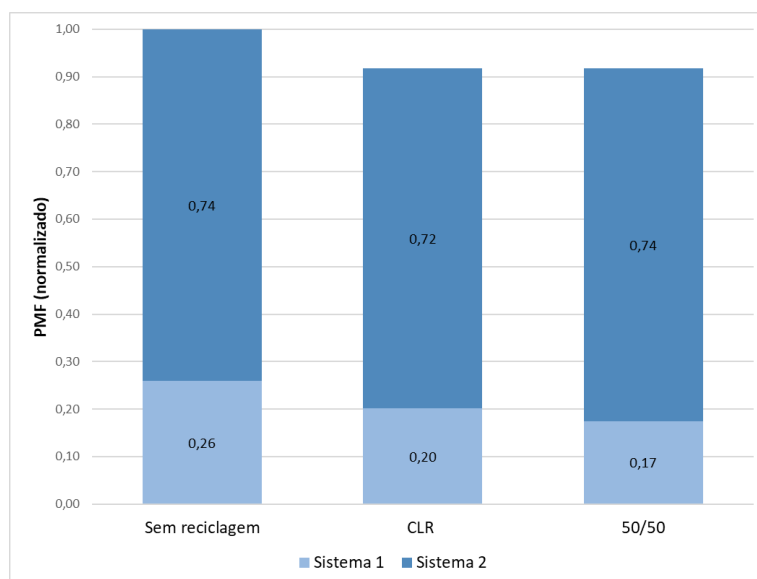


Figura 35. Desempenho ambiental da categoria de impacto PMF entre sistemas

(v) Ecotoxicidade de água doce (FWET)

Os resultados obtidos para a análise para FWET seguindo a abordagem ACVC, seguem a mesma tendência da abordagem ACVA, com maior balanço entre os sistemas nas contribuições relativas a cada sistema na computação total (Figura 36). Sendo inclusive mais predominante no sistema 1 na computação total, para o cenário que não considera reciclagem. Para a contribuição que cabe ao sistema 2 obteve-se um valor intermediário entre as lógicas OLR, sendo superior para a CLR em 7 % e inferior em 6% para o 50/50. De acordo coma discussão anteriormente apresentada, as contribuições da disposição final são mais significativas e ditam as atuações em termo discricionário por sistema como na análise global.

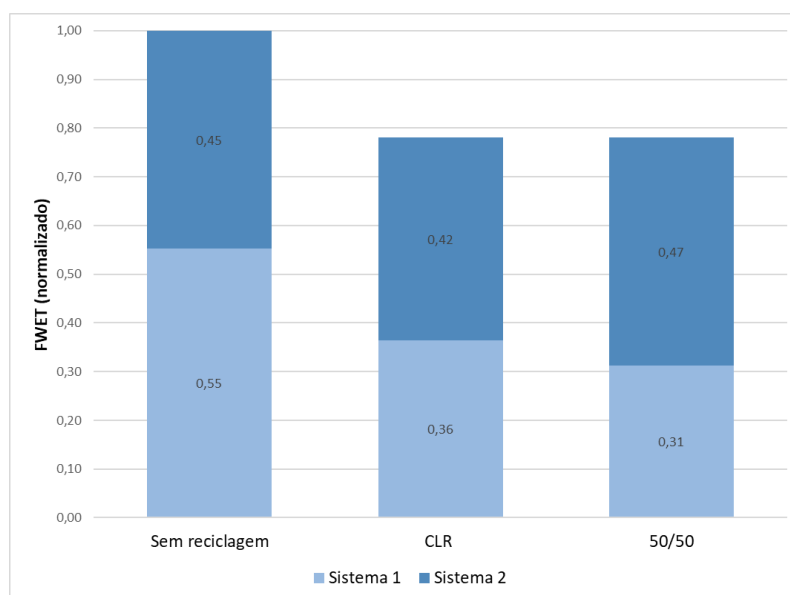


Figura 36. Desempenho ambiental da categoria de impacto FWET entre sistemas

Além das situações já comentadas de tratamento de multifuncionalidade por expansão do sistema como no caso da compensação que ocorre pelos processos do Pd, que acabaram influenciando na quantificação dos impactos ambientais, não foram observadas outras para esta categoria.

(vi) *Acidificação Terrestre (TAc)*

A Figura 37 apresenta o comparativo entre sistemas para os dois métodos que partem da lógica OLR para ACVC e da lógica sem OLR. Ao analisar os impactos relativos a esta categoria, observa-se a influência majoritária das contribuições do sistema 2 para a computação total das cargas. Além disso, nota-se que o método CLR foi o único que apresentou reduções tanto para o sistema 1 como para o sistema 2, além da redução global dos impactos que também é notada para o método 50/50. As causas principais desses impactos são as mesmas já apresentadas na seção da abordagem Atribucional. A principal distinção nesta análise, se relaciona a influência da compensação para as emissões em termo de kg SO₂ eq, para os procedimentos de multifuncionalidade concernente ao Pd, conforme já fora discutido para a categoria PMF.

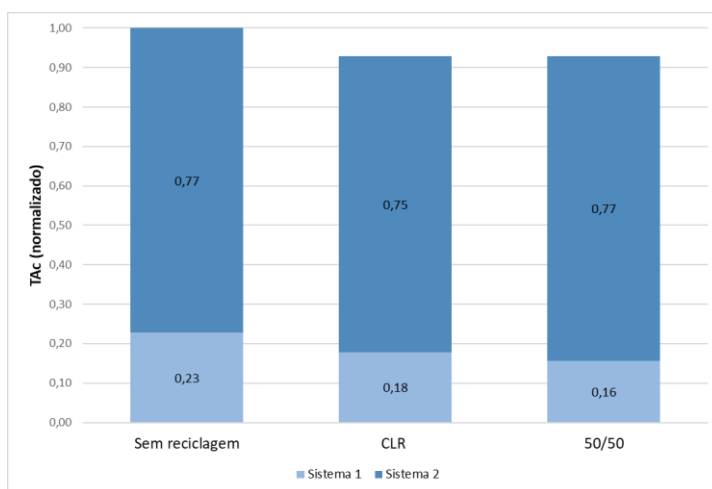


Figura 37. Desempenho ambiental da categoria de impacto TAc entre sistemas

5.2.2.2 COMPARAÇÃO VIA INDICADOR ÚNICO

A Tabela 16 apresenta o diagnóstico ambiental em âmbito global, a fim de verificar tendências de comportamento e possibilitar conclusões complementares as anteriores já explanadas para também a abordagem consequencial. O mesmo racional conferido a abordagem Atribucional se replica a esta, de forma que os valores intermediários de (*IANik*), bem como os resultados finais, na forma de (*IUi*) e também de Indicador Único Normalizado (*IUNi*) para as lógicas OLR e o arranjo sem reciclagem que tiveram desempenhos ambientais verificados por este

estudo. De forma correlata a abordagem anterior, os resultados da avaliação de GWP *uptake* não foram contabilizados para efeito de cálculo do indicador único.

Tabela 16. Descrição de valores intermediários (*IANik*) e finais dos Indicadores Únicos de (*IUi*) desempenho ambiental da produção de uma unidade de suporte de celular segundo as lógicas OLR e seus congêneres sem reciclagem

Categoria de impacto	Unidade	Valor do Impacto Ambiental		
		Sem reciclagem	OLR	
			CLR	50/50
GWP	g CO ₂ eq	426	336	336
PED	MJ	20,5	17,4	17,4
WS	L	5,55	4,43	4,43
PMF	mg PM 2.5 eq	0,385	0,317	0,317
FWET	g 1,4-DBeq	106	94,3	94,3
TAc	g SO ₂ eq	0,778	0,625	0,625
Índice Ambiental Normalizado para as categorias de impacto analisadas				
IAN_{GWP}	-	1,00	0,86	0,86
IAN_{PED}	-	1,00	0,86	0,86
IAN_{WS}	-	1,00	0,88	0,88
IAN_{PMF}	-	1,00	0,92	0,92
IAN_{FWET}	-	1,00	0,78	0,78
IAN_{TAc}	-	1,00	0,93	0,93
<i>(IUi)</i>	-	6,00	5,23	5,23
<i>(IUNi)</i>	-	1,00	0,87	0,87

A comparação via indicadores únicos para a abordagem ACVC além de comprovar o melhor desempenho ambiental dos arranjos OLR sobre o sem OLR, possibilita também a quantificação dessa supremacia, com 13% de redução de impactos na análise global de todas as categorias, conforme valores de $IUNi$. Outra inferência que pode ser comentada é que a categoria que possibilitou a maior redução de impactos foi a de FWET, enquanto a que apresentou menores reduções foi a TAc. Em relação aos dois métodos OLR para essa abordagem não se observa diferença no âmbito global, como apontado anteriormente.

A lógica da abordagem ACVC se mostra como uma visão complementar a anterior, ao tentar tornar os fenômenos de mercado, como variações de demanda e disponibilidade, a partir das interações entre diferentes sistemas via marginalidade inteligíveis. Nesse sentido, a ACV pode aprender da Economia, explorando percepções a partir das quais decisões sustentáveis podem auxiliar a ACV a se tornar mais padronizada e realista (BRANDÃO & WEIDEMA, 2014).

Em última análise em termos metodológicos, para ambas as abordagens é necessário a atualização e adaptações de procedimentos que possam ser cada vez mais capazes de analisar a conexão entre múltiplos ciclos, ou *loops*, ou ainda cascada, essas nomenclaturas refletem a lógica complexa que carrega a questão da circularidade de forma a considerar o espectro de qualidade, traduzido nos termos de *downcycling* ou *upcycling*, ponto chave nessa discussão. Alavancar formas de analisar a circularidade via ACV é fundamental para avanços na forma de diagnóstico ambiental cada vez mais sistêmicos e robustos.

Por fim, um tema que merece destaque diante de todo este arrazoado, diz respeito a elevada dependência por energia elétrica de processos produtivos por Manufatura Aditiva. Esse fator acabou carregando as cargas de todas as categorias ambientais tanto para a abordagem ACVA como para a ACVC, dada a relação de um produto com baixa massa que é gerado, a partir de uma atividade bastante dependente de consumo elétrico. Nesse sentido, cabe julgar em qual situação essa tecnologia se mostra realmente vantajosa em aspectos ambientais. O fator de escala acaba sendo decisivo nessa conjuntura. As Manufaturas Convencionais (MC) que tem a possibilidade de gerar vários produtos ao mesmo tempo, de forma muito mais rápida e em um único evento, podem amortecer consideravelmente esse impacto frente a questão energética. Contexto esse, que não se mostra possível para a impressão 3D, no qual a produção ocorre gerando somente uma peça de cada vez (dependendo de seu tamanho) e, demorando um tempo muito superior, cerca de muitas horas a depender do tamanho da peça e de seu preenchimento, em contraposição a poucos minutos para a MC. Embora a MA apresente a vantagem de não gerar resíduos consideráveis e não possuir a necessidade de moldes, como ocorre para as MC, que teriam que ser produzidos em etapas anteriores e, contabilizariam, notadamente, por consumos elétricos, mas que toda forma, acabam sendo amortecidos dado a usabilidade por muitos produtos, logo que estes moldes são reutilizáveis. Sendo assim, a utilização da tecnologia FDM dependente em sua maioria de matéria-prima plástica e, que se mostra restrita pela elevada necessidade energética, se justifica somente em aplicações em necessidades específicas ou situações de produtos personalizáveis, peças que não poderiam estar à disposição em escala comercial, ou em situações que a logística de transporte e distribuição conseguissem influenciar mais os impactos ambientais. Dessa forma, pensando em todos os processos envolvidos na rota análise por meio deste estudo de caso, a eletricidade foi o principal fator que contribui em termos de impactos ambientais e é, portanto, o maior limitador de desempenho ambiental. Essa questão motivou a análise e proposição de melhorias para esse *hot spot* como se ve no capítulo 5.3.3.

5.2.2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ACVC

A influência da distribuição das cargas ambientais comuns entre os sistemas 1 e 2 dentro da lógica OLR durante a modelagem metodológica consequencial foi constatada ser um tema

interessante na forma de Análise de Sensibilidade. Assim sendo, além das distribuições analisadas sob o método 50/50 e o CLR proposições intermediárias e outras, foram exploradas na confrontação com o Indicador Único Global, para as categorias de impacto avaliadas. Os resultados obtidos a partir dessa investigação são apresentados na Figura 38.

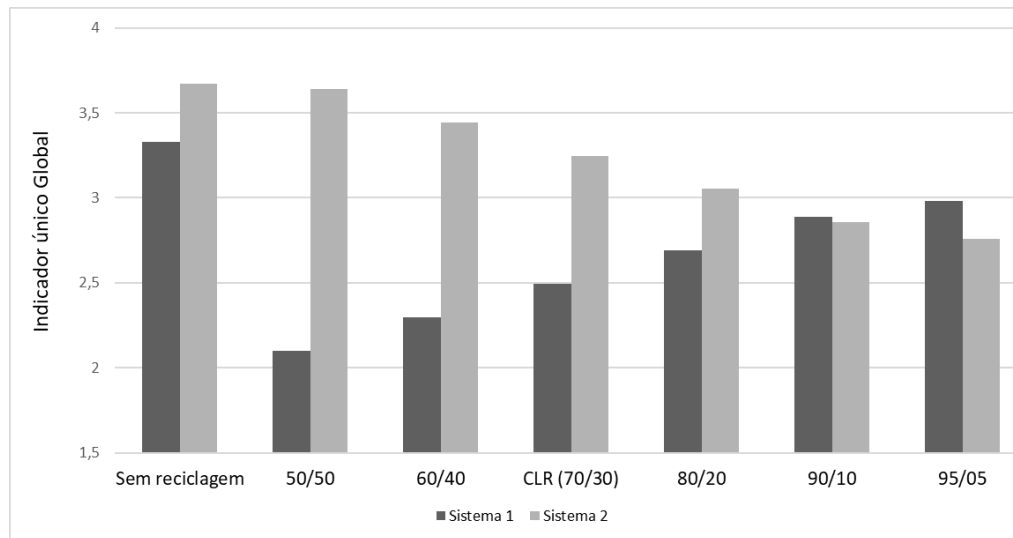


Figura 38. Resultados da Análise de Sensibilidade sobre a variação de partição de cargas entre sistemas em relação a composição do Indicador único Global.

A partir desta análise dois aspectos podem ser explorados. O primeiro deles diz respeito ao comparativo entre o cenário base, sem reciclagem, e os outros que seguem a lógica OLR. Observa-se nesse sentido que os resultados obtidos independentemente da distribuição, são sempre inferiores tanto em termos de sistema 1 como em termos de sistema 2. O segundo aspecto diz respeito as tendências observadas para a distribuição das cargas comuns entre os dois sistemas. Em vista da produção secundária ser altamente dominante, a distribuição paritária 50/50 foi em muito díspar entre estes dois sistemas. Com o aumento das porcentagens começa-se a perceber a maior equiparação a partir da distribuição 80/20 até somente na distribuição 90/10 ocorrer a inversão e somente na 95/05 ser observado a maior influência do sistema 1. De forma que, quase atribuindo todas as cargas ambientais comuns, qual sejam, dos processos de produção a resina virgem de PET, dos processos de reciclagem e da disposição final em aterro sanitário ao sistema 1, ou seja, restando ao sistema 2 praticamente somente as cargas proprietárias a ele, que poderia ser verificado paridade entre os dois ciclos analisados das garrafas e suporte de celular, segundo os FR estabelecidos.

Uma investigação dessa natureza é interessante ao pensar em melhores formas para atribuir os impactos ambientais, seguindo a dimensão da economia circular, de poder beneficiar sistemas que possuem maior circularidade e penalizar aqueles que não o fazem, levando em conta as contribuições comuns desses sistemas que se interrelacionariam a nível cascata.

5.2.3 PROPOSIÇÕES DE MELHORIAS

Como fora descrito anteriormente, a eletricidade é o principal fator contribuinte em termos de influências ambientais, contribuindo com a preponderância de contribuições relacionadas a todo o sistema avaliado e para todas as categorias de impacto. Portanto, é a maior restrição para todos os processos envolvidos no arranjo OLR da produção do produto suporte de celular via MA. Esta questão motivou a verificação da influência energética sob a rota em análise, na forma de proposta de melhorias para este hot spot para a abordagem atribucional e consequential, através dos métodos *Cut-Off* e 50/50. A utilização de apenas um método de cada uma das abordagens destes dois métodos se deve ao fato destes dois serem os mais conhecidos e explorados pela literatura e poderem ilustrar a visão sob a ótica da ACVA e ACVC.

Nesse sentido, conceberam-se duas alternativas eventuais com variações no grid BR, tomando por base o cenário que corresponde a matriz energética nacional de 2020 (EPE, 2021):

a) *OLR-A*: A primeira seria uma rede composta inteiramente por fontes renováveis. Este cenário foi ponderado na circunstância em que houvesse a migração de todas as fontes não renováveis para fontes renováveis. As variações percentuais em relação ao cenário atual foram propostas com base nas evoluções do mercado da matriz elétrica brasileira e para alternativas que teriam maior potencial de evolução ou estagnação nos próximos anos, mas com enfoque nas principais fontes de energia renovável. Assim, a composição da rede nacional que alimentaria todos os processos envolvidos na lógica OLR seria hidrelétrica 55%; Biomassa 10%; Eólica 25% e Solar 10%.

b) *OLR-B*: O segundo cenário foi projetado para explorar a capacidade do sistema de geração elétrica fotovoltaica. Trata-se de uma substituição parcial da fonte de abastecimento, focalizando apenas na empresa que produz o bem de consumo secundário. O restante de todo o sistema continuaria sendo alimentado em relação ao grid BR 2021 (Ano base 2020).

Os resultados obtidos para as categorias de impacto avaliadas foram descritos em termos normalizados para cada os dois cenários. A alternativa por fonte virgem foi novamente utilizada como referência para a composição do indicador único. A Figura 39 apresenta os valores em termos da abordagem ACVA via método *Cut-off*, enquanto a Figura 40 apresenta os valores para a abordagem ACVC via método 50/50.

Em respeito a discussão em termos de ACVA, verifica-se que houve reduções de impacto em todas as categorias avaliadas, excetuando a categoria FWET que apresentou uma ligeira elevação de valores em relação ao OLR base, ou seja, aquele cujo qual foi apresentado o diagnóstico ambiental nas seções prévias. De um modo geral, nota-se que a influência de energia elétrica é decisiva no âmbito de mitigações de impacto relacionados a rota de análise.

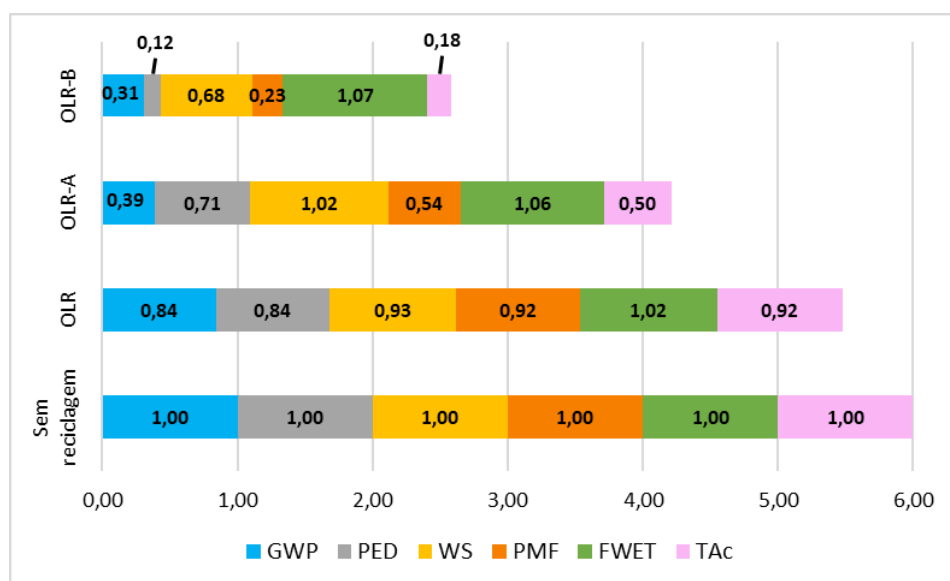


Figura 39. Desempenho ambiental da proposição de cenários de melhorias na perspectiva OLR Cut-Off.

Um grid energético eventual essencialmente renovável com as características da alternativa A, resulta em redução global de 30% dos impactos frente ao obtido pelo cenário base sem reciclagem e 21% de reduções frente estudo de caso conduzido. Isso sugere que a adoção de fontes eólica e fotovoltaica principalmente, em substituição a gás natural, derivados de petróleo, carvão e urânio, mas proporções desenhadas para aquele cenário, é capaz de reverter as contribuições anteriormente observadas. As categorias que apresentaram menores contribuições nesse sentido, foram GWP, TAc e PMF relacionadas as emissões atmosféricas. Esse é mais um indicativo de que as autoridades e especialistas no setor, devem conceber um planejamento adequado para o país, que além de elevar a segurança energética, caminhe na direção opostas àquela vista até aqui, de fossilização da matriz elétrica nacional.

A alternativa B aporta ainda maiores reduções com reduções globais de 57% em relação ao cenário base sem reciclagem e 48% em relação ao estudo de caso conduzido. Essa opção sugere que a implementação de uma fonte de baixo impacto como a fotovoltaica para solucionar o principal foco de contribuições para PED e TAc se mostrou um procedimento acertado. Além disso, atuar dessa forma quanto ao fornecimento de energia no âmbito sistêmico não se reverteria em ganhos tão significantes uma vez que, de fato, a demanda de eletricidade se concentra na produção do filamento de PET e na impressão 3D do produto propriamente.

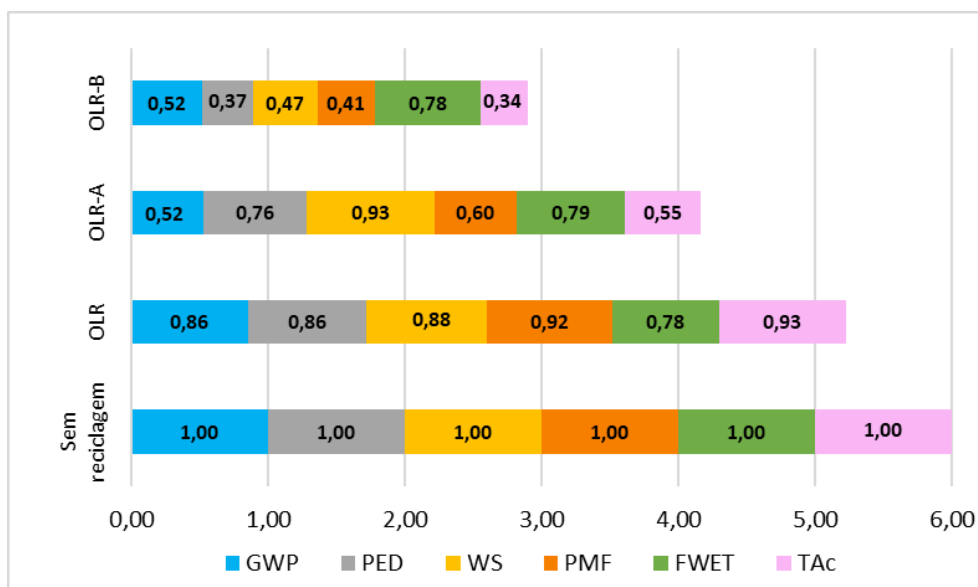


Figura 40. Desempenho ambiental da proposição de cenários de melhorias na perspectiva OLR 50/50.

Os resultados obtidos através dessa proposição de melhorias para a rota em análise segundo a visão ACVC pelo método 50/50 apresenta ao contrário da anterior, melhorias de fato, para todas as categorias avaliadas (Figura 40). Outra consideração relevante que difere da ACVA diz respeito a magnitude da redução dos impactos, tendo sido menos pronunciada para as categorias GWP, PED, PWF e TAc tanto para a alternativa A como para a B. Essa observação, reflete novamente as diferenças metodológicas que ambas as abordagens apresentam. Os outros pontos discutidos para a anterior se mantêm para esta.

No que diz respeito as reduções absolutas observadas, a alternativa A acumula reduções de 31% em relação ao cenário base sem reciclagem e 18% em relação ao OLR base, ao passo que a alternativa B apresenta reduções de 52% e de 39% no mesmo comparativo.

Em suma, a partir dessa proposição pode-se aferir que a atuação no aspecto de eletrificação por alternativas renováveis e ainda, em particular por vias eólicas e solares, cujas quais, mais influenciaram para a alternativa A e B, respectivamente, poderia se alcançar mitigações ainda mais consideráveis no arranjo OLR em termos de impactos ambientais para as categorias que foram avaliadas.

5.3 MCI APLICADO AO ESTUDO

No que concerne ao último desempenho que se pretende avaliar neste estudo a circularidade, é avaliada através do indicador MCI, conforme a descrição na seção 4.5. Os parâmetros e o resultado do MCI para o arranjo OLR proposto neste estudo, estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Valores obtidos para o MCI do estudo em análise

Parâmetros	Unidade de medida	Valor	Comentário
M	kg	0,03138	Massa total do produto - suporte de celular
Fr	%	100	Uso proveniente de material de fonte reciclada em totalidade na produção do suporte de celular
Fu	%	0	Não há uso de material proveniente de reuso
Fs	%	0	Não há uso material de fonte biológica
V	kg	0	Não há material proveniente por fonte virgem
Cc	%	0	Não há porcentagem de suporte de celular coletados e destinadas à compostagem após o uso
Ce	%	0	Não há porcentagem de suporte de celular coletados e destinadas à recuperação de energia após o uso
Cr	%	0	Não há porcentagem de suporte de celular coletados e destinadas à reciclagem após o uso (com base nas premissas que acompanham a análise no âmbito da ACV)
Cu	%	0	Não há porcentagem de suporte de celular coletado e destinadas ao reuso
Ec	%	0	Não há porcentagem de suporte de celular coletado e destinadas à reciclagem após seu uso
Ee	%	0	Não há porcentagem de suporte de celular coletado e destinadas à recuperação de energia após seu uso
Ef	%	85	Eficiência de 85% no processo de produção de material reciclado como matéria prima para o suporte de celular
L/ Lav	-	1	Vida média útil do suporte de celular considerado igual a vida média útil de suporte de celular de mesma categoria de produto.
U/Uav	-	1	Número médio real de unidades funcionais do suporte de celular considerado igual ao número médio real de unidades funcionais de suporte de celular de mesma categoria de produto
W	kg	0,034149	Quantidade de massa de resíduos irre recuperáveis associadas ao suporte de celular
W0	kg	0,03138	Quantidade de massa de resíduos destinadas a aterro ou recuperação de energia após seu uso
Wc	kg	0	Não há geração de resíduo gerado no processo de reciclagem das peças plásticas após o uso em fim de vida
Wf	kg	0,005538	Quantidade de resíduo gerado de fonte reciclada na produção do suporte de celular
LFI	-	0,5	-
X	-	1	Pois L/Lav e U/Uav são iguais a 1 calculado pela (Equação 7)
F(X)	-	0,9	Pois X igual a 1, calculado pela (Equação 8)
MCI _p	-	0,55	Calculado pela (Equação 9)

O valor obtido de MCI_p de 0,55 pode ser considerado médio em termos de circularidade, considerando que a escala avaliada é de no mínimo 0 e no máximo 1. Esse resultado observado está condicionado majoritariamente ao parâmetro Cr (a porcentagem do produto coletada e destinada à reciclagem), pela consideração de que este produto seria encaminhado ao reuso ou reciclagem novamente após fase de uso. É importante destacar que essa consideração foi utilizada para manter concordância com o desempenho ambiental via ACV, da aplicação da lógica OLR somente uma vez, a fim de poder verificar em completude todas as etapas que competem neste arranjo de berço

ao tumulo, sendo o descarte final em aterro sanitário a última etapa. Contudo, o bem de consumo produzido, suporte de celular, poderia sem dúvidas ser encaminhado novamente a reciclagem, prática que seria inclusive recomendada, pelo fato deste bem ser mono material e assim, facilitar os processos de triagem e reciclagem. A Manufatura Aditiva possui grande vantagem nesse sentido, pela possibilidade de realizar a manufatura de produtos através de somente um único material. Ademais, outro parâmetro que influenciou notadamente este resultado é o Fr (Porcentagem de matéria-prima de fontes recicladas no produto), em respeito ao uso em totalidade na produção do produto de material por fonte reciclada.

Em linhas gerais, como averígua-se a partir dos resultados obtidos o potencial de circularidade mensurada através deste indicador é vinculado principalmente ao uso de material proveniente por fontes de reaproveitamento e da perpetuação deste material para ciclos futuros. Essa ferramenta como forma de avaliação de circularidade pode ser bastante útil por conta da sua praticidade e facilidade em aplicação. Contudo, uma análise somente por essa dimensão pode ser considerada insuficiente para medir a circularidade através de uma visão mais holística sobre outros aspectos e não apenas com enfoque no material. Nesse caso, como sugerido na metodologia que pauta este indicador (EMF, 2015), é recomendado entrar em níveis adicionais de detalhes para poder contemplar informações sobre o produto, através, por exemplo, do uso em conjunto com outros indicadores complementares. Essa prática pode ser interessante em estudos que realizam o comparativo com diferentes propostas de design para proposição ou melhorias de produtos.

Assim sendo, embora este estudo não avalie o comparativo entre diferentes proposições ou melhorias para diferentes produtos, analisar a circularidade através do indicador MCI foi bastante positivo, de forma a complementar as análises de desempenho anteriormente conduzidas na avaliação do suporte de celular produzido por meio da lógica OLR proposta. Desse modo, esta análise possibilitou ainda a prospecção de cenários para esta lógica, como é discutido na seção a seguir.

Análise prospectiva para a circularidade aplicada ao estudo

Como análise adicional, a Tabela 18 fornece uma prospecção de cenários como forma de avaliar como se dá a influência de variações no arranjo proposto. Essa análise teve como direcionador dois movimentos, o primeiro deles verificar a variação do uso de material virgem na composição do produto obtido em três percentagens distintas (cenários 1-3).

O segundo visa verificar a eventualidade do produto gerado ser destinado em sua totalidade a reciclagem, ou seja, continuar como matéria-prima na produção de um novo produto e, qual seria a influência da eficiência dessa segunda reciclagem. A Tabela 17 apresenta a eficiência de 85% do processo de reciclagem para o PET, valor este obtido por dados primários através da participação de uma empresa do setor.

Assim, para essa segunda reciclagem (reciclar o produto gerado com material reciclado) foi pensado em taxas de eficiência de processo inferiores a essa obtida, por conta do produto suporte de celular já ter sido produzido por material reciclado. Os valores escolhidos foram respaldados por processos de reciclagem conduzidos para esse polímero, disponíveis no estudo de Shen et al., (2010) (cenários 5 e 6).

Tabela 18. Proposição de cenários para estudo de circularidade através do indicador MCI

Cenário	Material Virgem (%)	Eficiência da reciclagem em fim de vida (%)
base	0	0
1	75	0
2	50	0
3	25	0
4	0	75
5	0	80

A Figura 41 apresenta os resultados obtidos em termos de circularidade através do indicador MCI. Nota-se como era previsto, a influência considerável da utilização de material proveniente de fonte que não é de reuso, de reciclagem ou biológica, de modo progressivo na diminuição do indicador. Por fim, encaminhar o produto gerado em um cenário de fim de vida à reciclagem novamente e, sob essas taxas de eficiência de processo, poderia alavancar a circularidade, através do aumento do indicador, em até 70%. A mensuração de aspectos técnicos é fundamental para avaliação da circularidade, assim como a contabilização de forma mais sistêmica de outros elementos que compõe o ciclo de vida destes cenários, que foram propostos a título de avaliação prospectiva para efeito de tomada de decisão de forma mais respaldada.

Sendo assim, em linhas gerais, dada a histórica descentralização do parque industrial brasileiro (concentrado nas regiões sudeste e sul), vê-se necessário a ampliação de localidades que realizam a reciclagem de forma mais distribuída e em particular, nas demais regiões do país, e ainda, com estrutura e tecnologia adequadas para geração de materiais reciclados com maior qualidade e mitigar os efeitos de *downcycling*.

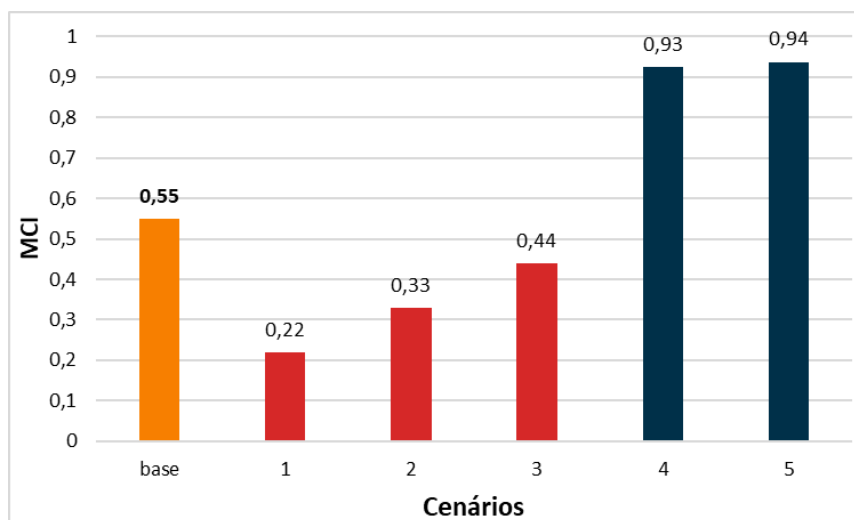


Figura 41. Relação entre e os cenários avaliados e o MCI

Novas legislações e pressões (internas e externas) por materiais sustentáveis (incluindo os reciclados) exigirá bastante dos fabricantes de produtos de rápido descarte, em especial aqueles que tem aplicações que ainda não encontraram alternativas factíveis de substituição. Assim, o setor deve ser capaz de atender continuamente e de forma crescente esta demanda. Portanto, a estruturação do setor de logística reversa, somada a reciclagem de plásticos que gere resinas recicladas com melhor qualidade e a integração com os setores de produção de bens de consumo deve ser promovida por incentivos públicos e privados, conjuntamente com a população, para que se atinja maior circularidade como um todo a nível nacional.

6. CONCLUSÕES

Nesse presente estudo os propósitos previamente vislumbrados de avaliar a lógica de reciclagem em ciclo aberto (OLR), do polímero poli (tereftalato de etileno) (PET) e a produção de um produto a partir da tecnologia Manufatura Aditiva em termos ambientais, circulares e técnicos foi alcançado. As tradicionais garrafas PET foram o produto primário considerado para esta análise, enquanto o produto secundário escolhido foi um suporte para telefone celular.

Sob o ponto de vista da análise ambiental através da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi demonstrado desempenhos ambientais superiores para 5 das 6 categorias de impacto avaliadas, com reduções globais de 10 a 15% ao serem confrontadas com arranjos que não consideram a reciclagem na produção dos dois produtos. E equivalentes, para a categoria Ecotoxicidade aquática (FWET), a partir dos métodos ACV- Atribucional. Os métodos da abordagem ACV-Consequencial também confeririam resultados positivos, com reduções globais de 13%, para esse mesmo comparativo.

Houve uma grande influência energética nas contribuições totais nos processos envolvidos na fabricação propriamente dita do suporte para celular, principalmente nos processos de extrusão de filamentos e impressão FDM para todas as categorias. Diante dessa situação, foram avaliadas duas propostas de melhoria da rota em análise, com foco em mudanças no fornecimento de energia ao sistema, todas elas baseadas em variações da matriz energética brasileira em termos de composição. No comparativo com o diagnóstico avaliado para o estudo de caso que já seguiria a lógica OLR, ambos os cenários apresentaram melhor desempenho em ao menos 4 das 6 categorias, para a abordagem ACVA, empregando o método Cut-Off. Esta mesma análise, porém, sob a perspectiva ACVC e, seguindo o método 50/50, conferiu desempenhos superiores para todas as categorias avaliadas.

Este estudo reforça a importância da abordagem holística, expressa pela abordagem do berço ao túmulo para mensurar os impactos ambientais de processos antropogênicos proporcionada pela técnica de ACV. Na dimensão Atribucional com um método representando as cargas ambientais de apenas um ciclo de vida e dos outros três refletindo as cargas ambientais do ciclo de vida anterior do material. Na dimensão consequencial outras considerações puderam ser verificadas a partir da expansão de sistema, particular deste arranjo metodológico. Assim, na ótica macro empregar ambas as abordagens e, ainda na ótica micro dentro de cada uma, empregando diferentes perspectivas na análise, pode ser oportuno a fim de obter maior complementação na análise. Em vistas de proporcionar melhores políticas de gestão de resíduos, auxiliando no processo estratégico de tomada de decisão pelos diferentes agentes envolvidos na interligação de sistemas circulares que são cada vez mais incentivados.

Em relação ao desempenho técnico, o produto produzido demonstrou boa estabilidade térmica ao longo de todas as etapas de processamento ao qual foi submetido. A diminuição de viscosidade intrínseca observada entre as diferentes etapas de processamento não comprometeu a fluidez do material durante a etapa de impressão 3D, e nem sua qualidade final de acordo com as propriedades mensuradas. Quanto ao aspecto mecânico, os resultados revelam que o bem obtido é bastante satisfatório do ponto de vista de deformação a ruptura e resistência a tração, com 7,64% e 37,7 Mpa, respectivamente. Assim, no que se refere a esta dimensão de análise, o filamento gerado de PET reciclado pós-consumo poderia inclusive ser empregado em uma gama variada de outras aplicações além daqui explicitada, de modo a expandir o mercado de reciclagem em ciclo aberto com aplicações de maior valor agregado na perspectiva nacional.

Por fim, no que concerne o desempenho circular através do indicador MCI foram observados resultados medianos para o arranjo deste estudo de caso. Muito embora, há potencial de melhoria de até 70%, caso fosse considerado a reciclagem novamente deste produto e não a disposição final em aterro sanitário.

Em suma, os achados mostraram um arranjo tecnicamente viável, com grandes potenciais de circularidade e ambientalmente mais favorável para a rota proposta neste estudo de caso, e que poderia ser uma alternativa propícia para expandir a reciclagem no Brasil. Inclusive podendo contribuir com maior circularidade para o PET, ao empregar a tecnologia de Manufatura Aditiva como alternativa na revalorização de produtos. Outros materiais plásticos também poderiam ser explorados dentro dessa lógica.

7. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como proposição a projetos futuros, recomenda-se estender o escopo para uma análise também das variáveis econômicas do produto gerado a partir da rota de reciclagem em ciclo aberto, empregando a Manufatura Aditiva, com as diversas abordagens possíveis de Custo de Ciclo de Vida (LCC). Outro pilar que ainda poderia ser explorado é o enfoque social através da Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV) análise interessante para verificar formas de atuação mais eficazes para todos os agentes envolvidos na reciclagem de plásticos. Estas análises poderiam ser correlacionadas aos resultados dos desempenhos ambientais, técnicos e de circularidade. De maneira que estes resultados poderiam ser inclusive cruzados através de métodos de decisão multicritério e possibilitar mais respaldo para a tomada de decisão.

A ACV através das abordagens atribucionais e consequenciais ainda se encontram em processo de aprimoramento, sobretudo dentro do âmbito da economia circular, que almeja cada vez mais a perpetuação de recursos e a interconexão de sistemas. Assim sendo, recomenda-se em termos metodológicos de aplicação da ACV através de estudos OLR, avaliar sob procedimentos mais recentes como as diferentes perspectivas que foram abordadas deste trabalho, por exemplo as sugeridas por Tanguay et al., (2021), entre outros trabalhos.

8. REFERÊNCIAS

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET. **Décimo primeiro CENSO da reciclagem do PET no Brasil.** São Paulo, 2019. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acessado em: 30 nov.2021

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **PERFIL 2020.** Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2020/> Acesso em: 30 nov. 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ABNT ABNT NBR ISO 14044. **Gestão Ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida:** requisitos e orientações. São Paulo: ABNT, 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ABNT ABNT NBR ISO 14049. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida** — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário. São Paulo: ABNT,2014.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** 2021.

ANTOON PAR. Polymers | Intrinsic Viscosity Measurements for Quality Control of PET. Acesso em 02 de Novembro de 2022 < <https://www.anton-paar.com/corp-en/services-support/document-finder/application-reports/polymers-intrinsic-viscosity-measurements-for-quality-control-of-pet/>>

AWAJA, F.; PAVEL, D. Recycling of PET **European Polymer Journal**, jul. 2005.

BANNACH, G., PERPÉTUO, G. L., TADEU, É., CAVALHEIRO, G., CRISTINA, C., CAVALHEIRO, S., ROCHA, R. R., MONSEHOR, R., & PEREIRA, B. EFEITOS DA HISTÓRIA TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DO POLÍMERO PET: UM EXPERIMENTO PARA ENSINO DE ANÁLISE TÉRMICA. InQuim. Nova (Vol. 34, Issue 10). 2011.

BASF 3D PRINTING SOLUTIONS BV. **Technical data sheet** Ultrafuse rPET 2019. (Ultrafuse rPET Technical data 3.2).

BASSI, S.A. et al. A life cycle assessment framework for large-scale changes in material circularity. **Waste Management**, v. 135, p. 360–371, 1 nov. 2021.

BASSI, S.A. et al. Environmental and Socioeconomic Impacts of Poly(ethylene terephthalate) (PET) Packaging Management Strategies in the EU. **Environmental Science and Technology**, v. 56, n. 1, p. 501–511, 4 jan. 2022.

BATAINEH, K. M. Life-Cycle Assessment of Recycling Postconsumer High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, 2020.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A.-M. The hitch hikers’ guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application. **Sdewen: Studentlitteratur**, 2004.

BERKOWITZ, S. Viscosity-Molecular Weight Relationships for Poly(ethylene Terephthalate) in Hexafluoroisopropanol-Pentafluorophenol Using SEC-LALLS. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 29, p. 4353–4361, 1984.

- BRANDÃO, M. et al. Consequential Life Cycle Assessment: What, How, and Why? In: **Encyclopedia of Sustainable Technologies**. Elsevier, 2017. p. 277–284.
- BRÄNDSTRÖM, J., & SAIDANI, M. Comparison between circularity metrics and LCA: A case study on circular economy strategies. **Journal of Cleaner Production**, 371. 2022.
- BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E. H.; **Polymer Handbook**, 3rd ed., John Willey: New York, 1980.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares**. Brasília, DF: MMA. 2022.
- BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.
- BRANDÃO, M.; WEIDEMA, B. What can LCA learn from economics? **LCA XIV**, v. 2050, p. 31–36, 2014.
- BOULAY, A. M., BOUCHARD, C., BULLE, C., DESCHÊNES, L., & MARGNI, M. Categorizing water for LCA inventory. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 2011a.
- BOULAY, A.-M.; BULLE, C.; BAYART, J.-B.; DESCHENES, L.; MARGNI, M. Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health **Environmental Science & Technology**, 45, 8948-8957. 2011b.
- CARVALHO, M. K. Avaliação da viabilidade ambiental da obtenção de ácido fórmico a partir de rota envolvendo tecnologia de Carbon Capture and Usage (CCU). Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 118p. 2022
- CEBRI – **Centro Brasileiro de Relações Internacionais**. Economia Circular: Os desafios presentes no Brasil. 2020.
- CHEHEBE, José Ribamar B. Análise do Ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 104 p. 1998.
- CHILTON, T., BURNLEY, S., & NESARATNAM, S. A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET. <**Resources, Conservation and Recycling**, 54 (12), 1241–1249. 2010.
- CHOUDHARY, K.; SANGWAN, K. S.; GOYAL, D. Environment, and economic impacts assessment of PET waste recycling with conventional and renewable sources of energy. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 422–427, 2019.
- COLORADO, H. A.; VELÁSQUEZ, E. I. G.; MONTEIRO, S. N. Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 8221–8234, 2020.
- CRUZ SANCHEZ, F. A. et al. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121602, 2020.

- CURRAN, M. A. (Ed.). Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products. **John Wiley & Sons**, 2012.
- DA SILVA SPINACÉ, Márcia Aparecida; DE PAOLI, Marco Aurelio. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Quim. Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.
- DEMIREL, B.; YARAŞ, A.; ELÇIÇEK, H. **Crystallization Behavior of PET Materials** *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt.* [s.l: s.n.].
- DOKA G. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. ecoinvent report No. 13. **Swiss Centre for Life Cycle Inventories**, Dübendorf, 2009
- EKVALL, T. A market-based approach to allocation at open-loop recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 29, n. 1–2, p. 91–109, 2000.
- EKVALL, T. Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. In: **Sustainability Assessment at the 21st century**. IntechOpen, 2019.
- EKVALL, T.; BJÖRKLUND, A.; SANDIN, G. **Modeling recycling in life cycle assessment**. Project Report. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344364006> 2020.
- EKVALL, T.; TILLMAN, A. M. Open-loop recycling: Criteria for allocation procedures. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 2, n. 3, p. 155–162, 1997.
- EKVALL, T.; WEIDEMA, B. P. System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 3, p. 161–171, 2004.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. A circular economy for plastic in which it never becomes waste. **New Plastics Economy**. 2017.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circularity Indicators: An Approach to Measuring circularity - Methodology**, 2015
- F3D. Filamento ABS Preto Reciclado 1,75mm 1Kg Para Impressora 3D. Disponível em: <https://www.filamentos3dbrasil.com.br/produtos/filamento-abs-preto-reciclado-175mm-1kg-para-impressora-3d/#:~:text=Total%3A%20R%2446%2C90%20R%2442%2C21> Acesso em 16 nov. 2022.
- FANTKE, P.; et al. Health effects of fine particulate matter in life cycle impact assessment: Conclusions from the Basel guidance workshop. **Int. J. Life Cycle Assess.**, 20, 276–288. 2015.
- FERREIRA F. F. Estudo e desenvolvimento de filamento de PET reciclado para impressoras 3D FDM. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto-MG, p 84. 2020
- FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009.
- FRISCHKNECHT, R. et al. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 7, p. 957–969, 24 jul. 2015.

FRISCHKNECHT, R. LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 7, p. 666–671, ago. 2010.

FRÖHLICH T. An Eco-profile and Environmental Product Declaration of the PET Manufacturers in Europe: Polyethylene Terephthalate (PET) (Bottle Grade). polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade, Allocation at the point of substitution. **Plastics Europe. Ecoinvent database version 3**. 2017

FUNDAÇÃO ESPAÇO ECO. O pensamento sistêmico a partir da Avaliação de Ciclo de Vida. Disponível em: <https://www.espacoeco.org.br/o-pensamento-sistemico-a-partir-da-avaliacao-de-ciclo-de-vida/> Acesso em 21 de jan, 2022.

GAIKWAD, V. et al. Transformation of E-Waste Plastics into Sustainable Filaments for 3D Printing. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 6, n. 11, p. 14432–14440, 2018.

GARCIA, F. L. et al. **Environmental performance of additive manufacturing process – an overview** **Rapid Prototyping Journal**. Emerald Group Holdings Ltd. 2018.

GEYER, R. et al. **Common Misconceptions about Recycling** **Journal of Industrial Ecology** Blackwell Publishing, 2015.

GILENO, L. A.; TURCI, L. F. R. Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes. **Cleaner Environmental Systems**, v. 3, p. 100057, dez. 2021.

GILENO, L. Avaliação Do Ciclo de Vida da reciclagem de garrafas PET em contexto brasileiro: Rotas B2B (Bottle-to-Bottle) E B2F(Bottle-to- Fiber). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alfenas. 2020

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. Disponível em: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/> . Acesso em: 02 fev. 2022.

GOMES, T. S.; VISCONTE, L. L. Y.; PACHECO, E. B. A. V. Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate Packaging: An Overview. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, n. 3, p. 533–548, 2019.

GONÇALVES-DIAS FRANCELINO LOPES SYLMARA; TEODÓSIO DE SOUSA DOS SANTOS ARMINDO. Structure of the reverse chain: “ways” of PET packing. **Produção**, v. 16, n. 3, p. 429–441, 2006.

GONÇALVES & BARROSO. A economia circular como alternativa à economia linear. **XI Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe**. 2019.

GUINÉE, J. B. et al. **Handbook on life cycle assessment**. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. 2002.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R.K.; OLSEN, S. I. Life cycle assessment. **Springer International Publishing**, Cham. 2018.

HISCHIER R. Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper, Stretch Blow Moulding, CH, Allocation at the point of substitution. **Ecoinvent database version 3**. 2007

- HISCHIER R. Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Papers. ecoinvent-Report No. 11, **Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf**, 2007.
- HISCHIER, R. et al. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2 (2010). **Ecoinvent Report No. 3**, 176 p. 2010. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf>.
- HÖHNE, G. W. H. HEMMINGER, W., FAMMERSHEIM H-J. Differential Scanning Calorimetry- An Introduction for Practitioners, 1st ed., Springer, Verlag Berlin Heidelberg-Alemanha, 1996.
- HORODYTSKA, O.; KIRITSIS, D.; FULLANA, A. Upcycling of printed plastic films: LCA analysis and effects on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 1–12, 2020.
- HUBO, S., DELVA, L., VAN DAMME, N., RAGAERT, K. Blending of recycled mixed polyolefins with recycled polypropylene: effect on physical and mechanical properties. In: Holzer, C. (Ed.), **Polymer Processing Society**, Graz Austria. 2015.
- HUIJBREGTS, M. A. J. et al. **ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report 1: Characterization**. [s.l.: s.n.].
- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2013.
- KALUNGA. Filamento ABS para impressora 3D, Azul, AB-AZ-1, Voolt - PC 1 UN. Disponível em: <https://www.kalunga.com.br/prod/filamento-abs-para-impressora-3d-azul-ab-az-1-voolt-pc-1-un/798168> Acesso em 16 de nov. 2022.
- KHOSRAVANI, M. R.; REINICKE, T. On the environmental impacts of 3D printing technology. **Applied Materials Today**, v. 20, p. 100689, 2020.
- KIM, S.; HWANG, T.; LEE, K. M. Allocation for cascade recycling system. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 2, n. 4, p. 217–222, 1997.
- KLÖPPFER, W. Allocation Rule for Open-Loop Recycling in Life Cycle Assessment - A Review. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, n. 1, p. 27–31, 1996.
- KLÖPPFER, W. Life Cycle Assessment From the Beginning to the Current State. **Environ. Sci & Pollut. Res**, v. 4, n. 4, p. 223–228, 1997.
- KORLEY, L. T. J. et al. Toward polymer upcycling—adding value and tackling circularity. **Science**, v. 69, n. July, p. 66–69, 2021.
- KOUSEMAKER, T. M.; JONKER, G. H.; VAKIS, A. I. LCA Practices of Plastics and Their Recycling: A Critical Review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 8, p. 3305, 2021.
- KUMAR, R., VERMA, A., SHOME, A., SINHA, R., SINHA, S., Jha, P. K., KUMAR, R., KUMAR, P., SHUBHAM, Das, S., SHARMA, P., & PRASAD, P. V. V. Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions. In **Sustainability** (Switzerland) (Vol. 13, Issue 17). MDPI. 2021.

KREIGER, M. A. et al. Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 90–96, 2014.

LEON GARCIA, F. et al. Comparative LCA of conventional manufacturing vs. additive manufacturing: the case of injection moulding for recycled polymers. 2021.

LESLIE, H. A., VAN VELZEN, M. J. M., BRANDSMA, S. H., VETHAAK, A. D., GARCIA-VALLEJO, J. J., & LAMOREE, M. H. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. **Environment International**, 107199. 2022.

LI, T. et al. 3D PRINTING – A REVIEW OF TECHNOLOGIES, MARKETS, AND OPPORTUNITIES FOR THE FOREST INDUSTRY. **Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes**, v. 5, n. 2, 2017.

LONCA, G. et al. Assessing scaling effects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the USA PET market. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 162, n. December 2019, p. 105013, 2020.

LORENZETTI C, Manaresi P, Berti C, Barbiroli G (2006) Chemical Recovery of Useful Chemicals from Polyester (PET) Waste for Resource Conservation: A Survey of State of the Art. *J Polym Environ*

MACLEOD, M. et al. The global threat from plastic pollution. **Science (New York, N.Y.)**, v. 373, n. 6550, p. 61–65, 2021.

MANCINI, S. D.; MATOS, I. G.; ALMEIDA, R. F. Determinação da variação da viscosidade intrínseca do poli (tereftalato de etileno) de embalagens. **Polímeros**, v. 14, n. 2, p. 69–73, jun. 2004.

MARATHE, K. V.; CHAVAN, K. R.; NAKHATE, P. **Life Cycle Assessment (LCA) of PET Bottles**. [s.l.] Elsevier Inc., 2019.

MARTIN, E. J. P. et al. Life cycle comparative assessment of pet bottle waste management options: A case study for the city of Bauru, Brazil. **Waste Management**, v. 119, p. 226–234, 2021.

MESQUITA, L. et al. **Inventário do ciclo de vida do pellet PET-PCR (pós-consumo reciclado) segundo as condições brasileiras**. IV CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO PELO CICLO DE VIDA 9 a 12 de novembro de 2014 São Bernardo do Campo – SP – Brasil. 2014.

MIKULA, K. et al. 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 10, p. 12321–12333, 2020.

MOHAMMED, M. I. et al. A low carbon footprint approach to the reconstitution of plastics into 3D-printer filament for enhanced waste reduction. **KnE Engineering**, v. 2, n. 2, p. 234, 2017.

MOORE, C. C. S.; NOGUEIRA, A. R.; KULAY, L. Environmental and energy assessment of the substitution of chemical fertilizers for industrial wastes of ethanol production in sugarcane cultivation in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 4, p. 628–643, 1 abr. 2017.

MUÑOZ, V. G. et al. Evaluation of the circularity of recycled pla filaments for 3D printers. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 24, p. 1–12, 2020.

NATIONAL COUNCIL FOR AIR AND STREAM IMPROVEMENT, INC. (NCASI). Methods for open-loop recycling allocation in life cycle assessment and carbon footprint studies of paper products. Technical Bulletin No. 1003. Research Triangle Park, N.C.: **National Council for Air and Stream Improvement, Inc.** 2012.

NICHOLSON, A. L. et al. End-of-life LCA allocation methods: Open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions. **International Symposium on Sustainable Systems and Technology, ISSST '09 in Cooperation with 2009 IEEE International Symposium on Technology and Society, ISTAS**, n. May, 2009.

NOGUEIRA, A. R. Avaliação do desempenho ambiental de biodiesel produzido a partir de gordura animal segundo diferentes abordagens para situações de multifuncionalidade. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2018.

NORRIS, Cameron. **Digital Blacksmiths Network - Changing the future of manufacturing in the developing world**. HackSpace, Issue #07, p. 52-57, 2018.

PAES, X. M. Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos: Integração de Indicadores Ambientais e Econômicos por meio da Avaliação do Ciclo de Vida. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de São Paulo. 2018.

PAKKANEN, J. et al. About the use of recycled or biodegradable filaments for sustainability of 3D printing: State of the art and research opportunities. **Smart Innovation, Systems and Technologies**, v. 68, p. 776–785, 2017.

PELLETIER, N. et al. Rationales for and limitations of preferred solutions for multi-functionality problems in LCA: is increased consistency possible? **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 1, p. 74–86, 1 jan. 2015.

PEÑA, C. et al. Using life cycle assessment to achieve a circular economy. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 2, p. 215–220, 1 fev. 2021.

PENNINGTON, D. W. et al. **Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice Environment International** Elsevier Ltd, 2004.

PINHO, A. C., AMARO, A. M., & PIEDADE, A. P. 3D printing goes greener: Study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components. **Waste Management**, 118, 426–434. 2020.

PINTER, E., WELLE, F., MAYRHOFER, E., PECHHACKER, A., MOTLOCH, L., LAHME, V., GRANT, A., & Tacker, M. Circularity study on pet bottle-to-bottle recycling. **Sustainability (Switzerland)**, 13(13). 2021.

PLASTICSEUROPE. Plastics—The Facts 2022. An Analysis of European Plastics Production, Demand and WasteData. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/> (Acesso em 05 dez 2022)

RAGAERT, K., DELVA, L., & VAN GEEM, K. Mechanical, and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management** (Vol. 69, pp. 24–58). Elsevier Ltd. 2017.

RAGUSA, A., SVELATO, A., SANTACROCE, C., CATALANO, P., NOTARSTEFANO, V., CARNEVALI, O., PAPA, F., RONGIOLETTI, M. C. A., BAIOTTO, F., DRAGHI, S.,

D'AMORE, E., RINALDO, D., MATTA, M., & GIORGINI, E. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. In **Environment International** (Vol. 146). Elsevier Ltd. (2021).

RAMÍREZ. P.K.S. **Análise de Métodos de Alocação utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida**. [s.l: s.n.].

REBITZER, G. et al. **Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications** *Environment International* Elsevier Ltd, , 2004.

RIGAMONTI, L., & MANCINI, E. Life cycle assessment and circularity indicators. In **International Journal of Life Cycle Assessment** (Vol. 26, Issue 10, pp. 1937–1942). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. 2021.

ROMÃO, W. S. A. S. M. P. M.-A. Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2009.

SAADE, M. R. M.; YAHIA, A.; AMOR, B. How has LCA been applied to 3D printing? A systematic literature review and recommendations for future studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118803, 2020.

SAIDANI, M., YANNOU, B., LEROY, Y., CLUZEL, F., & KENDALL, A. A taxonomy of circular economy indicators. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 207, pp. 542–559). Elsevier Ltd. 2019.

SANTANA, L. et al. A comparative study between PETG and PLA for 3D printing through thermal, chemical, and mechanical characterization. **Revista Materia**, v. 23, n. 4, 2018.

SARAIVA, A. B.; SOUZA, R. G.; VALLE, R. A. B. Comparative lifecycle assessment of alternatives for waste management in Rio de Janeiro – Investigating the influence of an attributional or consequential approach. **Waste Management**, v. 68, p. 701–710, 1 out. 2017.

SCHNEEVOGT, H. et al. Sustainability in additive manufacturing: Exploring the mechanical potential of recycled PET filaments. **Composites and Advanced Materials**, v. 30, p. 263498332110000, 2021.

SCHRIJVERS, D. L.; LOUBET, P.; SONNEMANN, G. An axiomatic method for goal - dependent allocation in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 0123456789, p. 1223–1235, 2021.

SCHRIJVERS, D. L.; LOUBET, P.; SONNEMANN, G. Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 7, p. 976–993, 2016a.

SCHRIJVERS, D. L.; LOUBET, P.; SONNEMANN, G. Critical review of guidelines against a systematic framework with regard to consistency on allocation procedures for recycling in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**. Springer Verlag, , 1 jul. 2016b.

SCHRIJVERS, D.; LOUBET, P.; SONNEMANN, G. Archetypes of goal and scope definitions for consistent allocation in LCA. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 14, 1 jul. 2020.

SEÇIL K. D. Life Cycle Assessment of PET Bottle. Dokuz Eylül University Dissertação de mestrado. 2008.

SHAH, J. et al. Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 9–12, p. 3679–3693, 1 out. 2019.

SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. K. Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 1, p. 34–52, 2010.

SILVA, G.A.; KULAY, L.: Avaliação do Ciclo de Vida. In: VILELA, A.; DEMAJOROVIC, J. Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações. 4^a. Ed. São Paulo: Editora SENAC, 2019.

SOUSA, S. R., SOARES, S. R., MOREIRA, N. G., SEVERIS, R. M., & de SANTA-EULALIA, L. A. Internal Normalization Procedures in the Context of LCA: A Simulation-Based Comparative Analysis. **Environmental Modeling & Assessment**, 26, 271–281. 2021.

SOUZA JUNIOR H. R. A. **Definição de métodos de Alocação para Reciclagem em ciclo aberto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

SPASOJEVIĆ P.M, PANIĆ V V., DŽUNUZOVIĆ J V., et al High-performance alkyd resins synthesized from postconsumer PET bottles. *RSC Adv* 5:62273–62283. 2015.

STATISTA RESEARCH DEPARTMENT. Projected global additive manufacturing market growth between 2020 and 2026. **Statista**, 17 jun 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/284863/additive-manufacturing-projected-global-market-size/> Acesso em 23 de janeiro de 2022.

STATISTA RESEARCH DEPARTMENT. Projected global additive manufacturing market growth between 2020 and 2026. **Statista**, 17 jun 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/284863/additive-manufacturing-projected-global-market-size/> Acesso em 23 de janeiro de 2022.

SUH, S. et al. Generalized Make and Use Framework for Allocation in Life Cycle Assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 14, n. 2, p. 335–353, mar. 2010.

TANGUAY, X., ESSOUA ESSOUA, G. G., & AMOR, B. Attributional and consequential life cycle assessments in a circular economy with integration of a quality indicator: A case study of cascading wood products. **Journal of Industrial Ecology**, 25 (6), 1462–1473. 2021.

UNEP. United Nations Environment Assembly of The United Nations Environment Programme: End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument, 2022. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38522/k2200647_-_unep-ea-5-l-23-rev-1_-_advance.pdf?sequence=1&isAllowed=y > Acesso em 02 de março de 2022.

VADOUDI, K., DECKERS, P., DEMUYTERE, C., ASKANIAN, H., & VERNEY, V. (2022). Comparing a material circularity indicator to life cycle assessment: The case of a three-layer plastic packaging. **Sustainable Production and Consumption**, 33, 820–830.

VENKATACHALAM, V., POHLER, M., SPIERLING, S., NICKEL, L., BARNER, L., & ENDRES, H. J. Design for Recycling Strategies Based on the Life Cycle Assessment and End of Life Options of Plastics in a Circular Economy. **Macromolecular Chemistry and Physics**. (2022).

VOGDTLÄNDER, J. G.; BREZET, H. C.; HENDRIKS, C. E. Allocation in Recycling

Systems. 2001.

WEIDEMA, B. P. Market information in life cycle assessment. **Danish Environmental Protection Agency Environmental Project**, 863: 147, 2003.

WERNER, F. Ambiguities in Decision-oriented Life Cycle Inventories: The Role of Mental Models and Values. [s.l.] Springer, 2005.

WILLIAMS, T. G. J. L.; HEIDRICH, O.; SALLIS, P. J. A case study of the open-loop recycling of mixed plastic waste for use in a sports-field drainage system. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 2, p. 118–228, 2010.

ZANDER, N. E. **Recycled Polymer Feedstocks for Material Extrusion Additive Manufacturing**. [s.l.] American Chemical Society, 2019. v. 1315

ZANDER, N. E.; GILLAN, M.; LAMBETH, R. H. Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material. **Additive Manufacturing**, v. 21, n. January, p. 174–182, 2018.

ZATTERA, A. J.; BIANCHI, O.; ZENI, M. & FERREIRA, C. A. - *Polímeros*, 15, p.73 (2005).

APÊNDICES

APÊNDICES

Apêndice A - Equações que descrevem a lógica metodológica para atribuição de cargas para os seis métodos de reciclagem em ciclo aberto

- **Método *Cut-Off*:**

$$Lt,1=LV1+LP1+LU1 \quad (1)$$

$$Lt,2=LR1+LP2+LU2 \quad (2)$$

$$Lt,3=LR2+LP3+LU3+LW3 \quad (3)$$

- **Método de Perda de Qualidade:**

$$Lt,1=LP1+LU1 + (Q1/Q1+Q2+Q3) \times (V1+R1+R2+W3) \quad (4)$$

$$Lt,2=LP2+LU2 + (Q2/Q1+Q2+Q3) \times (V1+R1+R2+W3) \quad (5)$$

$$Lt,3=LP3+LU3 + (Q3/Q1+Q2+Q3) \times (V1+R1+R2+W3) \quad (6)$$

- **Método Rejeito como consequência da extração de recursos**

$$Lt,1=LV1+LP1+LU1+LW3 \quad (7)$$

$$Lt,2=LR1+LP2+LU2 \quad (8)$$

$$Lt,3=LR2+LP3+LU3 \quad (9)$$

- **Método de extração de recursos como consequência de não reciclagem:**

$$Lt,1=LP1+LU1+LR1 \quad (10)$$

$$Lt,2=LP2+LU2+LR2 \quad (11)$$

$$Lt,3=LP3+LU3+LW3+LV1 \quad (12)$$

- **Método de aproximação para reciclagem em ciclo fechado:**

$$Lt,1=LP1+LU1+1/3(LV1+LW3+LR1+LR2) \quad (13)$$

$$Lt,2=LP2+LU2+1/3(LV1+LW3+LR1+LR2) \quad (14)$$

$$Lt,3=LP3+LU3+1/3(LV1+LW3+LR1+LR2) \quad (15)$$

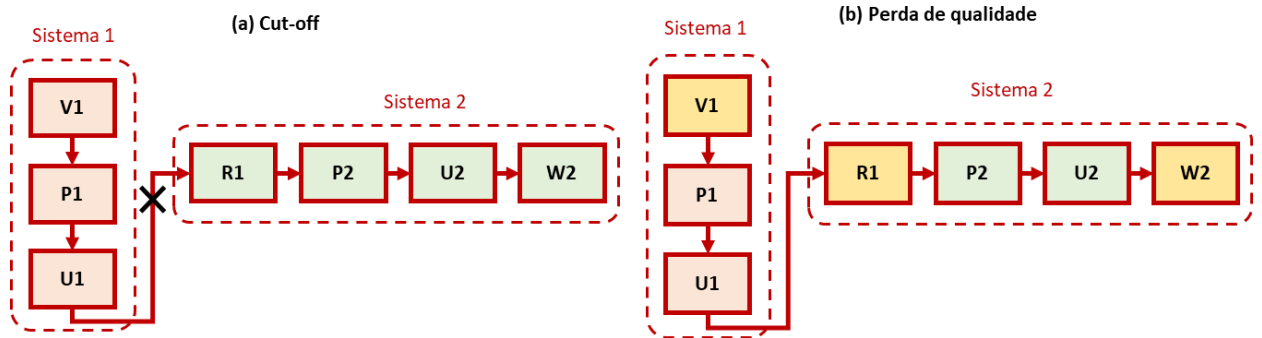
- **Método 50/50**

$$Lt,1=LP1+LU1+1/2(LV1+LW3+LR1) \quad (16)$$

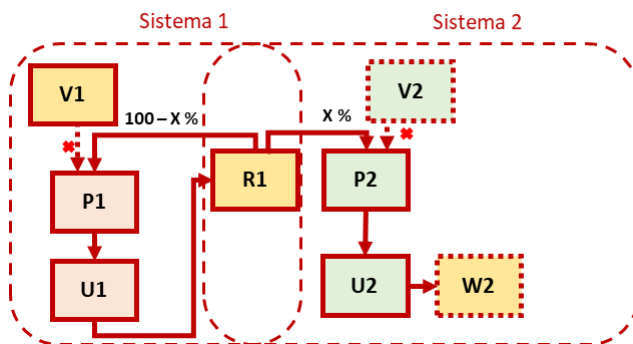
$$Lt,2=LP2+LU2+1/2(LR1+LR2) \quad (17)$$

$$Lt,3=LP3+LU3+1/2(LV1+LW3+LR2) \quad (18)$$

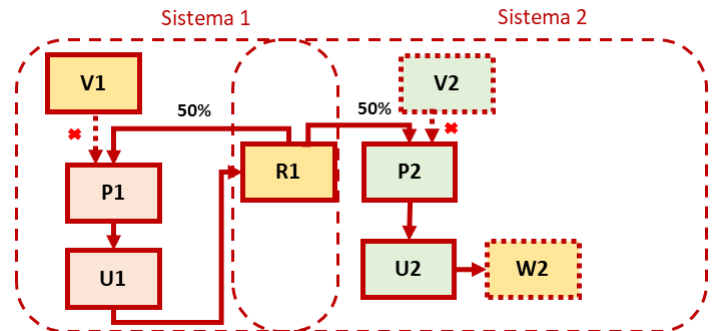
Apêndice B – modelagem metodológica para a situação de tratamento de multifuncionalidades na lógica de reciclagem em ciclo aberto.



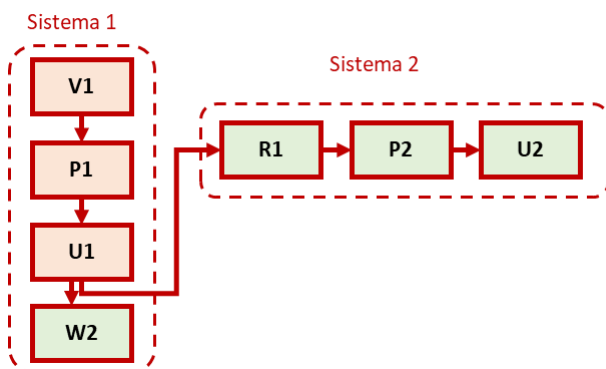
(e) Aproximação para reciclo fechado (CLR)



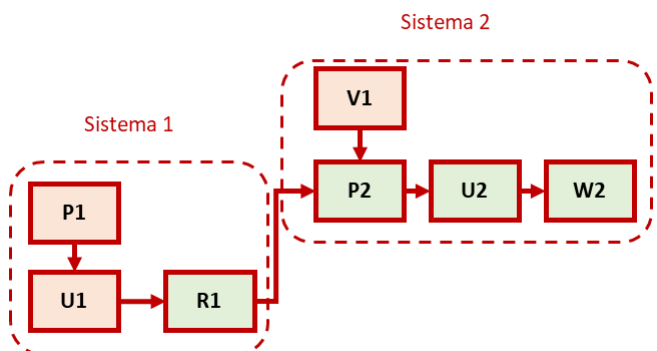
(f) 50/50



(c) Rejeito como consequência da extração de recursos



(d) Extração de recursos como consequência de não reciclagem



ANEXOS

Anexos

Anexo A.1 – Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

dos processos de produção de um suporte de celular pela lógica OLR para ACVA

Substância	Compartimento	Unidade	Total
1-Butanol	Ar	µg	2,523277
1-Butanol	Água	µg	10,41053
1-Pentanol	Ar	ng	150,0482
1-Pentanol	Água	ng	360,1206
1-Pentene	Ar	ng	117,3046
1-Pentene	Água	ng	272,1375
1-Propanol	Ar	µg	65,42156
1-Propanol	Água	ng	766,3734
1,3-Dioxolan-2-one	Água	µg	4,514759
1,4-Butanediol	Ar	ng	303,2486
1,4-Butanediol	Água	ng	695,2063
2-Aminopropanol	Ar	ng	141,5919
2-Aminopropanol	Água	ng	339,8711
2-Butene, 2-methyl-	Ar	pg	75,26042
2-Butene, 2-methyl-	Água	pg	180,6277
2-Chlorobenzaldehyde	Água	pg	397,0833
2-Methyl-1-propanol	Ar	ng	449,45
2-Methyl-1-propanol	Água	µg	1,078661
2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Ar	pg	647,6868
2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Água	ng	1,511904
2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Solo	ng	657,8485
2-Nitrobenzoic acid	Ar	ng	341,3232
2-Propanol	Ar	µg	350,1829
2-Propanol	Água	µg	23,30031
2,4-D	Ar	ng	58,34966
2,4-D	Solo	µg	548,935
2,4-D ester	Ar	ng	3,720047
2,4-D ester	Água	pg	437,8657
2,4-D ester	Solo	ng	17,09969
2,4-D, dimethylamine salt	Ar	pg	318,7042
2,4-D, dimethylamine salt	Água	ng	1,989134
2,4-D, dimethylamine salt	Solo	ng	63,56552
2,4-di-tert-butylphenol	Água	ng	1,360777
4-Methyl-2-pentanol	Água	pg	396,8902
4-Methyl-2-pentanone	Ar	ng	12,89113
4-Methyl-2-pentanone	Água	ng	285,9068
Abamectin	Solo	ng	4,173735
Acenaphthene	Ar	µg	67,4353
Acenaphthene	Água	µg	53,94654
Acenaphthylene	Ar	ng	5,874075
Acenaphthylene	Água	ng	149,2267
Acephate	Ar	ng	6,20221

Acephate	Solo	µg	1,497307
Acetaldehyde	Ar	mg	1,80315
Acetaldehyde	Água	µg	62,59485
Acetamide	Ar	ng	1,526772
Acetamide	Solo	ng	56,15908
Acetamiprid	Solo	ng	75,948
Acetic acid	Ar	mg	19,95911
Acetic acid	Água	µg	128,6689
Acetochlor	Solo	µg	11,99444
Acetone	Ar	µg	715,256
Acetone	Água	µg	32,53026
Acetonitrile	Ar	µg	144,8937
Acetonitrile	Água	ng	232,8548
Acetyl chloride	Água	ng	282,8988
Acidity, unspecified	Água	µg	103,206
Acifluorfen	Ar	pg	851,4041
Acifluorfen	Solo	pg	36,49563
Aclonifen	Solo	pg	385,5474
Acrinathrin	Solo	pg	95,68013
Acrolein	Ar	µg	22,26192
Acrolein	Água	ng	1,207397
Acrylate	Água	ng	976,3975
Acrylic acid	Ar	ng	412,5475
Acrylonitrile	Ar	ng	8,614518
Acrylonitrile	Água	pg	206,712
Actinides, radioactive, unspecified	Ar	mBq	14,36639
Actinides, radioactive, unspecified	Água	µBq	763,0762
Aerosols, radioactive, unspecified	Ar	µBq	18,29669
Alachlor	Ar	ng	6,02521
Alachlor	Solo	ng	575,8185
Aldehydes, unspecified	Ar	µg	9,390585
Aldicarb	Solo	ng	354,1446
Aldrin	Solo	mg	8,384588
Allyl chloride	Água	ng	121,9843
Alpha-cypermethrin	Solo	ng	264,8883
Aluminium	Matéria prima	mg	175,9316
Aluminium	Ar	mg	23,13004
Aluminium	Água	g	1,20011
Aluminium	Solo	mg	7,538509
Aluminium hydroxide	Água	ng	5,783226
Ametryn	Solo	ng	72,30729
Amidosulfuron	Solo	pg	381,9264
Amine oxide	Ar	ng	1,434023
Ammonia	Ar	mg	409,823
Ammonia	Solo	ng	44,89725
Ammonium carbonate	Ar	ng	889,1144
Ammonium sulfate	Água	pg	249,5282
Ammonium, ion	Água	mg	204,5328

Anhydrite	Matéria prima	µg	490,6249
Aniline	Ar	ng	913,1036
Aniline	Água	µg	2,418628
Anthracene	Ar	pg	22,72157
Anthracene	Água	µg	11,48122
Anthranilic acid	Ar	ng	265,9697
Anthraquinone	Solo	ng	82,06001
Antimony	Matéria prima	mg	24,41283
Antimony	Ar	µg	345,2891
Antimony	Água	mg	1,224923
Antimony	Solo	µg	3,093406
Antimony-122	Água	µBq	47,49762
Antimony-124	Ar	nBq	27,00296
Antimony-124	Água	mBq	10,10671
Antimony-125	Ar	µBq	1,229474
Antimony-125	Água	mBq	2,203269
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Água	µg	676,8802
Argon-40	Matéria prima	mg	252,7017
Argon-40	Ar	mg	2,902461
Argon-41	Ar	mBq	7,25673
Arsenic	Ar	µg	110,6621
Arsenic	Água	mg	1,290868
Arsenic	Solo	µg	599,1705
Arsine	Ar	pg	4,809165
Asulam	Solo	ng	13,39142
Atrazine	Ar	ng	8,743545
Atrazine	Água	ng	22,44073
Atrazine	Solo	mg	6,755981
Azadirachtin	Solo	ng	596,4739
Azinphos-methyl	Solo	ng	31,58256
Azoxystrobin	Ar	ng	2,817544
Azoxystrobin	Solo	µg	2,495516
Barite	Água	mg	7,64385
Barium	Matéria prima	mg	136,1975
Barium	Ar	µg	192,4932
Barium	Água	mg	39,15882
Barium	Solo	µg	410,0843
Barium-140	Ar	µBq	1,778226
Barium-140	Água	µBq	4,58387
Barium sulfide	Água	ng	14,045
Basalt	Matéria prima	mg	61,70708
Benfluralin	Solo	ng	149,8917
Benomyl	Solo	ng	2,548977
Bensulfuron methyl ester	Solo	pg	7,585278
Bentazone	Ar	ng	2,707963
Bentazone	Água	pg	728,3109
Bentazone	Solo	ng	30,91683
Benzal chloride	Ar	pg	212,541

Benzal chloride	Água	pg	502,9265
Benzaldehyde	Ar	µg	16,24181
Benzaldehyde	Água	pg	164,8593
Benzene	Ar	mg	3,895031
Benzene	Água	µg	987,5971
Benzene, 1-methyl-2-nitro-	Ar	ng	294,7384
Benzene, 1,2-dichloro-	Ar	µg	1,501105
Benzene, 1,2-dichloro-	Água	µg	349,395
Benzene, chloro-	Água	µg	522,9571
Benzene, ethyl-	Ar	µg	145,5858
Benzene, ethyl-	Água	µg	29,63178
Benzene, hexachloro-	Ar	ng	28,42012
Benzene, hexachloro-	Água	pg	3,639327
Benzene, pentachloro-	Ar	pg	361,2798
Benzene, pentachloro-	Água	pg	5,971815
Benzene, pentachloronitro-	Solo	ng	325,5469
Benzo(a)anthracene	Ar	pg	65,24037
Benzo(a)anthracene	Água	ng	43,32536
Benzo(a)pyrene	Ar	µg	7,073147
Benzo(a)pyrene	Água	ng	5,264031
Benzo(b)fluoranthene	Ar	pg	58,68164
Benzo(b)fluoranthene	Água	ng	5,134055
Benzo(g,h,i)perylene	Ar	pg	12,05922
Benzo(g,h,i)perylene	Água	pg	722,4504
Benzo(k)fluoranthene	Ar	pg	42,20698
Benzo(k)fluoranthene	Água	ng	2,415389
Beryllium	Ar	ng	378,192
Beryllium	Água	µg	271,2263
Beryllium	Solo	ng	72,94962
Bicarbonate, ion	Água	ng	14,84339
Bifenox	Solo	ng	24,12892
Bifenthrin	Solo	ng	22,86875
Bitertanol	Solo	ng	8,156861
BOD5, Biological Oxygen Demand	Água	g	3,61736
Borate	Água	µg	46,65081
Borax	Matéria prima	µg	111,6703
Boric acid	Ar	pg	0,319514
Boron	Ar	µg	410,9034
Boron	Água	mg	1,737142
Boron	Solo	µg	10,0395
Boron trifluoride	Ar	ng	2,151801
Boscalid	Solo	ng	45,54516
Bromacil	Solo	ng	44,23928
Bromate	Água	µg	199,2213
Bromide	Água	mg	6,117501
Bromine	Matéria prima	mg	9,024579
Bromine	Ar	µg	330,5552
Bromine	Água	mg	17,10581

Bromine	Solo	µg	3,299033
Bromopropane	Ar	ng	2,238177
Bromopropane	Água	pg	79,15505
Bromoxynil	Ar	pg	366,8118
Bromoxynil	Água	ng	2,222767
Bromoxynil	Solo	µg	1,248217
Bromuconazole	Solo	pg	341,4303
Buprofezin	Solo	ng	19,94887
Butadiene	Ar	ng	232,8627
Butane	Ar	mg	2,660313
Butene	Ar	µg	24,27278
Butene	Água	µg	11,64966
Butyl acetate	Água	µg	5,672805
Butyric acid, 4-(2,4-dichlorophenoxy)-	Ar	ng	2,922597
Butyric acid, 4-(2,4-dichlorophenoxy)-	Água	ng	1,250999
Butyric acid, 4-(2,4-dichlorophenoxy)-	Solo	ng	46,60888
Butyrolactone	Água	ng	2,475838
Cadmium	Matéria prima	µg	5,794421
Cadmium	Ar	µg	36,46553
Cadmium	Água	mg	3,739579
Cadmium	Solo	µg	37,21836
Calcite	Matéria prima	g	15,30344
Calcium	Matéria prima	mg	6,12322
Calcium	Ar	mg	6,798368
Calcium	Água	g	2,263135
Calcium	Solo	mg	73,08216
Captan	Solo	µg	7,767813
Carbamic acid, [(dibutylamino)thio]methyl-, 2,3-	Solo	pg	28,51327
Carbaryl	Ar	pg	897,6566
Carbaryl	Água	pg	2,632688
Carbaryl	Solo	ng	177,6467
Carbendazim	Solo	µg	1,45244
Carbetamide	Solo	ng	379,5269
Carbofuran	Solo	µg	1,51994
Carbon	Ar	ng	328,4925
Carbon	Água	µg	1,124108
Carbon	Solo	mg	22,45838
Carbon-14	Ar	Bq	1,587754
Carbon-14	Água	µBq	884,2976
Carbon dioxide, biogenic	Ar	g	321,4702
Carbon dioxide, fossil	Ar	g	376,5722
Carbon dioxide, in air	Matéria prima	g	459,7389
Carbon dioxide, land transformation	Ar	g	62,85625
Carbon dioxide, to soil or biomass stock	Solo	g	22,43745
Carbon disulfide	Ar	mg	2,577035
Carbon disulfide	Água	µg	3,382062
Carbon monoxide, biogenic	Ar	g	8,336798
Carbon monoxide, fossil	Ar	mg	519,7471

Carbon monoxide, land transformation	Ar	mg	83,71638
Carbon, organic, in soil or biomass stock	Matéria prima	g	1,062533
Carbonate	Água	mg	6,520594
Carbonyl sulfide	Ar	µg	18,33315
Carboxylic acids, unspecified	Água	mg	4,93855
Carfentrazone-ethyl	Ar	pg	78,15676
Carfentrazone-ethyl	Solo	ng	3,170454
Carnallite	Matéria prima	mg	3,018617
Cerium	Matéria prima	µg	16,05117
Cerium-141	Ar	nBq	427,1333
Cerium-141	Água	µBq	10,8763
Cerium-144	Água	µBq	25,32506
Cesium	Água	µg	1,038885
Cesium-134	Ar	nBq	20,45694
Cesium-134	Água	µBq	259,1277
Cesium-136	Água	µBq	14,76419
Cesium-137	Ar	nBq	736,7111
Cesium-137	Água	mBq	93,17957
Chloramine	Ar	ng	887,156
Chloramine	Água	µg	7,916918
Chlorate	Água	mg	1,717287
Chlorfenvinphos	Solo	ng	9,325419
Chloridazon	Solo	ng	30,47083
Chloride	Água	g	6,187044
Chloride	Solo	mg	4,936841
Chlorides, unspecified	Água	mg	1,259311
Chlorimuron-ethyl	Ar	ng	1,422017
Chlorimuron-ethyl	Solo	ng	32,51292
Chlorinated solvents, unspecified	Ar	ng	165,774
Chlorinated solvents, unspecified	Água	µg	5,321952
Chlorine	Ar	µg	498,4299
Chlorine	Água	µg	17,16863
Chlorine	Solo	µg	9,921219
Chlormequat	Solo	ng	384,1936
Chloroacetic acid	Ar	µg	5,905651
Chloroacetic acid	Água	µg	59,78971
Chloroacetyl chloride	Água	ng	453,2687
Chloroform	Ar	µg	47,78527
Chloroform	Água	µg	8,446415
Chloropicrin	Solo	µg	1,020588
Chlorosilane, trimethyl-	Ar	ng	57,04601
Chlorosulfonic acid	Ar	ng	339,6026
Chlorosulfonic acid	Água	ng	846,7546
Chlorothalonil	Solo	µg	9,318908
Chlorpyrifos	Ar	ng	28,3681
Chlorpyrifos	Solo	mg	4,537643
Chlorpyrifos methyl	Solo	µg	2,334658
Chlorsulfuron	Solo	pg	470,6861

Chlortoluron	Solo	ng	128,7266
Choline chloride	Solo	ng	64,88957
Chromium	Matéria prima	mg	166,6442
Chromium	Ar	µg	850,5464
Chromium	Água	µg	165,1565
Chromium	Solo	µg	222,2657
Chromium-51	Ar	nBq	27,37063
Chromium-51	Água	µBq	727,7809
Chromium IV	Ar	pg	0,56657
Chromium VI	Ar	µg	16,06598
Chromium VI	Água	mg	1,626869
Chromium VI	Solo	µg	3,972824
Chrysene	Ar	pg	103,5229
Chrysene	Água	ng	27,94486
Chrysotile	Matéria prima	µg	331,1378
Cinidon-ethyl	Solo	pg	462,9454
Clay, bentonite	Matéria prima	mg	62,33681
Clay, unspecified	Matéria prima	g	5,740144
Clethodim	Ar	ng	4,207051
Clethodim	Solo	ng	10,47539
Clodinafop-propargyl	Solo	ng	12,99318
Clomazone	Solo	ng	5,61129
Clopyralid	Solo	ng	6,435525
Cloquintocet-mexyl	Solo	ng	1,682542
Cloransulam-methyl	Ar	pg	740,6289
Cloransulam-methyl	Solo	ng	2,818532
Clothianidin	Solo	µg	170,1436
Coal, brown	Matéria prima	g	3,01116
Coal, hard	Matéria prima	g	54,13022
Cobalt	Matéria prima	mg	18,16191
Cobalt	Ar	µg	27,90316
Cobalt	Água	mg	4,981518
Cobalt	Solo	µg	6,505395
Cobalt-57	Água	µBq	468,6712
Cobalt-58	Ar	nBq	880,8135
Cobalt-58	Água	mBq	60,05054
Cobalt-60	Ar	µBq	4,226483
Cobalt-60	Água	mBq	21,70171
COD, Chemical Oxygen Demand	Água	g	14,51783
Colemanite	Matéria prima	mg	1,152421
Copper	Matéria prima	mg	172,0896
Copper	Ar	µg	520,1288
Copper	Água	mg	87,53071
Copper	Solo	µg	356,0716
Cu-HDO	Água	pg	0,798081
Cumene	Ar	µg	50,12767
Cumene	Água	µg	178,7648
Cyanide	Ar	mg	2,775573

Cyanide	Água	µg	153,3523
Cyanoacetic acid	Ar	ng	278,0813
Cyclohexane	Ar	ng	22,56792
Cyclohexane	Água	ng	8,807986
Cycloxydim	Solo	ng	6,014502
Cyfluthrin	Ar	pg	148,4629
Cyfluthrin	Solo	ng	38,12512
Cyhalothrin, gamma-	Ar	ng	1,703772
Cyhalothrin, gamma-	Solo	pg	73,03942
Cymoxanil	Solo	ng	33,16351
Cypermethrin	Solo	µg	25,24116
Cyproconazole	Solo	µg	1,26245
Cyprodinil	Solo	ng	680,1516
Decanoic acid	Água	µg	40,3619
Deltamethrin	Solo	ng	1,802182
Desmedipham	Solo	ng	28,21363
Diafenthiuron	Solo	pg	78,40381
Diatomite	Matéria prima	µg	1,487375
Diazinon	Solo	ng	201,3471
Dibenz(a,h)anthracene	Ar	pg	16,07026
Dibenz(a,h)anthracene	Água	pg	505,8236
Dibutyltin	Água	pg	0,000219
Dicamba	Ar	ng	10,83418
Dicamba	Água	ng	2,37852
Dicamba	Solo	ng	212,8387
Dichlorodimethylsilane	Ar	ng	7,708204
Dichlorprop	Ar	pg	456,4767
Dichlorprop	Água	pg	477,807
Dichlorprop	Solo	ng	18,95967
Dichlorprop-P	Solo	µg	8,099013
Dichlorvos	Solo	ng	82,87207
Dichromate	Água	ng	381,504
Diclofop	Solo	ng	128,9071
Diclofop-methyl	Solo	ng	131,0821
Diethanolamine	Água	µg	24,64629
Diethyl ether	Ar	pg	8,593125
Diethylamine	Ar	ng	433,0426
Diethylamine	Água	µg	1,039309
Diethylene glycol	Ar	pg	41,01092
Diethylene glycol	Água	pg	841,0961
Difenoconazole	Solo	µg	3,285696
Difflubenzuron	Ar	pg	78,15676
Difflubenzuron	Solo	µg	1,457743
Difflufenican	Solo	ng	189,8757
Difflufenzopyr-sodium	Solo	ng	10,6887
Diisobutyl ketone	Água	ng	25,69912
Dimethachlor	Solo	ng	11,92481
Dimethenamid	Ar	pg	648,4065

Dimethenamid	Água	pg	231,7114
Dimethenamid	Solo	ng	432,5311
Dimethoate	Solo	ng	470,3881
Dimethomorph	Solo	ng	14,16341
Dimethyl carbonate	Ar	ng	438,7202
Dimethyl hexanediol	Água	pg	423,322
Dimethyl hexynediol	Água	pg	926,439
Dimethyl malonate	Ar	ng	348,717
Dimethylamine	Ar	ng	11,77362
Dimethylamine	Água	µg	5,611209
Dimethyldichlorosilane	Ar	ng	5,891414
Dimethyldichlorosilane	Água	pg	217,0906
Dinitrogen monoxide	Ar	mg	66,45993
Dinitrogen tetroxide	Ar	ng	8,724071
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Ar	pg	189,0701
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Água	pg	0,001301
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Solo	pg	20,2072
Diphenylether-compound	Água	pg	347,2503
Diphenyltin	Água	pg	0,013851
Dipropylamine	Ar	ng	196,1038
Dipropylamine	Água	ng	470,662
Dipropylthiocarbamic acid S-ethyl ester	Solo	µg	1,294229
Diquat	Solo	µg	1,491833
Discarded fish, demersal	Água	ng	299,0059
Discarded fish, pelagic	Água	ng	637,4374
Dithianone	Solo	ng	3,819264
Diuron	Solo	ng	588,856
DOC, Dissolved Organic Carbon	Água	g	13,05366
Dodecanoic acid	Ar	ng	3,134136
Dodecanoic acid	Água	ng	28,8077
Dodecanol	Água	ng	3,672633
Dolomite	Matéria prima	mg	145,094
Endosulfan	Solo	ng	603,9473
Endothall	Solo	ng	1,120135
Energy, geothermal, converted	Matéria prima	J	774,982
Energy, gross calorific value, in biomass	Matéria prima	MJ	4,609471
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	Matéria prima	kJ	41,05846
Energy, kinetic (in wind), converted	Matéria prima	kJ	780,6908
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	Matéria prima	MJ	5,660902
Energy, solar, converted	Matéria prima	J	170,9332
Epoconazole	Solo	ng	94,51464
Esfenvalerate	Ar	pg	887,8877
Esfenvalerate	Solo	ng	17,81043
Ethalfuralin	Solo	ng	3,975626
Ethane	Ar	mg	9,486323
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	Ar	µg	18,06418
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	Ar	ng	138,6301
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	Água	pg	0,005338

Ethane, 1,1,1-trifluoro-, HFC-143a	Ar	pg	0,378844
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Ar	ng	854,7858
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Ar	ng	71,56544
Ethane, 1,2-dichloro-	Ar	µg	14,2964
Ethane, 1,2-dichloro-	Água	µg	15,19158
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Ar	µg	5,943007
Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124	Ar	ng	9,579546
Ethane, chloro-	Ar	ng	70,51841
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	Ar	µg	1,961822
Ethane, pentafluoro-, HFC-125	Ar	pg	4,918677
Ethanol	Ar	mg	85,44151
Ethanol	Água	µg	102,21
Ethene	Ar	mg	6,621145
Ethene	Água	µg	75,3896
Ethene, chloro-	Ar	µg	4,439037
Ethene, chloro-	Água	ng	57,10665
Ethene, tetrachloro-	Ar	µg	10,80181
Ethene, trichloro-	Ar	ng	95,5124
Ethephon	Ar	pg	0,054564
Ethephon	Água	pg	0,003623
Ethephon	Solo	ng	408,0896
Ethofumesate	Solo	ng	400,0211
Ethoprop	Solo	ng	299,8601
Ethyl acetate	Ar	µg	234,2823
Ethyl acetate	Água	ng	794,6926
Ethyl cellulose	Ar	ng	472,4778
Ethylamine	Ar	µg	3,97659
Ethylamine	Água	µg	9,543911
Ethylene diamine	Ar	ng	603,997
Ethylene diamine	Água	µg	1,450741
Ethylene oxide	Ar	µg	368,8867
Ethylene oxide	Água	µg	46,40963
Ethyne	Ar	µg	92,49784
Europium	Matéria prima	ng	40,21384
Feldspar	Matéria prima	ng	535,6835
Fenamiphos	Solo	ng	122,2452
Fenbuconazole	Solo	ng	1,843406
Fenoxaprop	Ar	ng	1,162177
Fenoxaprop	Solo	ng	5,730618
Fenoxaprop-P ethyl ester	Solo	ng	14,99267
Fenoxaprop ethyl ester	Solo	ng	10,74209
Fenpiclonil	Solo	ng	211,1314
Fenpropidin	Solo	ng	337,7934
Fenpropimorph	Solo	ng	175,1926
Fentin hydroxide	Solo	ng	51,88638
Fipronil	Solo	mg	17,26826
Fish, demersal, in ocean	Matéria prima	µg	2,392062
Fish, pelagic, in ocean	Matéria prima	µg	16,91578

Florasulam	Solo	ng	2,056963
Fluazifop	Solo	ng	5,637992
Fluazifop-p-butyl	Ar	ng	1,667649
Fluazifop-P-butyl	Solo	ng	34,15098
Flucarbazone sodium salt	Solo	pg	29,41751
Fludioxonil	Solo	ng	40,32105
Flufenacet	Ar	pg	625,2781
Flufenacet	Solo	ng	84,08246
Flumetsulam	Ar	pg	146,2956
Flumetsulam	Solo	ng	18,75649
Flumiclorac-pentyl	Ar	pg	250,328
Flumiclorac-pentyl	Solo	pg	10,72593
Flumioxazin	Ar	ng	2,532178
Flumioxazin	Solo	ng	6,585627
Fluoranthene	Ar	ng	1,159217
Fluoranthene	Água	µg	227,4581
Fluorene	Ar	ng	5,521022
Fluorene	Água	µg	83,83457
Fluoride	Água	mg	38,69289
Fluoride	Solo	µg	45,52367
Fluorine	Matéria prima	mg	93,1414
Fluorine	Ar	µg	106,9189
Fluorspar	Matéria prima	mg	28,33723
Fluosilicic acid	Ar	µg	4,004349
Fluosilicic acid	Água	µg	7,494481
Flupyrasulfuron-methyl	Solo	pg	45,67023
Fluquinconazole	Solo	pg	868,012
Flurochloridone	Solo	pg	18,2537
Fluroxypyr	Solo	ng	24,43243
Flurtamone	Solo	ng	181,4459
Flusilazole	Solo	ng	12,70338
Flutolanil	Solo	ng	59,00069
Folpet	Solo	ng	1,946157
Fomesafen	Ar	ng	9,414692
Fomesafen	Solo	ng	21,71425
Foramsulfuron	Solo	ng	2,00416
Formaldehyde	Ar	mg	2,051707
Formaldehyde	Água	µg	211,3598
Formamide	Ar	ng	274,4233
Formamide	Água	ng	658,6233
Formate	Água	µg	255,2994
Formic acid	Ar	µg	885,828
Formic acid	Água	ng	191,1918
Fosetyl	Solo	ng	8,828318
Fosetyl-aluminium	Solo	ng	423,7836
Fungicides, unspecified	Água	ng	5,17463
Fungicides, unspecified	Solo	ng	259,0772
Furan	Ar	mg	3,863833

Furathiocarb	Solo	ng	19,96572
Furfural	Ar	pg	55,35297
Gadolinium	Matéria prima	ng	100,3628
Gallium	Matéria prima	µg	54,54554
Gangue	Matéria prima	g	4,014153
Gangue, bauxite	Matéria prima	g	1,866374
Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	Matéria prima	cm3	138,5084
Gas, natural/m3	Matéria prima	l	100,6158
Glucose	Água	ng	3,015529
Glufosinate	Solo	ng	277,4186
Glutaraldehyde	Água	ng	864,9356
Glyphosate	Ar	µg	1,889918
Glyphosate	Água	ng	51,5731
Glyphosate	Solo	mg	2,143411
Gold	Matéria prima	µg	121,9347
Granite	Matéria prima	g	1,132501
Gravel	Matéria prima	g	95,9564
Gypsum	Matéria prima	mg	860,0979
Halosulfuron-methyl	Solo	pg	2,155758
Haloxfop- (R) Methylester	Solo	ng	59,26991
Heat, waste	Ar	kJ	26,21165
Heat, waste	Água	kJ	77,10308
Heat, waste	Solo	kJ	2,013659
Helium	Ar	µg	69,72808
Heptane	Ar	µg	19,8523
Herbicides, unspecified	Solo	ng	188,7026
Hexaconazole	Solo	ng	223,0333
Hexane	Ar	mg	1,54676
Hexazinone	Solo	ng	20,48726
Holmium	Matéria prima	mg	3,231919
Hydramethylnon	Solo	pg	472,1567
Hydrazine	Água	pg	54,94416
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyclic	Ar	µg	533,1147
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	Ar	mg	2,3329
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	Água	µg	135,0551
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	Ar	mg	3,525793
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	Água	µg	13,34024
Hydrocarbons, aromatic	Ar	mg	5,75286
Hydrocarbons, aromatic	Água	µg	551,2826
Hydrocarbons, chlorinated	Ar	µg	14,05044
Hydrocarbons, unspecified	Ar	µg	8,827995
Hydrocarbons, unspecified	Água	mg	1,256528
Hydrocarbons, unspecified	Solo	µg	48,94787
Hydrogen	Ar	mg	6,361704
Hydrogen-3, Tritium	Ar	Bq	2,758753
Hydrogen-3, Tritium	Água	Bq	322,7793
Hydrogen carbonate	Água	µg	568,0155
Hydrogen chloride	Ar	mg	27,78079

Hydrogen chloride	Água	µg	122,6935
Hydrogen fluoride	Ar	mg	2,83016
Hydrogen peroxide	Ar	ng	349,6246
Hydrogen peroxide	Água	µg	13,56629
Hydrogen sulfide	Ar	mg	1,662408
Hydrogen sulfide	Água	mg	13,69043
Hydroxide	Água	µg	13,1276
Hypochlorite	Água	µg	257,4631
Imazamox	Ar	pg	374,4685
Imazamox	Solo	ng	19,76526
Imazapyr	Solo	pg	267,2231
Imazaquin	Ar	ng	1,193844
Imazaquin	Solo	pg	51,16131
Imazethapyr	Ar	ng	2,47077
Imazethapyr	Solo	ng	8,002704
Imidacloprid	Solo	µg	1,405303
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	Ar	pg	10,43182
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	Água	ng	7,939372
Indoxacarb	Solo	ng	272,495
Insecticides, unspecified	Solo	ng	15,4844
Iodide	Água	mg	4,298559
Iodide	Solo	pg	255,967
Iodine	Matéria prima	mg	7,422194
Iodine	Ar	µg	133,7603
Iodine-129	Ar	µBq	469,7942
Iodine-131	Ar	mBq	1,949024
Iodine-131	Água	mBq	1,980788
Iodine-133	Ar	µBq	95,62574
Iodine-133	Água	µBq	24,25343
Iodosulfuron	Solo	pg	57,86747
Iodosulfuron-methyl-sodium	Solo	pg	28,49817
Ioxynil	Solo	ng	88,57911
Iprodione	Solo	µg	3,654693
Iron	Matéria prima	g	3,882249
Iron	Ar	mg	1,703003
Iron	Água	mg	981,8987
Iron	Solo	mg	13,91187
Iron-59	Água	mBq	7,23399
Isocyanic acid	Ar	µg	8,854353
Isoprene	Ar	µg	12,87944
Isopropylamine	Ar	µg	3,300321
Isopropylamine	Água	µg	7,920672
Isoproturon	Solo	ng	733,6978
Isoxaflutole	Solo	ng	65,5543
Kaolin	Solo	ng	39,60398
Kaolinite	Matéria prima	mg	179,1651
Kieserite	Matéria prima	mg	8,47635
Kresoxim-methyl	Solo	ng	27,18081

Krypton	Matéria prima	µg	2,872511
Krypton-85	Ar	mBq	23,67311
Krypton-85m	Ar	mBq	532,7587
Krypton-87	Ar	mBq	5,799747
Krypton-88	Ar	mBq	7,600244
Krypton-89	Ar	mBq	3,186022
Lactic acid	Ar	ng	153,6219
Lactic acid	Água	ng	368,6907
Lactofen	Ar	ng	1,202273
Lactofen	Solo	pg	51,52253
Lambda-cyhalothrin	Ar	pg	0,001727
Lambda-cyhalothrin	Água	pg	8,74E-07
Lambda-cyhalothrin	Solo	ng	208,3237
Lanthanum	Matéria prima	µg	4,811913
Lanthanum-140	Ar	nBq	150,5858
Lanthanum-140	Água	µBq	30,31732
Laterite	Matéria prima	mg	46,76858
Lead	Matéria prima	mg	11,02084
Lead	Ar	µg	378,0786
Lead	Água	mg	32,80009
Lead	Solo	µg	209,3602
Lead-210	Ar	mBq	62,67387
Lead-210	Água	mBq	22,52278
Lenacil	Solo	ng	25,88691
Linuron	Solo	mg	1,833468
Lithium	Matéria prima	µg	23,04618
Lithium	Ar	pg	56,10789
Lithium	Água	mg	53,59933
Lithium	Solo	ng	24,86218
m-Xylene	Ar	µg	145,0947
m-Xylene	Água	µg	11,54746
Magnesite	Matéria prima	mg	51,59586
Magnesium	Matéria prima	mg	46,51753
Magnesium	Ar	µg	698,8914
Magnesium	Água	mg	749,0317
Magnesium	Solo	mg	8,599216
Malathion	Solo	ng	77,51574
Maleic anhydride	Água	pg	842,1712
Maleic hydrazide	Solo	ng	327,9792
Mancozeb	Solo	µg	14,66437
Mandipropamid	Solo	pg	708,2235
Maneb	Solo	ng	7,635384
Manganese	Matéria prima	mg	64,02401
Manganese	Ar	µg	489,273
Manganese	Água	mg	63,91084
Manganese	Solo	mg	4,795792
Manganese-54	Ar	nBq	14,01679
Manganese-54	Água	µBq	761,8189

MCPB	Ar	pg	626,9836
MCPB	Água	ng	1,451327
MCPB	Solo	ng	107,4835
Mecoprop	Solo	ng	26,87222
Mecoprop-P	Solo	ng	19,04557
Mefenpyr	Solo	ng	21,65815
Mefenpyr-diethyl	Solo	ng	11,06679
Mepiquat chloride	Solo	ng	78,70157
Mercury	Matéria prima	ng	634,4764
Mercury	Ar	µg	7,785878
Mercury	Água	µg	82,45162
Mercury	Solo	µg	1,31224
Mesosulfuron-methyl (prop)	Solo	pg	157,2044
Mesotrione	Solo	ng	636,083
Metalaxil	Solo	ng	209,9737
Metalaxyl-M	Solo	µg	4,922699
Metaldehyde (tetramer)	Solo	ng	734,5857
Metam-sodium dihydrate	Solo	µg	53,42341
Metamitron	Solo	µg	1,472404
Metamorphous rock, graphite containing	Matéria prima	µg	186,5884
Metazachlor	Solo	ng	140,4031
Metconazole	Solo	ng	3,195878
Methane	Ar	ng	953,0008
Methane, biogenic	Ar	g	2,293174
Methane, bromo-, Halon 1001	Ar	pg	406,0019
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Ar	ng	113,4043
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Ar	µg	1,589737
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Ar	µg	3,062996
Methane, dichloro-, HCC-30	Ar	µg	4,474292
Methane, dichloro-, HCC-30	Água	µg	20,88278
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Ar	ng	240,854
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	Ar	pg	530,0028
Methane, fossil	Ar	g	1,357016
Methane, land transformation	Ar	mg	5,473763
Methane, monochloro-, R-40	Ar	µg	3,694471
Methane, tetrachloro-, CFC-10	Ar	µg	6,024565
Methane, tetrachloro-, CFC-10	Água	pg	286,9206
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	Ar	µg	10,29982
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	Ar	pg	584,5585
Methane, trifluoro-, HFC-23	Ar	ng	168,6373
Methanesulfonic acid	Ar	ng	281,0095
Methanol	Ar	mg	12,3766
Methanol	Água	µg	137,4103
Methiocarb	Solo	ng	4,313465
Methomyl	Ar	pg	0,186656
Methomyl	Água	pg	0,00291
Methomyl	Solo	pg	0,588154
Methoxyfenozide	Solo	ng	16,25934

Methyl acetate	Ar	mg	1,010398
Methyl acetate	Água	ng	189,6789
Methyl acrylate	Ar	ng	468,1102
Methyl acrylate	Água	µg	9,144671
Methyl borate	Ar	ng	162,0167
Methyl ethyl ketone	Ar	µg	233,9851
Methyl formate	Ar	ng	93,29839
Methyl formate	Água	ng	37,24868
Methyl lactate	Ar	ng	168,643
Methyl pentane	Água	ng	4,749431
Methylamine	Ar	ng	346,4274
Methylamine	Água	ng	826,6324
Metiram	Solo	ng	222,8157
Metolachlor	Ar	ng	21,62742
Metolachlor	Água	ng	2,77897
Metolachlor	Solo	µg	22,85564
Metosulam	Solo	pg	90,04582
Metribuzin	Ar	ng	7,797614
Metribuzin	Solo	ng	822,7479
Metsulfuron-methyl	Solo	ng	23,50751
Mineral oil	Solo	mg	22,70927
Molinate	Solo	pg	646,0034
Molybdenum	Ar	µg	39,34488
Molybdenum	Água	µg	800,7329
Molybdenum	Solo	µg	1,283203
Molybdenum-99	Água	µBq	1,991582
Monobutyltin	Água	pg	0,037665
Monocrotophos	Solo	ng	591,5256
Monoethanolamine	Ar	µg	116,9941
Monoethanolamine	Água	ng	2,873091
Monophenyltin	Água	pg	4,13E-05
Myclobutanil	Solo	ng	22,72136
Naphthalene	Ar	µg	42,04991
Naphthalene	Água	µg	16,81024
Napropamide	Solo	ng	263,1421
Neodymium	Matéria prima	µg	2,646552
Nickel	Matéria prima	mg	102,7662
Nickel	Ar	µg	836,2042
Nickel	Água	mg	10,55493
Nickel	Solo	µg	91,35022
Nicosulfuron	Solo	ng	20,14291
Niobium-95	Ar	mBq	8,842983
Niobium-95	Água	µBq	163,7771
Nitrate	Ar	µg	47,85664
Nitrate	Água	g	2,336194
Nitrate	Solo	µg	28,65076
Nitric acid	Solo	ng	3,631603
Nitrite	Água	mg	10,7377

Nitrobenzene	Ar	µg	1,685604
Nitrobenzene	Água	µg	6,755174
Nitrogen dioxide	Água	ng	1,517681
Nitrogen fluoride	Ar	pg	6,253237
Nitrogen monoxide	Ar	ng	108,6314
Nitrogen oxides	Ar	mg	953,2248
Nitrogen, atmospheric	Matéria prima	g	13,62784
Nitrogen, atmospheric	Ar	mg	89,72423
Nitrogen, atmospheric	Água	mg	4,586645
Nitrogen, atmospheric	Solo	µg	60,13349
Nitrogen, organic bound	Água	mg	311,8675
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Ar	mg	377,7179
Noble gases, radioactive, unspecified	Ar	kBq	4,522446
Norflurazon	Solo	ng	65,2593
Novaluron	Solo	pg	281,3902
o-Xylene	Ar	µg	4,499143
o-Xylene	Água	µg	1,099986
Occupation, annual crop	Matéria prima	mm2a	157,9977
Occupation, annual crop, greenhouse	Matéria prima	mm2a	0,087903
Occupation, annual crop, irrigated	Matéria prima	mm2a	17,99943
Occupation, annual crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2a	7,355037
Occupation, annual crop, non-irrigated	Matéria prima	mm2a	3,826902
Occupation, annual crop, non-irrigated, extensive	Matéria prima	mm2a	19,82592
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	cm2a	320,8467
Occupation, arable land, unspecified use	Matéria prima	mm2a	0,062533
Occupation, construction site	Matéria prima	mm2a	243,3309
Occupation, dump site	Matéria prima	mm2a	684,0781
Occupation, forest, extensive	Matéria prima	mm2a	138,7354
Occupation, forest, intensive	Matéria prima	cm2a	204,9695
Occupation, grassland, natural (non-use)	Matéria prima	mm2a	10,53906
Occupation, grassland, natural, for livestock grazing	Matéria prima	mm2a	787,0743
Occupation, industrial area	Matéria prima	cm2a	11,54717
Occupation, inland waterbody, unspecified	Matéria prima	mm2a	0,03003
Occupation, mineral extraction site	Matéria prima	mm2a	462,1831
Occupation, pasture, man made	Matéria prima	cm2a	14,2603
Occupation, pasture, man made, extensive	Matéria prima	mm2a	0,27914
Occupation, pasture, man made, intensive	Matéria prima	mm2a	96,55655
Occupation, permanent crop	Matéria prima	mm2a	27,15243
Occupation, permanent crop, irrigated	Matéria prima	cm2a	231,3138
Occupation, permanent crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2a	1,822454
Occupation, permanent crop, non-irrigated	Matéria prima	cm2a	711,6457
Occupation, permanent crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	mm2a	0,196132
Occupation, sea and ocean	Matéria prima	mm2a	0,010156
Occupation, seabed, drilling and mining	Matéria prima	mm2a	11,24416
Occupation, seabed, infrastructure	Matéria prima	mm2a	0,063105
Occupation, shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	mm2a	35,06223
Occupation, traffic area, rail network	Matéria prima	mm2a	34,11743
Occupation, traffic area, rail/road embankment	Matéria prima	mm2a	378,3182

Occupation, traffic area, road network	Matéria prima	cm2a	11,5557
Occupation, unknown	Matéria prima	mm2a	2,116331
Occupation, unspecified, natural (non-use)	Matéria prima	mm2a	1,101387
Occupation, urban, continuously built	Matéria prima	mm2a	0,266345
Occupation, urban, discontinuously built	Matéria prima	mm2a	81,36717
Occupation, urban, green areas	Matéria prima	m2a	2,337335
Occupation, urban/industrial fallow (non-use)	Matéria prima	mm2a	1,817401
Occupation, water bodies, artificial	Matéria prima	cm2a	248,4529
Octaethylene glycol monododecyl ether	Ar	ng	16,48191
Oil, crude	Matéria prima	g	72,98696
Oils, biogenic	Água	µg	3,993896
Oils, biogenic	Solo	µg	167,4085
Oils, unspecified	Água	mg	69,2913
Oils, unspecified	Solo	mg	74,32451
Olivine	Matéria prima	µg	163,4876
Orbencarb	Solo	µg	1,223931
Organic carbon	Ar	ng	817,0148
Organic carbon	Água	µg	2,658532
Organic carbon	Solo	µg	2,658532
Oryzalin	Solo	ng	29,76782
Oxamyl	Solo	ng	258,3201
Oxydemeton methyl	Solo	ng	4,048421
Oxyfluorfen	Solo	ng	250,5253
Oxygen	Matéria prima	g	6,958659
Oxygen	Água	pg	267,8024
Ozone	Ar	mg	11,35057
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Ar	µg	128,9693
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Água	µg	9,2295
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Solo	ng	74,58661
Palladium	Matéria prima	ng	797,2033
Palladium	Ar	ng	5,606789
Paraffins	Ar	ng	369,5863
Paraffins	Água	µg	1,642979
Paraquat	Ar	ng	5,016192
Paraquat	Solo	µg	1,277371
Parathion	Solo	ng	6,833523
Parathion, methyl	Ar	pg	962,661
Parathion, methyl	Solo	pg	41,26378
Particulates, < 2.5 um	Ar	mg	263,9013
Particulates, > 10 um	Ar	mg	936,9098
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Ar	mg	261,1519
Peat	Matéria prima	mg	28,12092
Pendimethalin	Ar	ng	56,42869
Pendimethalin	Água	pg	315,4639
Pendimethalin	Solo	ng	871,1277
Pentane	Ar	mg	2,752693
Pentane	Água	pg	102,4754
Pentane, 2-methyl-	Ar	ng	279,8997

Pentane, 2,2,4-trimethyl-	Ar	ng	56,6906
Perlite	Matéria prima	mg	3,977358
Permethrin	Ar	pg	785,3002
Permethrin	Solo	ng	16,4578
Pesticides, unspecified	Solo	mg	1,276268
Phenanthrene	Ar	ng	17,38717
Phenanthrene	Água	µg	188,6819
Phenmedipham	Solo	ng	225,6242
Phenol	Ar	µg	56,49608
Phenol	Água	µg	333,0158
Phenol, 2,4-dichloro-	Ar	ng	518,6213
Phenol, pentachloro-	Ar	µg	2,654717
Phenol, pentachloro-	Solo	pg	187,7991
Phorate	Solo	ng	542,1183
Phosgene	Ar	ng	47,20124
Phosmet	Solo	ng	74,35708
Phosphate	Água	mg	232,0425
Phosphine	Ar	ng	14,95692
Phosphoric acid	Ar	ng	41,21154
Phosphoric acid	Água	ng	1,794404
Phosphorus	Matéria prima	mg	373,8224
Phosphorus	Ar	µg	333,7006
Phosphorus	Água	mg	9,320958
Phosphorus	Solo	mg	2,404846
Phosphorus oxychloride	Água	pg	445,9994
Phosphorus pentachloride	Água	ng	1,301791
Phosphorus trichloride	Ar	ng	110,2296
Phosphorus trichloride	Água	pg	51,54047
Picloram	Solo	pg	58,83502
Picoxystrobin	Solo	ng	172,9345
Piperonyl butoxide	Solo	ng	4,744083
Pirimicarb	Solo	ng	371,7926
Pirimiphos methyl	Solo	ng	54,80936
Platinum	Matéria prima	ng	851,6488
Platinum	Ar	ng	881,9694
Plutonium-238	Ar	nBq	0,064088
Plutonium-alpha	Ar	nBq	0,146913
Polonium-210	Ar	mBq	109,469
Polonium-210	Água	mBq	131,9496
Polychlorinated biphenyls	Ar	ng	67,00031
Polychlorinated biphenyls	Água	pg	70,13341
Potassium	Matéria prima	µg	220,6596
Potassium	Ar	mg	25,49064
Potassium	Água	mg	509,8609
Potassium	Solo	mg	13,33356
Potassium-40	Ar	mBq	19,71443
Potassium-40	Água	mBq	19,48553
Potassium chloride	Matéria prima	g	1,860629

Praseodymium	Matéria prima	ng	280,8095
Primisulfuron	Solo	ng	6,680717
Prochloraz	Solo	ng	11,78214
Procymidone	Solo	ng	1,904901
Profenofos	Solo	ng	190,782
Prohexadione-calcium	Solo	pg	35,45107
Pronamide	Solo	pg	2,144303
Propachlor	Solo	ng	747,577
Propamocarb HCl	Solo	ng	2,602972
Propanal	Ar	µg	2,590676
Propanal	Água	ng	492,0217
Propane	Ar	mg	3,978103
Propanil	Solo	ng	1,673142
Propargite	Solo	ng	173,8823
Propene	Ar	µg	673,5488
Propene	Água	µg	218,6608
Propiconazole	Ar	pg	923,5895
Propiconazole	Água	pg	2,890952
Propiconazole	Solo	ng	114,4449
Propineb	Solo	ng	1,91465
Propionic acid	Ar	µg	35,6682
Propionic acid	Água	µg	7,642305
Propoxycarbazone-sodium (prop)	Solo	pg	196,5407
Propylamine	Ar	ng	77,3938
Propylamine	Água	ng	185,7477
Propylene oxide	Ar	µg	3,214009
Propylene oxide	Água	µg	7,47985
Prosulfuron	Solo	ng	2,608273
Protactinium-234	Ar	mBq	1,16323
Protactinium-234	Água	mBq	5,514134
Prothioconazol	Ar	pg	0,004765
Prothioconazol	Água	pg	0,000497
Prothioconazol	Solo	ng	179,2029
Pumice	Matéria prima	mg	30,17473
Pymetrozine	Solo	ng	16,65934
Pyraclostrobin (prop)	Ar	ng	2,173511
Pyraclostrobin (prop)	Água	pg	2,105851
Pyraclostrobin (prop)	Solo	ng	732,9024
Pyraflufen-ethyl	Solo	ng	161,757
Pyrene	Ar	pg	343,6519
Pyrene	Água	µg	171,3518
Pyrethrin	Solo	ng	3,29485
Pyrimethanil	Solo	ng	20,04164
Quinclorac	Solo	pg	27,9446
Quinmerac	Solo	pg	0,918361
Quinoxifen	Solo	ng	1,718738
Quizalofop-P	Solo	pg	274,0224
Quizalofop-p-ethyl	Solo	ng	23,66484

Quizalofop ethyl ester	Ar	pg	291,5075
Quizalofop ethyl ester	Solo	pg	256,3107
Radioactive species, alpha emitters	Água	mBq	1,918014
Radioactive species, Nuclides, unspecified	Água	mBq	478,5942
Radioactive species, other beta emitters	Ar	Bq	2,387177
Radium-224	Água	mBq	51,94425
Radium-226	Ar	mBq	27,56549
Radium-226	Água	Bq	2,065865
Radium-228	Ar	mBq	7,372113
Radium-228	Água	mBq	196,7587
Radon-220	Ar	mBq	426,2885
Radon-222	Ar	kBq	25,60361
Rhenium	Matéria prima	pg	1,968518
Rhodium	Matéria prima	ng	106,7549
Rhodium	Ar	ng	5,606789
Rimsulfuron	Solo	ng	14,66725
Rotenone	Solo	ng	1,845116
Rubidium	Água	µg	10,38885
Ruthenium-103	Ar	nBq	0,365573
Ruthenium-103	Água	µBq	14,99965
Samarium	Matéria prima	ng	200,3818
Sand	Matéria prima	g	4,00874
Scandium	Ar	µg	2,383131
Scandium	Água	mg	1,248938
Scandium	Solo	ng	122,6139
Selenium	Ar	µg	27,58645
Selenium	Água	µg	276,5424
Selenium	Solo	ng	602,4653
Sethoxydim	Ar	pg	627,4455
Sethoxydim	Solo	ng	8,203661
Shale	Matéria prima	g	4,197053
Silicon	Ar	mg	1,226358
Silicon	Água	g	2,002831
Silicon	Solo	mg	24,95835
Silicon dioxide	Água	µg	3,802497
Silicon tetrachloride	Ar	ng	448,0094
Silicon tetrafluoride	Ar	µg	1,298492
Silthiofam	Solo	ng	2,641354
Silver	Matéria prima	µg	84,16376
Silver	Ar	ng	111,416
Silver	Água	µg	740,3759
Silver	Solo	ng	54,04908
Silver-110	Ar	nBq	164,4553
Silver-110	Água	mBq	1,506851
Simazine	Solo	µg	1,198812
Sodium	Matéria prima	µg	6,737696
Sodium	Ar	mg	1,664299
Sodium	Água	g	3,169023

Sodium	Solo	mg	2,630897
Sodium-24	Água	µBq	525,5492
Sodium chlorate	Ar	µg	7,748297
Sodium chloride	Matéria prima	g	1,635248
Sodium dichromate	Ar	ng	397,3008
Sodium formate	Ar	ng	10,04592
Sodium formate	Água	ng	24,13472
Sodium hydroxide	Ar	µg	1,292655
Sodium nitrate	Matéria prima	mg	72,03767
Sodium sulfate	Matéria prima	mg	121,382
Sodium tetrahydroborate	Ar	ng	4,15161
Solids, inorganic	Água	mg	20,52265
Spinosad	Solo	ng	3,609516
Spiroxamine	Solo	ng	42,2839
Spodumene	Matéria prima	µg	7,880887
Strontium	Matéria prima	µg	17,34574
Strontium	Ar	µg	61,33658
Strontium	Água	mg	37,15689
Strontium	Solo	µg	17,61817
Strontium-89	Água	µBq	215,9482
Strontium-90	Água	mBq	56,42259
Styrene	Ar	µg	89,70962
Sulfate	Ar	mg	8,355307
Sulfate	Água	g	5,521172
Sulfate	Solo	µg	47,83135
Sulfentrazone	Ar	ng	5,999925
Sulfentrazone	Solo	mg	3,819517
Sulfide	Água	µg	667,7295
Sulfite	Água	µg	679,6317
Sulfosate	Solo	ng	137,7003
Sulfosulfuron	Solo	ng	1,647852
Sulfur	Matéria prima	mg	5,891983
Sulfur	Água	mg	12,69604
Sulfur	Solo	mg	4,220261
Sulfur dioxide	Ar	g	1,459696
Sulfur hexafluoride	Ar	µg	4,182278
Sulfur oxides	Ar	mg	4,807787
Sulfur trioxide	Ar	µg	8,719822
Sulfuric acid	Ar	µg	3,459541
Sulfuric acid	Água	µg	42,52137
Sulfuric acid	Solo	µg	73,88327
Suspended solids, unspecified	Água	g	2,376268
t-Butyl methyl ether	Ar	ng	568,5977
t-Butyl methyl ether	Água	ng	141,6903
t-Butylamine	Ar	ng	828,2973
t-Butylamine	Água	µg	1,987937
Talc	Matéria prima	mg	5,979774
Tantalum	Matéria prima	µg	40,79928

Tau-fluvalinate	Solo	pg	0,01464
Tebuconazole	Ar	pg	0,012698
Tebuconazole	Água	pg	0,003928
Tebuconazole	Solo	ng	174,4626
Tebupirimphos	Solo	ng	56,11958
Tebutam	Solo	µg	1,057385
Technetium-99m	Água	µBq	183,0681
Teflubenzuron	Solo	ng	105,3812
Tefluthrin	Ar	pg	166,1272
Tefluthrin	Água	pg	0,000816
Tefluthrin	Solo	ng	44,68457
Tellurium	Matéria prima	pg	671,2636
Tellurium	Ar	ng	7,579018
Tellurium-123m	Água	µBq	84,13081
Tellurium-132	Água	µBq	4,424004
Terbacil	Solo	ng	273,8863
Terbufos	Solo	µg	1,202481
Terbuthylazin	Solo	µg	7,968294
Terpenes	Ar	µg	120,7448
Tetramethyl ammonium hydroxide	Ar	ng	149,9703
Thallium	Ar	ng	321,1745
Thallium	Água	µg	582,2604
Thallium	Solo	ng	31,98672
Thiamethoxam	Solo	µg	2,721807
Thiazole, 2-(thiocyanatemethylthio)benzo-	Solo	µg	5,054662
Thifensulfuron	Ar	pg	85,51368
Thifensulfuron-methyl	Solo	pg	567,7333
Thiobencarb	Solo	pg	358,0904
Thiocyanate, ion	Água	pg	862,436
Thiodicarb	Ar	pg	304,7524
Thiodicarb	Solo	ng	107,0996
Thiophanate-methyl	Solo	ng	190,3248
Thiram	Solo	ng	31,21552
Thorium	Ar	ng	74,22413
Thorium-228	Ar	mBq	2,975326
Thorium-228	Água	mBq	207,7823
Thorium-230	Ar	mBq	5,197302
Thorium-230	Água	mBq	466,8561
Thorium-232	Ar	mBq	4,222586
Thorium-232	Água	mBq	1,800135
Thorium-234	Ar	mBq	1,163433
Thorium-234	Água	mBq	5,516304
Tin	Matéria prima	µg	623,1834
Tin	Ar	µg	40,34921
Tin	Água	mg	3,608585
Tin	Solo	µg	6,097709
Titanium	Matéria prima	mg	16,43136
Titanium	Ar	µg	73,31556

Titanium	Água	mg	102,7017
Titanium	Solo	µg	431,419
TOC, Total Organic Carbon	Água	g	13,05414
Toluene	Ar	mg	1,898295
Toluene	Água	µg	214,791
Toluene, 2-chloro-	Ar	µg	5,30545
Toluene, 2-chloro-	Água	µg	12,06447
Tralkoxydim	Solo	ng	189,1862
Transformation, from annual crop	Matéria prima	mm2	668,2544
Transformation, from annual crop, greenhouse	Matéria prima	mm2	0,216145
Transformation, from annual crop, irrigated	Matéria prima	mm2	19,77361
Transformation, from annual crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	5,163008
Transformation, from annual crop, non-irrigated	Matéria prima	cm2	357,265
Transformation, from annual crop, non-irrigated, extensive	Matéria prima	mm2	33,7873
Transformation, from annual crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	91,26551
Transformation, from cropland fallow (non-use)	Matéria prima	mm2	0,035207
Transformation, from dump site, inert material landfill	Matéria prima	mm2	1,985747
Transformation, from dump site, residual material landfill	Matéria prima	mm2	0,985905
Transformation, from dump site, sanitary landfill	Matéria prima	mm2	4,014608
Transformation, from dump site, slag compartment	Matéria prima	mm2	0,024609
Transformation, from forest, extensive	Matéria prima	mm2	11,49971
Transformation, from forest, intensive	Matéria prima	mm2	298,2203
Transformation, from forest, primary (non-use)	Matéria prima	mm2	232,4082
Transformation, from forest, secondary (non-use)	Matéria prima	mm2	2,524126
Transformation, from forest, unspecified	Matéria prima	mm2	198,6554
Transformation, from grassland, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	461,8321
Transformation, from grassland, natural, for livestock grazing	Matéria prima	mm2	23,06387
Transformation, from heterogeneous, agricultural	Matéria prima	mm2	0,000803
Transformation, from industrial area	Matéria prima	mm2	0,547709
Transformation, from mineral extraction site	Matéria prima	mm2	4,482711
Transformation, from pasture, man made	Matéria prima	cm2	13,85656
Transformation, from pasture, man made, extensive	Matéria prima	mm2	0,005583
Transformation, from pasture, man made, intensive	Matéria prima	mm2	86,76946
Transformation, from permanent crop	Matéria prima	mm2	99,98568
Transformation, from permanent crop, irrigated	Matéria prima	cm2	75,70948
Transformation, from permanent crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	1,327973
Transformation, from permanent crop, non-irrigated	Matéria prima	cm2	35,58228
Transformation, from permanent crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	0,196132
Transformation, from river, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	0,140141
Transformation, from seabed, infrastructure	Matéria prima	mm2	0,000748
Transformation, from seabed, unspecified	Matéria prima	mm2	11,24819
Transformation, from shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	mm2	7,183949
Transformation, from traffic area, rail/road embankment	Matéria prima	mm2	1,265652
Transformation, from traffic area, road network	Matéria prima	mm2	3,83E-05
Transformation, from unknown	Matéria prima	mm2	31,9061
Transformation, from unspecified, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	2,957624
Transformation, from urban, continuously built	Matéria prima	mm2	0,002164
Transformation, from urban, green areas	Matéria prima	mm2	0,000807

Transformation, from wetland, inland (non-use)	Matéria prima	mm2	0,239738
Transformation, to annual crop	Matéria prima	mm2	166,2844
Transformation, to annual crop, fallow	Matéria prima	mm2	0,07464
Transformation, to annual crop, greenhouse	Matéria prima	mm2	0,216145
Transformation, to annual crop, irrigated	Matéria prima	mm2	19,77361
Transformation, to annual crop, irrigated, extensive	Matéria prima	mm2	0,271054
Transformation, to annual crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	15,13136
Transformation, to annual crop, non-irrigated	Matéria prima	mm2	248,5515
Transformation, to annual crop, non-irrigated, extensive	Matéria prima	mm2	34,61834
Transformation, to annual crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	cm2	356,4049
Transformation, to dump site	Matéria prima	mm2	4,102833
Transformation, to dump site, inert material landfill	Matéria prima	mm2	1,985747
Transformation, to dump site, residual material landfill	Matéria prima	mm2	0,985927
Transformation, to dump site, sanitary landfill	Matéria prima	mm2	4,014608
Transformation, to dump site, slag compartment	Matéria prima	mm2	0,024609
Transformation, to forest, extensive	Matéria prima	mm2	1,173812
Transformation, to forest, intensive	Matéria prima	mm2	267,9613
Transformation, to forest, secondary (non-use)	Matéria prima	mm2	4,51E-05
Transformation, to forest, unspecified	Matéria prima	mm2	9,442087
Transformation, to grassland, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	0,141078
Transformation, to grassland, natural, for livestock grazing	Matéria prima	mm2	48,29066
Transformation, to heterogeneous, agricultural	Matéria prima	mm2	0,914238
Transformation, to industrial area	Matéria prima	mm2	28,74819
Transformation, to inland waterbody, unspecified	Matéria prima	mm2	0,0003
Transformation, to mineral extraction site	Matéria prima	mm2	42,33951
Transformation, to pasture, man made	Matéria prima	mm2	49,36376
Transformation, to pasture, man made, extensive	Matéria prima	mm2	0,005583
Transformation, to pasture, man made, intensive	Matéria prima	mm2	82,63088
Transformation, to permanent crop	Matéria prima	cm2	25,51515
Transformation, to permanent crop, irrigated	Matéria prima	cm2	75,70948
Transformation, to permanent crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	1,327973
Transformation, to permanent crop, non-irrigated	Matéria prima	cm2	35,58228
Transformation, to permanent crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	0,196132
Transformation, to seabed, drilling and mining	Matéria prima	mm2	11,24416
Transformation, to seabed, infrastructure	Matéria prima	mm2	0,004026
Transformation, to seabed, unspecified	Matéria prima	mm2	0,000748
Transformation, to shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	mm2	7,010869
Transformation, to traffic area, rail network	Matéria prima	mm2	0,078917
Transformation, to traffic area, rail/road embankment	Matéria prima	mm2	2,329571
Transformation, to traffic area, road network	Matéria prima	mm2	4,154533
Transformation, to unknown	Matéria prima	mm2	2,163977
Transformation, to unspecified, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	0,026863
Transformation, to urban, continuously built	Matéria prima	mm2	0,003551
Transformation, to urban, discontinuously built	Matéria prima	mm2	1,623989
Transformation, to urban/industrial fallow	Matéria prima	mm2	0,024232
Transformation, to water bodies, artificial	Matéria prima	mm2	164,8884
Transformation, to wetland, inland (non-use)	Matéria prima	mm2	0,000143
Triadimenol	Solo	ng	2,499739

Triallate	Solo	ng	1,588569
Triasulfuron	Solo	pg	470,6861
Tribenuron	Solo	pg	218,1595
Tribenuron-methyl	Solo	ng	4,907039
Tributyltin compounds	Água	ng	7,893116
Trichlorfon	Solo	ng	278,1909
Triclopyr	Solo	ng	24,88478
Triethylene glycol	Água	µg	3,640896
Trifloxystrobin	Ar	pg	54,7253
Trifloxystrobin	Água	pg	0,000147
Trifloxystrobin	Solo	ng	217,2581
Trifluralin	Ar	ng	86,41674
Trifluralin	Solo	ng	664,5798
Triforine	Solo	ng	5,881099
Trimethylamine	Ar	ng	166,3094
Trimethylamine	Água	ng	399,1425
Trinexapac-ethyl	Solo	ng	173,3294
Trioctyltin	Água	pg	0,00972
Triphenyltin	Água	pg	0,004131
Trisodium phosphate	Ar	ng	5,703688
Tungsten	Ar	ng	263,7881
Tungsten	Água	µg	161,4039
Ulexite	Matéria prima	µg	531,9846
Uranium	Matéria prima	mg	1,484369
Uranium	Ar	ng	99,12524
Uranium-234	Ar	mBq	7,656031
Uranium-234	Água	mBq	6,382095
Uranium-235	Ar	µBq	113,9304
Uranium-235	Água	mBq	7,120985
Uranium-238	Ar	mBq	19,5811
Uranium-238	Água	mBq	58,39211
Uranium alpha	Ar	mBq	13,10673
Uranium alpha	Água	mBq	215,3049
Urea	Água	ng	745,3851
Vanadium	Matéria prima	ng	225,3756
Vanadium	Ar	µg	531,7697
Vanadium	Água	mg	16,65194
Vanadium	Solo	µg	36,73379
Vermiculite	Matéria prima	mg	5,953759
Vinclozolin	Solo	pg	634,9601
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	Ar	µg	167,3255
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	Água	mg	1,775131
Volume occupied, final repository for low-active radioactive waste	Matéria prima	mm3	6,173436
Volume occupied, final repository for radioactive waste	Matéria prima	mm3	0,392604
Volume occupied, reservoir	Matéria prima	m3day	255,4029
Volume occupied, underground deposit	Matéria prima	mm3	3,39714
Water	Ar	g	4,007292
Water, AR	Água	cm3	220,0273

Water, AT	Água	l	3,422209
Water, AU	Água	l	2,089912
Water, BA	Água	cm3	778,2991
Water, BD	Água	mm3	9,44E-06
Water, BE	Água	cm3	86,1036
Water, BG	Água	cm3	469,8117
Water, BR	Água	m3	5,335809
Water, CA	Água	l	5,180096
Water, CH	Água	l	7,46538
Water, CI	Água	mm3	152,5945
Water, CL	Água	l	2,198044
Water, CN	Água	l	45,01126
Water, CO	Água	cm3	315,3142
Water, cooling, unspecified natural origin, AR	Matéria prima	cm3	9,601581
Water, cooling, unspecified natural origin, AT	Matéria prima	cm3	1,804914
Water, cooling, unspecified natural origin, AU	Matéria prima	cm3	31,70421
Water, cooling, unspecified natural origin, BA	Matéria prima	cm3	1,792724
Water, cooling, unspecified natural origin, BE	Matéria prima	cm3	12,12652
Water, cooling, unspecified natural origin, BG	Matéria prima	cm3	7,713445
Water, cooling, unspecified natural origin, BR	Matéria prima	l	12,92746
Water, cooling, unspecified natural origin, CA	Matéria prima	cm3	40,92319
Water, cooling, unspecified natural origin, CH	Matéria prima	cm3	9,829197
Water, cooling, unspecified natural origin, CL	Matéria prima	cm3	4,470806
Water, cooling, unspecified natural origin, CN	Matéria prima	cm3	267,5911
Water, cooling, unspecified natural origin, CO	Matéria prima	cm3	2,245909
Water, cooling, unspecified natural origin, CY	Matéria prima	mm3	318,9273
Water, cooling, unspecified natural origin, CZ	Matéria prima	cm3	114,5689
Water, cooling, unspecified natural origin, DE	Matéria prima	cm3	72,97343
Water, cooling, unspecified natural origin, DK	Matéria prima	cm3	1,705483
Water, cooling, unspecified natural origin, EE	Matéria prima	cm3	1,759055
Water, cooling, unspecified natural origin, ES	Matéria prima	cm3	24,14555
Water, cooling, unspecified natural origin, Europe without Switzerland	Matéria prima	cm3	10,54541
Water, cooling, unspecified natural origin, FI	Matéria prima	cm3	6,827328
Water, cooling, unspecified natural origin, FR	Matéria prima	cm3	103,7892
Water, cooling, unspecified natural origin, GB	Matéria prima	cm3	35,55417
Water, cooling, unspecified natural origin, GLO	Matéria prima	cm3	21,26798
Water, cooling, unspecified natural origin, GR	Matéria prima	cm3	17,88432
Water, cooling, unspecified natural origin, HR	Matéria prima	mm3	742,8407
Water, cooling, unspecified natural origin, HU	Matéria prima	cm3	5,306519
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, Africa	Matéria prima	mm3	3,303136
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, Asia, without China and GCC	Matéria prima	mm3	0,002518
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, EU27 & EFTA	Matéria prima	mm3	15,69002
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, Gulf Cooperation Council	Matéria prima	mm3	0,004292
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	Matéria prima	mm3	17,54028

Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, South America	Matéria prima	mm3	2,455282
Water, cooling, unspecified natural origin, ID	Matéria prima	cm3	12,106
Water, cooling, unspecified natural origin, IE	Matéria prima	cm3	2,935761
Water, cooling, unspecified natural origin, IN	Matéria prima	cm3	104,3838
Water, cooling, unspecified natural origin, IR	Matéria prima	cm3	20,65647
Water, cooling, unspecified natural origin, IS	Matéria prima	mm3	0,994407
Water, cooling, unspecified natural origin, IT	Matéria prima	cm3	25,84802
Water, cooling, unspecified natural origin, JP	Matéria prima	cm3	39,93881
Water, cooling, unspecified natural origin, KR	Matéria prima	cm3	35,34206
Water, cooling, unspecified natural origin, LT	Matéria prima	mm3	405,1315
Water, cooling, unspecified natural origin, LU	Matéria prima	mm3	76,37324
Water, cooling, unspecified natural origin, LV	Matéria prima	mm3	740,9339
Water, cooling, unspecified natural origin, MA	Matéria prima	cm3	1,545808
Water, cooling, unspecified natural origin, MK	Matéria prima	mm3	789,1711
Water, cooling, unspecified natural origin, MT	Matéria prima	mm3	164,8284
Water, cooling, unspecified natural origin, MX	Matéria prima	cm3	21,09201
Water, cooling, unspecified natural origin, MY	Matéria prima	cm3	6,957969
Water, cooling, unspecified natural origin, NL	Matéria prima	cm3	12,62356
Water, cooling, unspecified natural origin, NO	Matéria prima	mm3	85,57316
Water, cooling, unspecified natural origin, OCE	Matéria prima	mm3	0,242195
Water, cooling, unspecified natural origin, PE	Matéria prima	cm3	1,811966
Water, cooling, unspecified natural origin, PH	Matéria prima	mm3	6,157102
Water, cooling, unspecified natural origin, PL	Matéria prima	cm3	83,57045
Water, cooling, unspecified natural origin, PT	Matéria prima	cm3	3,263144
Water, cooling, unspecified natural origin, RER	Matéria prima	cm3	241,9902
Water, cooling, unspecified natural origin, RNA	Matéria prima	mm3	20,40363
Water, cooling, unspecified natural origin, RO	Matéria prima	cm3	13,2284
Water, cooling, unspecified natural origin, RoW	Matéria prima	l	12,50618
Water, cooling, unspecified natural origin, RS	Matéria prima	cm3	26,64588
Water, cooling, unspecified natural origin, RU	Matéria prima	cm3	122,6996
Water, cooling, unspecified natural origin, SA	Matéria prima	cm3	18,773
Water, cooling, unspecified natural origin, SE	Matéria prima	cm3	13,43914
Water, cooling, unspecified natural origin, SI	Matéria prima	cm3	10,61762
Water, cooling, unspecified natural origin, SK	Matéria prima	cm3	9,663337
Water, cooling, unspecified natural origin, TH	Matéria prima	cm3	6,768001
Water, cooling, unspecified natural origin, TR	Matéria prima	cm3	10,5577
Water, cooling, unspecified natural origin, TW	Matéria prima	cm3	12,23443
Water, cooling, unspecified natural origin, TZ	Matéria prima	mm3	444,7356
Water, cooling, unspecified natural origin, UA	Matéria prima	cm3	29,64222
Water, cooling, unspecified natural origin, US	Matéria prima	cm3	220,2631
Water, cooling, unspecified natural origin, WEU	Matéria prima	mm3	0,834059
Water, cooling, unspecified natural origin, ZA	Matéria prima	cm3	2,359072
Water, CR	Água	mm3	1,764469
Water, CY	Água	mm3	316,9621
Water, CZ	Água	cm3	271,9992
Water, DE	Água	l	2,369008
Water, DK	Água	cm3	3,044949
Water, EC	Água	mm3	20,03798

Water, EE	Água	cm3	5,356048
Water, ES	Água	l	3,307851
Water, Europe without Switzerland	Água	cm3	30,78564
Water, Europe, without Russia and Turkey	Água	mm3	395,2812
Water, FI	Água	l	1,472734
Water, FR	Água	l	11,56743
Water, GB	Água	cm3	579,1448
Water, GH	Água	mm3	149,7261
Water, GLO	Água	cm3	46,80205
Water, GR	Água	cm3	725,6458
Water, HN	Água	mm3	0,189621
Water, HR	Água	cm3	34,97754
Water, HU	Água	cm3	36,04513
Water, IAI Area, Africa	Água	mm3	284,9954
Water, IAI Area, Asia, without China and GCC	Água	mm3	372,0806
Water, IAI Area, EU27 & EFTA	Água	cm3	1,050313
Water, IAI Area, Gulf Cooperation Council	Água	cm3	1,513151
Water, IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	Água	mm3	740,6638
Water, IAI Area, South America	Água	mm3	164,0077
Water, ID	Água	cm3	162,5218
Water, IE	Água	cm3	93,27521
Water, IL	Água	mm3	0,664592
Water, IN	Água	l	6,026855
Water, in air	Matéria prima	mm3	30,81327
Water, IR	Água	cm3	911,5301
Water, IS	Água	cm3	846,1256
Water, IT	Água	l	1,892727
Water, JP	Água	l	3,357012
Water, KR	Água	cm3	161,2204
Water, lake, BR	Matéria prima	cm3	16,52625
Water, lake, CA	Matéria prima	mm3	407,3208
Water, lake, CH	Matéria prima	mm3	160,5237
Water, lake, CN	Matéria prima	mm3	0,018563
Water, lake, CO	Matéria prima	mm3	124,1243
Water, lake, DE	Matéria prima	mm3	0,458635
Water, lake, Europe without Switzerland	Matéria prima	mm3	426,1076
Water, lake, GLO	Matéria prima	mm3	59,54184
Water, lake, IN	Matéria prima	mm3	150,5192
Water, lake, RER	Matéria prima	mm3	2,610524
Water, lake, RNA	Matéria prima	mm3	0,002669
Water, lake, RoW	Matéria prima	cm3	4,51411
Water, lake, SE	Matéria prima	mm3	0,004469
Water, lake, US	Matéria prima	mm3	0,008964
Water, lake, ZA	Matéria prima	mm3	95,1354
Water, LT	Água	cm3	62,84532
Water, LU	Água	cm3	42,41603
Water, LV	Água	cm3	319,1479
Water, MA	Água	cm3	1,088576

Water, MK	Água	cm3	57,5053
Water, MT	Água	mm3	164,2715
Water, MX	Água	l	2,645969
Water, MY	Água	cm3	177,6244
Water, NL	Água	cm3	24,81218
Water, NO	Água	cm3	504,8031
Water, NORDEL	Água	mm3	0,874893
Water, NP	Água	cm3	207,5253
Water, NZ	Água	mm3	0,013409
Water, OCE	Água	mm3	67,14609
Water, PE	Água	cm3	35,74707
Water, PG	Água	mm3	64,72644
Water, PH	Água	cm3	21,95379
Water, PL	Água	cm3	341,5344
Water, PT	Água	l	1,426976
Water, RAF	Água	cm3	2,132794
Water, RAS	Água	cm3	9,407958
Water, RER	Água	cm3	522,269
Water, river, AR	Matéria prima	mm3	283,3241
Water, river, AT	Matéria prima	mm3	0,266291
Water, river, AU	Matéria prima	mm3	428,431
Water, river, BE	Matéria prima	mm3	1,020149
Water, river, BG	Matéria prima	mm3	0,136025
Water, river, BR	Matéria prima	l	1,290473
Water, river, CA	Matéria prima	cm3	16,24748
Water, river, CH	Matéria prima	cm3	4,454494
Water, river, CN	Matéria prima	l	1,333935
Water, river, CO	Matéria prima	cm3	2,206806
Water, river, CZ	Matéria prima	mm3	0,005991
Water, river, DE	Matéria prima	cm3	3,409749
Water, river, DK	Matéria prima	mm3	0,330598
Water, river, ES	Matéria prima	cm3	56,62017
Water, river, Europe without Switzerland	Matéria prima	cm3	6,682044
Water, river, FI	Matéria prima	mm3	0,239897
Water, river, FR	Matéria prima	cm3	12,9376
Water, river, GB	Matéria prima	cm3	1,375691
Water, river, GLO	Matéria prima	cm3	9,943486
Water, river, HU	Matéria prima	mm3	0,111254
Water, river, IN	Matéria prima	cm3	914,6289
Water, river, IT	Matéria prima	mm3	6,316363
Water, river, JP	Matéria prima	mm3	2,98E-05
Water, river, KR	Matéria prima	mm3	422,8511
Water, river, LU	Matéria prima	mm3	0,003158
Water, river, MA	Matéria prima	cm3	37,80067
Water, river, MY	Matéria prima	cm3	22,4658
Water, river, NL	Matéria prima	mm3	0,510955
Water, river, NO	Matéria prima	mm3	0,127334
Water, river, PE	Matéria prima	cm3	47,43515

Water, river, PH	Matéria prima	cm3	338,7219
Water, river, PL	Matéria prima	mm3	0,020358
Water, river, PT	Matéria prima	mm3	0,072663
Water, river, RAS	Matéria prima	cm3	19,20553
Water, river, RER	Matéria prima	cm3	2,430023
Water, river, RLA	Matéria prima	cm3	1,225256
Water, river, RNA	Matéria prima	cm3	1,731216
Water, river, RO	Matéria prima	mm3	557,0823
Water, river, RoW	Matéria prima	l	4,181575
Water, river, RU	Matéria prima	cm3	3,758846
Water, river, SE	Matéria prima	mm3	14,21557
Water, river, SK	Matéria prima	mm3	0,000333
Water, river, TN	Matéria prima	cm3	5,389158
Water, river, TZ	Matéria prima	mm3	8,710892
Water, river, US	Matéria prima	cm3	347,3256
Water, river, WEU	Matéria prima	mm3	0,000114
Water, river, ZA	Matéria prima	cm3	55,60383
Water, RLA	Água	cm3	33,35856
Water, RME	Água	cm3	20,97247
Water, RNA	Água	cm3	4,907905
Water, RO	Água	l	2,260733
Water, RoW	Água	l	149,1616
Water, RS	Água	l	1,242492
Water, RU	Água	l	9,745468
Water, SA	Água	cm3	18,88351
Water, salt, ocean	Matéria prima	cm3	47,94778
Water, salt, sole	Matéria prima	cm3	44,09785
Water, SE	Água	l	6,799585
Water, SI	Água	cm3	612,7719
Water, SK	Água	cm3	504,8356
Water, TH	Água	cm3	68,60163
Water, TR	Água	l	2,048171
Water, turbine use, unspecified natural origin, AR	Matéria prima	cm3	212,757
Water, turbine use, unspecified natural origin, AT	Matéria prima	l	3,421322
Water, turbine use, unspecified natural origin, AU	Matéria prima	l	2,052251
Water, turbine use, unspecified natural origin, BA	Matéria prima	cm3	776,7645
Water, turbine use, unspecified natural origin, BE	Matéria prima	cm3	74,15362
Water, turbine use, unspecified natural origin, BG	Matéria prima	cm3	462,4818
Water, turbine use, unspecified natural origin, BR	Matéria prima	m3	5,366672
Water, turbine use, unspecified natural origin, CA	Matéria prima	l	5,153684
Water, turbine use, unspecified natural origin, CH	Matéria prima	l	7,45635
Water, turbine use, unspecified natural origin, CL	Matéria prima	l	2,19309
Water, turbine use, unspecified natural origin, CN	Matéria prima	l	44,73275
Water, turbine use, unspecified natural origin, CO	Matéria prima	cm3	312,3666
Water, turbine use, unspecified natural origin, CZ	Matéria prima	cm3	161,2544
Water, turbine use, unspecified natural origin, DE	Matéria prima	l	2,298733
Water, turbine use, unspecified natural origin, DK	Matéria prima	cm3	2,291323
Water, turbine use, unspecified natural origin, EE	Matéria prima	cm3	3,651504

Water, turbine use, unspecified natural origin, ES	Matéria prima	1	3,284467
Water, turbine use, unspecified natural origin, FI	Matéria prima	1	1,466892
Water, turbine use, unspecified natural origin, FR	Matéria prima	1	11,46485
Water, turbine use, unspecified natural origin, GB	Matéria prima	cm3	543,2319
Water, turbine use, unspecified natural origin, GLO	Matéria prima	mm3	6,832648
Water, turbine use, unspecified natural origin, GR	Matéria prima	cm3	708,0339
Water, turbine use, unspecified natural origin, HR	Matéria prima	cm3	34,74954
Water, turbine use, unspecified natural origin, HU	Matéria prima	cm3	30,77285
Water, turbine use, unspecified natural origin, ID	Matéria prima	cm3	136,6273
Water, turbine use, unspecified natural origin, IE	Matéria prima	cm3	90,3014
Water, turbine use, unspecified natural origin, IN	Matéria prima	1	4,707457
Water, turbine use, unspecified natural origin, IR	Matéria prima	cm3	890,5858
Water, turbine use, unspecified natural origin, IS	Matéria prima	cm3	849,1881
Water, turbine use, unspecified natural origin, IT	Matéria prima	1	1,87077
Water, turbine use, unspecified natural origin, JP	Matéria prima	1	3,318455
Water, turbine use, unspecified natural origin, KR	Matéria prima	cm3	126,8282
Water, turbine use, unspecified natural origin, LT	Matéria prima	cm3	62,46495
Water, turbine use, unspecified natural origin, LU	Matéria prima	cm3	42,34375
Water, turbine use, unspecified natural origin, LV	Matéria prima	cm3	318,3956
Water, turbine use, unspecified natural origin, MK	Matéria prima	cm3	56,86129
Water, turbine use, unspecified natural origin, MX	Matéria prima	1	2,624576
Water, turbine use, unspecified natural origin, MY	Matéria prima	cm3	170,7603
Water, turbine use, unspecified natural origin, NL	Matéria prima	cm3	12,9403
Water, turbine use, unspecified natural origin, NO	Matéria prima	cm3	516,9967
Water, turbine use, unspecified natural origin, NP	Matéria prima	cm3	207,5253
Water, turbine use, unspecified natural origin, PE	Matéria prima	cm3	39,77925
Water, turbine use, unspecified natural origin, PL	Matéria prima	cm3	269,6801
Water, turbine use, unspecified natural origin, PT	Matéria prima	1	1,424142
Water, turbine use, unspecified natural origin, RER	Matéria prima	cm3	5,606396
Water, turbine use, unspecified natural origin, RNA	Matéria prima	mm3	1,754902
Water, turbine use, unspecified natural origin, RO	Matéria prima	1	2,248231
Water, turbine use, unspecified natural origin, RoW	Matéria prima	1	136,2113
Water, turbine use, unspecified natural origin, RS	Matéria prima	1	1,216657
Water, turbine use, unspecified natural origin, RU	Matéria prima	1	9,624408
Water, turbine use, unspecified natural origin, SE	Matéria prima	1	6,787412
Water, turbine use, unspecified natural origin, SI	Matéria prima	cm3	602,3665
Water, turbine use, unspecified natural origin, SK	Matéria prima	cm3	495,7162
Water, turbine use, unspecified natural origin, TH	Matéria prima	cm3	61,9421
Water, turbine use, unspecified natural origin, TR	Matéria prima	1	2,03867
Water, turbine use, unspecified natural origin, TW	Matéria prima	cm3	337,0261
Water, turbine use, unspecified natural origin, TZ	Matéria prima	cm3	30,35122
Water, turbine use, unspecified natural origin, UA	Matéria prima	cm3	965,7556
Water, turbine use, unspecified natural origin, US	Matéria prima	1	13,79869
Water, turbine use, unspecified natural origin, ZA	Matéria prima	cm3	22,1309
Water, TW	Água	cm3	349,1225
Water, TZ	Água	cm3	30,7003
Water, UA	Água	cm3	995,0776
Water, UCTE	Água	mm3	0,13163

Water, UCTE without Germany	Água	mm3	0,005099
Water, unspecified natural origin, AT	Matéria prima	mm3	0,139612
Water, unspecified natural origin, AU	Matéria prima	mm3	0,001264
Water, unspecified natural origin, BD	Matéria prima	mm3	9,44E-06
Water, unspecified natural origin, BE	Matéria prima	mm3	2,181749
Water, unspecified natural origin, BG	Matéria prima	mm3	0,02999
Water, unspecified natural origin, BR	Matéria prima	cm3	174,2633
Water, unspecified natural origin, CA	Matéria prima	cm3	1,179618
Water, unspecified natural origin, CH	Matéria prima	cm3	26,63281
Water, unspecified natural origin, CL	Matéria prima	mm3	0,053914
Water, unspecified natural origin, CN	Matéria prima	mm3	708,0805
Water, unspecified natural origin, CO	Matéria prima	mm3	38,29242
Water, unspecified natural origin, CZ	Matéria prima	mm3	0,369117
Water, unspecified natural origin, DE	Matéria prima	mm3	3,002882
Water, unspecified natural origin, DK	Matéria prima	mm3	0,072981
Water, unspecified natural origin, EE	Matéria prima	mm3	0,013837
Water, unspecified natural origin, ES	Matéria prima	mm3	9,432033
Water, unspecified natural origin, Europe without Switzerland	Matéria prima	cm3	11,5314
Water, unspecified natural origin, FI	Matéria prima	mm3	0,49259
Water, unspecified natural origin, FR	Matéria prima	mm3	2,079393
Water, unspecified natural origin, GB	Matéria prima	mm3	1,098349
Water, unspecified natural origin, GLO	Matéria prima	cm3	9,335014
Water, unspecified natural origin, HN	Matéria prima	mm3	0,189621
Water, unspecified natural origin, HU	Matéria prima	mm3	0,068292
Water, unspecified natural origin, IAI Area, Africa	Matéria prima	mm3	36,26308
Water, unspecified natural origin, IAI Area, Asia, without China and GCC	Matéria prima	mm3	69,67034
Water, unspecified natural origin, IAI Area, EU27 & EFTA	Matéria prima	mm3	207,2292
Water, unspecified natural origin, IAI Area, Gulf Cooperation Council	Matéria prima	mm3	3,242811
Water, unspecified natural origin, IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	Matéria prima	mm3	267,9832
Water, unspecified natural origin, IAI Area, South America	Matéria prima	mm3	108,6405
Water, unspecified natural origin, ID	Matéria prima	mm3	0,462238
Water, unspecified natural origin, IN	Matéria prima	cm3	38,56892
Water, unspecified natural origin, IT	Matéria prima	mm3	1,564651
Water, unspecified natural origin, JP	Matéria prima	mm3	2,589735
Water, unspecified natural origin, KR	Matéria prima	mm3	1,975828
Water, unspecified natural origin, LU	Matéria prima	mm3	0,001127
Water, unspecified natural origin, MX	Matéria prima	mm3	0,00118
Water, unspecified natural origin, NL	Matéria prima	mm3	2,089023
Water, unspecified natural origin, NO	Matéria prima	mm3	0,128499
Water, unspecified natural origin, OCE	Matéria prima	mm3	98,33449
Water, unspecified natural origin, PE	Matéria prima	mm3	386,1497
Water, unspecified natural origin, PG	Matéria prima	mm3	7,902229
Water, unspecified natural origin, PH	Matéria prima	mm3	1,539275
Water, unspecified natural origin, PL	Matéria prima	mm3	0,488299
Water, unspecified natural origin, PT	Matéria prima	mm3	0,016025
Water, unspecified natural origin, RAF	Matéria prima	cm3	2,509169

Water, unspecified natural origin, RER	Matéria prima	cm3	113,5693
Water, unspecified natural origin, RER w/o CH+DE	Matéria prima	mm3	0,079425
Water, unspecified natural origin, RLA	Matéria prima	cm3	3,438482
Water, unspecified natural origin, RME	Matéria prima	cm3	24,6735
Water, unspecified natural origin, RNA	Matéria prima	mm3	864,0001
Water, unspecified natural origin, RoW	Matéria prima	cm3	408,2097
Water, unspecified natural origin, RU	Matéria prima	cm3	3,511045
Water, unspecified natural origin, SE	Matéria prima	mm3	0,637374
Water, unspecified natural origin, SK	Matéria prima	mm3	0,005792
Water, unspecified natural origin, TH	Matéria prima	mm3	0,00448
Water, unspecified natural origin, TR	Matéria prima	mm3	0,006663
Water, unspecified natural origin, TW	Matéria prima	mm3	0,007544
Water, unspecified natural origin, UA	Matéria prima	mm3	0,106343
Water, unspecified natural origin, US	Matéria prima	mm3	879,8954
Water, unspecified natural origin, VN	Matéria prima	mm3	0,861389
Water, unspecified natural origin, WEU	Matéria prima	mm3	0,125765
Water, unspecified natural origin, ZA	Matéria prima	mm3	335,2889
Water, US	Água	l	14,01667
Water, VN	Água	mm3	14,41403
Water, well, AT	Matéria prima	mm3	0,000566
Water, well, AU	Matéria prima	cm3	5,614742
Water, well, BD	Matéria prima	mm3	1,81E-06
Water, well, BE	Matéria prima	mm3	0,00217
Water, well, BG	Matéria prima	mm3	8,15E-05
Water, well, BR	Matéria prima	l	1,043467
Water, well, CA	Matéria prima	cm3	1,374055
Water, well, CH	Matéria prima	cm3	3,376126
Water, well, CN	Matéria prima	cm3	569,0417
Water, well, CO	Matéria prima	mm3	103,3589
Water, well, CR	Matéria prima	mm3	0,025497
Water, well, CZ	Matéria prima	mm3	3,6E-06
Water, well, DE	Matéria prima	cm3	1,499429
Water, well, DK	Matéria prima	mm3	0,000198
Water, well, ES	Matéria prima	cm3	32,87161
Water, well, Europe without Switzerland	Matéria prima	cm3	1,638204
Water, well, Europe, without Russia and Turkey	Matéria prima	mm3	355,6428
Water, well, FI	Matéria prima	mm3	0,000144
Water, well, FR	Matéria prima	cm3	6,465571
Water, well, GB	Matéria prima	mm3	0,002921
Water, well, GLO	Matéria prima	cm3	1,46093
Water, well, HU	Matéria prima	mm3	6,67E-05
Water, well, ID	Matéria prima	cm3	1,518255
Water, well, IN	Matéria prima	l	1,576693
Water, well, IS	Matéria prima	mm3	0,115533
Water, well, IT	Matéria prima	mm3	0,004368
Water, well, JP	Matéria prima	mm3	0,000269
Water, well, KE	Matéria prima	mm3	0,073976
Water, well, LU	Matéria prima	mm3	6,72E-06

Water, well, MA	Matéria prima	cm3	32,04517
Water, well, MX	Matéria prima	mm3	0,000599
Water, well, MY	Matéria prima	cm3	1,953547
Water, well, NI	Matéria prima	mm3	0,014715
Water, well, NL	Matéria prima	mm3	0,000705
Water, well, NO	Matéria prima	mm3	7,65E-05
Water, well, NORDEL	Matéria prima	mm3	1,029285
Water, well, NZ	Matéria prima	mm3	0,126086
Water, well, PE	Matéria prima	cm3	18,13178
Water, well, PG	Matéria prima	mm3	68,24652
Water, well, PH	Matéria prima	cm3	52,95165
Water, well, PL	Matéria prima	mm3	1,22E-05
Water, well, PT	Matéria prima	mm3	5,86E-05
Water, well, RER	Matéria prima	cm3	5,704269
Water, well, RLA	Matéria prima	cm3	32,31008
Water, well, RNA	Matéria prima	cm3	2,287679
Water, well, RoW	Matéria prima	l	3,021049
Water, well, RU	Matéria prima	mm3	421,9737
Water, well, SE	Matéria prima	mm3	2,259495
Water, well, SK	Matéria prima	mm3	2E-07
Water, well, SV	Matéria prima	mm3	0,030847
Water, well, TH	Matéria prima	mm3	1,03E-07
Water, well, TN	Matéria prima	cm3	8,291261
Water, well, TR	Matéria prima	mm3	0,018646
Water, well, US	Matéria prima	cm3	505,6828
Water, well, WEU	Matéria prima	mm3	0,004995
Water, well, ZA	Matéria prima	cm3	5,382714
Water, WEU	Água	mm3	0,61491
Water, ZA	Água	cm3	28,35944
Water/m3	Ar	l	56,52335
Wood, hard, standing	Matéria prima	cm3	4,297543
Wood, soft, standing	Matéria prima	cm3	9,180219
Wood, unspecified, standing/m3	Matéria prima	mm3	0,260775
Xenon	Matéria prima	ng	336,9985
Xenon-131m	Ar	mBq	30,53293
Xenon-133	Ar	Bq	32,14791
Xenon-133m	Ar	mBq	1,210133
Xenon-135	Ar	Bq	8,972298
Xenon-135m	Ar	mBq	278,2613
Xenon-137	Ar	mBq	8,714728
Xenon-138	Ar	mBq	65,15387
Xylene	Ar	mg	3,113947
Xylene	Água	µg	150,1108
Zeta-cypermethrin	Ar	pg	360,2604
Zeta-cypermethrin	Solo	pg	15,43629
Zinc	Matéria prima	mg	50,07473
Zinc	Ar	µg	687,1716
Zinc	Água	mg	49,51582

Zinc	Solo	mg	2,540078
Zinc-65	Ar	nBq	69,98925
Zinc-65	Água	µBq	752,7432
Zineb	Solo	ng	4,102821
Ziram	Solo	pg	923,1347
Zirconium	Matéria prima	mg	2,42597
Zirconium	Ar	ng	10,26263
Zirconium-95	Ar	µBq	3,038411
Zirconium-95	Água	mBq	3,684486

**Anexo A.2 – Inventário dos processos de produção de um suporte de celular pela lógica
OLR para ACVC**

Substância	Compartimento	Unidade	Total
1-Butanol	Ar	µg	2,551176
1-Butanol	Água	µg	14,15396
1-Pentanol	Ar	ng	144,9136
1-Pentanol	Água	ng	347,7974
1-Pentene	Ar	ng	113,3484
1-Pentene	Água	ng	262,825
1-Propanol	Ar	µg	15,9657
1-Propanol	Água	ng	748,0239
1,3-Dioxolan-2-one	Água	ng	524,2717
1,4-Butanediol	Ar	ng	294,4999
1,4-Butanediol	Água	ng	677,0973
2-Aminopropanol	Ar	ng	136,4099
2-Aminopropanol	Água	ng	327,4319
2-Butene, 2-methyl-	Ar	pg	65,69735
2-Butene, 2-methyl-	Água	pg	157,676
2-Chlorobenzaldehyde	Água	pg	130,2013
2-Methyl-1-propanol	Ar	ng	433,6707
2-Methyl-1-propanol	Água	µg	1,040791
2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Ar	pg	360,216
2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Água	pg	803,3528
2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid	Solo	ng	-326,611
2-Nitrobenzoic acid	Ar	ng	329,2313
2-Propanol	Ar	µg	81,85164
2-Propanol	Água	µg	18,97114
2,4-D	Ar	ng	146,2566
2,4-D	Solo	µg	561,0896
2,4-D ester	Ar	ng	2,432413
2,4-D ester	Água	pg	286,4424
2,4-D ester	Solo	ng	11,18528
2,4-D, dimethylamine salt	Ar	pg	208,4158
2,4-D, dimethylamine salt	Água	ng	1,300761
2,4-D, dimethylamine salt	Solo	ng	41,56761

2,4-di-tert-butylphenol	Água	pg	446,1908
4-Methyl-2-pentanol	Água	pg	154,0404
4-Methyl-2-pentanone	Ar	ng	6,266601
4-Methyl-2-pentanone	Água	ng	249,591
Abamectin	Solo	ng	2,306333
Acenaphthene	Ar	µg	68,5918
Acenaphthene	Água	µg	54,87248
Acenaphthylene	Ar	ng	6,30461
Acenaphthylene	Água	ng	151,8324
Acephate	Ar	ng	15,54617
Acephate	Solo	µg	2,419337
Acetaldehyde	Ar	mg	1,897233
Acetaldehyde	Água	µg	60,73781
Acetamide	Ar	ng	3,826936
Acetamide	Solo	ng	54,96542
Acetamiprid	Solo	ng	49,41822
Acetic acid	Ar	mg	21,52802
Acetic acid	Água	µg	124,0194
Acetochlor	Solo	µg	16,78381
Acetone	Ar	µg	788,0644
Acetone	Água	µg	32,69853
Acetonitrile	Ar	µg	148,4061
Acetonitrile	Água	ng	231,0542
Acetyl chloride	Água	ng	273,218
Acidity, unspecified	Água	µg	102,9678
Acifluorfen	Ar	ng	2,13409
Acifluorfen	Solo	pg	91,47825
Aclonifen	Solo	pg	107,4029
Acrinathrin	Solo	pg	66,63167
Acrolein	Ar	µg	19,51528
Acrolein	Água	pg	386,2871
Acrylate	Água	µg	1,054583
Acrylic acid	Ar	ng	445,5825
Acrylonitrile	Ar	ng	2,756074
Acrylonitrile	Água	pg	66,13413
Actinides, radioactive, unspecified	Ar	mBq	14,23925
Actinides, radioactive, unspecified	Água	µBq	719,2329
Aerosols, radioactive, unspecified	Ar	µBq	3,204008
Alachlor	Ar	ng	15,10251
Alachlor	Solo	ng	555,5535
Aldehydes, unspecified	Ar	µg	7,944551
Aldicarb	Solo	ng	370,4962
Aldrin	Solo	mg	8,536443
Allyl chloride	Água	µg	-2,54859
Alpha-cypermethrin	Solo	ng	413,8267
Aluminium	Matéria prima	mg	263,5857
Aluminium	Ar	mg	26,85391
Aluminium	Água	g	1,568556

Aluminium	Solo	mg	8,037761
Aluminium hydroxide	Água	ng	4,669119
Ametryn	Solo	ng	22,32993
Amidosulfuron	Solo	pg	373,3898
Amine oxide	Ar	pg	458,7923
Ammonia	Ar	mg	422,1594
Ammonia	Solo	ng	47,54345
Ammonium carbonate	Ar	ng	938,9379
Ammonium sulfate	Água	pg	590,0765
Ammonium, ion	Água	mg	210,6373
Anhydrite	Matéria prima	µg	501,0608
Aniline	Ar	ng	879,9999
Aniline	Água	µg	2,243607
Anthracene	Ar	pg	23,06416
Anthracene	Água	µg	11,67813
Anthranilic acid	Ar	ng	256,5477
Anthraquinone	Solo	ng	-172,098
Antimony	Matéria prima	mg	26,51807
Antimony	Ar	µg	352,2455
Antimony	Água	mg	1,272594
Antimony	Solo	µg	3,246323
Antimony-122	Água	µBq	48,12886
Antimony-124	Ar	nBq	25,78623
Antimony-124	Água	mBq	4,679958
Antimony-125	Ar	µBq	1,245813
Antimony-125	Água	mBq	2,22195
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Água	µg	726,7035
Argon-40	Matéria prima	mg	565,4595
Argon-40	Ar	mg	560,495
Argon-41	Ar	mBq	1,401821
Arsenic	Ar	µg	147,5175
Arsenic	Água	mg	1,478585
Arsenic	Solo	µg	610,1381
Arsine	Ar	pg	5,194264
Asulam	Solo	ng	12,7921
Atrazine	Ar	ng	15,27326
Atrazine	Água	ng	18,77297
Atrazine	Solo	mg	6,883667
Azadirachtin	Solo	ng	398,7218
Azinphos-methyl	Solo	ng	34,12832
Azoxystrobin	Ar	ng	7,062326
Azoxystrobin	Solo	µg	2,912429
Barite	Água	mg	7,070726
Barium	Matéria prima	mg	145,9474
Barium	Ar	µg	192,3784
Barium	Água	mg	46,24034
Barium	Solo	µg	457,3315
Barium-140	Ar	nBq	445,0967

Barium-140	Água	µBq	1,114292
Barium sulfide	Água	ng	14,45355
Basalt	Matéria prima	mg	59,10172
Benfluralin	Solo	ng	105,0673
Benomyl	Solo	pg	923,9888
Bensulfuron methyl ester	Solo	pg	5,140834
Bentazone	Ar	ng	6,606792
Bentazone	Água	pg	553,3474
Bentazone	Solo	ng	25,9372
Benzal chloride	Ar	pg	73,29427
Benzal chloride	Água	pg	164,9067
Benzaldehyde	Ar	µg	14,35976
Benzaldehyde	Água	pg	54,05643
Benzene	Ar	mg	6,014154
Benzene	Água	mg	1,083302
Benzene, 1-methyl-2-nitro-	Ar	ng	284,2969
Benzene, 1,2-dichloro-	Ar	µg	1,470484
Benzene, 1,2-dichloro-	Água	µg	365,6072
Benzene, chloro-	Água	µg	545,0695
Benzene, ethyl-	Ar	µg	155,3181
Benzene, ethyl-	Água	µg	33,16004
Benzene, hexachloro-	Ar	ng	-3,08419
Benzene, hexachloro-	Água	pg	3,93275
Benzene, pentachloro-	Ar	pg	402,4584
Benzene, pentachloro-	Água	pg	6,453294
Benzene, pentachloronitro-	Solo	ng	351,7881
Benzo(a)anthracene	Ar	pg	72,8287
Benzo(a)anthracene	Água	ng	44,06841
Benzo(a)pyrene	Ar	µg	20,79029
Benzo(a)pyrene	Água	ng	5,354312
Benzo(b)fluoranthene	Ar	pg	67,37801
Benzo(b)fluoranthene	Água	ng	5,222106
Benzo(g,h,i)perylene	Ar	pg	12,72215
Benzo(g,h,i)perylene	Água	pg	734,8407
Benzo(k)fluoranthene	Ar	pg	48,49252
Benzo(k)fluoranthene	Água	ng	2,456814
Beryllium	Ar	ng	371,6921
Beryllium	Água	µg	345,2744
Beryllium	Solo	ng	82,95008
Bicarbonate, ion	Água	ng	4,867062
Bifenox	Solo	ng	-41,1383
Bifenthrin	Solo	ng	27,69383
Bitertanol	Solo	ng	-19,2521
BOD5, Biological Oxygen Demand	Água	g	3,806094
Borate	Água	µg	45,12223
Borax	Matéria prima	µg	73,58936
Boric acid	Ar	pg	0,062446
Boron	Ar	µg	497,3479

Boron	Água	mg	3,00258
Boron	Solo	µg	11,58842
Boron trifluoride	Ar	pg	422,4181
Boscalid	Solo	ng	31,91269
Bromacil	Solo	ng	31,00974
Bromate	Água	µg	63,68511
Bromide	Água	mg	6,078152
Bromine	Matéria prima	mg	9,015045
Bromine	Ar	µg	342,5402
Bromine	Água	mg	18,04674
Bromine	Solo	µg	3,464032
Bromopropane	Ar	pg	733,8854
Bromopropane	Água	pg	25,95449
Bromoxynil	Ar	pg	178,1609
Bromoxynil	Água	ng	1,435987
Bromoxynil	Solo	µg	1,654958
Bromuconazole	Solo	pg	322,4786
Buprofezin	Solo	ng	17,7547
Butadiene	Ar	ng	231,9108
Butane	Ar	mg	2,738952
Butene	Ar	µg	25,09966
Butene	Água	µg	7,598681
Butyl acetate	Água	µg	10,45218
Butyric acid, 4-(2,4-dichlorophenoxy)-	Ar	ng	2,898937
Butyric acid, 4-(2,4-dichlorophenoxy)-	Água	ng	1,068113
Butyric acid, 4-(2,4-dichlorophenoxy)-	Solo	ng	40,75184
Butyrolactone	Água	ng	1,093524
Cadmium	Matéria prima	µg	6,135939
Cadmium	Ar	µg	49,17668
Cadmium	Água	mg	4,05328
Cadmium	Solo	µg	38,15039
Calcite	Matéria prima	g	20,34327
Calcium	Matéria prima	mg	6,484117
Calcium	Ar	mg	7,063132
Calcium	Água	g	2,946717
Calcium	Solo	mg	76,9812
Captan	Solo	µg	2,303936
Carbamic acid, [(dibutylamino)thio]methyl-, 2,3-	Solo	pg	19,32454
Carbaryl	Ar	ng	1,938732
Carbaryl	Água	pg	2,20254
Carbaryl	Solo	ng	126,6241
Carbendazim	Solo	µg	2,364958
Carbetamide	Solo	ng	241,3827
Carbofuran	Solo	ng	612,4817
Carbon	Ar	ng	322,8957
Carbon	Água	µg	1,104957
Carbon	Solo	mg	23,73897
Carbon-14	Ar	Bq	1,504374

Carbon-14	Água	µBq	276,7515
Carbon dioxide, biogenic	Ar	g	331,393
Carbon dioxide, fossil	Ar	g	394,9176
Carbon dioxide, in air	Matéria prima	g	472,8974
Carbon dioxide, land transformation	Ar	g	64,07996
Carbon dioxide, to soil or biomass stock	Solo	g	22,84088
Carbon disulfide	Ar	mg	3,803303
Carbon disulfide	Água	µg	3,406565
Carbon monoxide, biogenic	Ar	g	8,494591
Carbon monoxide, fossil	Ar	mg	607,6355
Carbon monoxide, land transformation	Ar	mg	85,74574
Carbon, organic, in soil or biomass stock	Matéria prima	g	1,092812
Carbonate	Água	mg	6,665398
Carbonyl sulfide	Ar	µg	17,99305
Carboxylic acids, unspecified	Água	mg	5,061103
Carfentrazone-ethyl	Ar	pg	195,9041
Carfentrazone-ethyl	Solo	pg	-747,842
Carnallite	Matéria prima	mg	2,964306
Cerium	Matéria prima	µg	2,144068
Cerium-141	Ar	nBq	103,8318
Cerium-141	Água	µBq	9,766208
Cerium-144	Água	µBq	25,66163
Cesium	Água	µg	1,1758
Cesium-134	Ar	nBq	4,972873
Cesium-134	Água	µBq	217,5041
Cesium-136	Água	µBq	14,96041
Cesium-137	Ar	nBq	473,6908
Cesium-137	Água	mBq	87,85912
Chloramine	Ar	ng	855,9931
Chloramine	Água	µg	7,638818
Chlorate	Água	µg	712,6995
Chlorfenvinphos	Solo	ng	6,536698
Chloridazon	Solo	ng	28,77949
Chloride	Água	g	6,850932
Chloride	Solo	mg	5,338417
Chlorides, unspecified	Água	mg	1,235521
Chlorimuron-ethyl	Ar	ng	3,564362
Chlorimuron-ethyl	Solo	ng	59,5718
Chlorinated solvents, unspecified	Ar	ng	-97,3716
Chlorinated solvents, unspecified	Água	µg	4,598571
Chlorine	Ar	µg	486,8316
Chlorine	Água	µg	18,35999
Chlorine	Solo	µg	9,989933
Chlormequat	Solo	ng	362,686
Chloroacetic acid	Ar	µg	5,940825
Chloroacetic acid	Água	µg	60,38137
Chloroacetyl chloride	Água	ng	436,6792
Chloroform	Ar	µg	47,90951

Chloroform	Água	µg	8,580923
Chloropicrin	Solo	ng	710,7379
Chlorosilane, trimethyl-	Ar	ng	61,08059
Chlorosulfonic acid	Ar	ng	336,9573
Chlorosulfonic acid	Água	ng	840,2073
Chlorothalonil	Solo	µg	9,918697
Chlorpyrifos	Ar	ng	71,10616
Chlorpyrifos	Solo	mg	4,619675
Chlorpyrifos methyl	Solo	µg	3,237728
Chlorsulfuron	Solo	pg	444,5598
Chlortoluron	Solo	ng	-264,814
Choline chloride	Solo	ng	61,28776
Chromium	Matéria prima	mg	218,0142
Chromium	Ar	mg	1,042202
Chromium	Água	µg	166,8851
Chromium	Solo	µg	226,6929
Chromium-51	Ar	nBq	6,65352
Chromium-51	Água	µBq	482,4591
Chromium IV	Ar	pg	0,55677
Chromium VI	Ar	µg	20,52033
Chromium VI	Água	mg	1,502068
Chromium VI	Solo	µg	6,576528
Chrysene	Ar	pg	105,8403
Chrysene	Água	ng	28,42412
Chrysotile	Matéria prima	µg	253,0313
Cinidon-ethyl	Solo	pg	452,5978
Clay, bentonite	Matéria prima	mg	81,12141
Clay, unspecified	Matéria prima	g	6,306914
Clethodim	Ar	ng	10,5452
Clethodim	Solo	ng	20,00539
Clodinafop-propargyl	Solo	ng	12,27307
Clomazone	Solo	ng	4,886881
Clopyralid	Solo	pg	367,5583
Cloquintocet-mexyl	Solo	ng	1,58915
Cloransulam-methyl	Ar	ng	1,856426
Cloransulam-methyl	Solo	ng	5,657163
Clothianidin	Solo	µg	173,2223
Coal, brown	Matéria prima	g	8,340356
Coal, hard	Matéria prima	g	56,85534
Cobalt	Matéria prima	mg	19,68171
Cobalt	Ar	µg	38,77919
Cobalt	Água	mg	6,004291
Cobalt	Solo	µg	6,884691
Cobalt-57	Água	µBq	474,8998
Cobalt-58	Ar	nBq	877,7847
Cobalt-58	Água	mBq	60,72253
Cobalt-60	Ar	µBq	4,090809
Cobalt-60	Água	mBq	21,26121

COD, Chemical Oxygen Demand	Água	g	15,1882
Colemanite	Matéria prima	mg	4,369887
Copper	Matéria prima	mg	249,3564
Copper	Ar	µg	633,8863
Copper	Água	mg	115,5911
Copper	Solo	µg	361,5671
Cu-HDO	Água	pg	1,556022
Cumene	Ar	µg	67,40954
Cumene	Água	µg	240,367
Cyanide	Ar	mg	2,842048
Cyanide	Água	µg	167,9177
Cyanoacetic acid	Ar	ng	275,9311
Cyclohexane	Ar	ng	20,70085
Cyclohexane	Água	ng	2,817971
Cycloxydim	Solo	ng	4,215696
Cyfluthrin	Ar	pg	372,1303
Cyfluthrin	Solo	ng	50,07988
Cyhalothrin, gamma-	Ar	ng	4,270595
Cyhalothrin, gamma-	Solo	pg	183,0772
Cymoxanil	Solo	ng	28,78005
Cypermethrin	Solo	µg	25,24039
Cyproconazole	Solo	µg	1,00208
Cyprodinil	Solo	ng	-154,387
Decanoic acid	Água	µg	42,44318
Deltamethrin	Solo	ng	-2,34178
Desmedipham	Solo	ng	28,17158
Diafenthuron	Solo	pg	31,73108
Diatomite	Matéria prima	ng	205,9635
Diazinon	Solo	ng	186,5922
Dibenz(a,h)anthracene	Ar	pg	20,16568
Dibenz(a,h)anthracene	Água	pg	514,4987
Dibutyltin	Água	pg	0,000139
Dicamba	Ar	ng	9,859712
Dicamba	Água	ng	1,989785
Dicamba	Solo	ng	192,757
Dichlorodimethylsilane	Ar	ng	2,560941
Dichlorprop	Ar	pg	298,4985
Dichlorprop	Água	pg	312,5584
Dichlorprop	Solo	ng	12,40144
Dichlorprop-P	Solo	µg	8,750058
Dichlorvos	Solo	ng	58,08955
Dichromate	Água	ng	459,9981
Diclofop	Solo	ng	-275,755
Diclofop-methyl	Solo	ng	-276,451
Diethanolamine	Água	µg	25,91473
Diethyl ether	Ar	pg	2,270694
Diethylamine	Ar	ng	418,7405
Diethylamine	Água	µg	1,004984

Diethylene glycol	Ar	pg	9,277738
Diethylene glycol	Água	pg	275,7906
Difenoconazole	Solo	µg	3,111408
Diflubenzuron	Ar	pg	195,9041
Diflubenzuron	Solo	µg	2,885012
Diflufenican	Solo	ng	-150,563
Diflufenzopyr-sodium	Solo	ng	10,45002
Diisobutyl ketone	Água	ng	9,962842
Dimethachlor	Solo	ng	10,69417
Dimethenamid	Ar	pg	542,4311
Dimethenamid	Água	pg	193,841
Dimethenamid	Solo	ng	410,5755
Dimethoate	Solo	ng	368,3164
Dimethomorph	Solo	ng	11,11378
Dimethyl carbonate	Ar	ng	50,94593
Dimethyl hexanediol	Água	pg	138,8048
Dimethyl hexynediol	Água	pg	303,774
Dimethyl malonate	Ar	ng	346,0205
Dimethylamine	Ar	ng	3,926666
Dimethylamine	Água	µg	5,459334
Dimethyldichlorosilane	Ar	ng	1,961874
Dimethyldichlorosilane	Água	pg	72,29237
Dinitrogen monoxide	Ar	mg	67,9702
Dinitrogen tetroxide	Ar	ng	2,005908
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Ar	pg	215,9887
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Água	pg	0,001406
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Solo	pg	21,55975
Diphenylether-compound	Água	pg	111,097
Diphenyltin	Água	pg	0,008808
Dipropylamine	Ar	ng	189,9115
Dipropylamine	Água	ng	455,8001
Dipropylthiocarbamic acid S-ethyl ester	Solo	µg	1,398552
Diquat	Solo	µg	1,611773
Discarded fish, demersal	Água	ng	109,7492
Discarded fish, pelagic	Água	ng	580,4122
Dithianone	Solo	ng	3,733898
Diuron	Solo	ng	513,3516
DOC, Dissolved Organic Carbon	Água	g	13,61047
Dodecanoic acid	Ar	pg	616,998
Dodecanoic acid	Água	ng	24,82429
Dodecanol	Água	pg	659,8848
Dolomite	Matéria prima	mg	137,6267
Endosulfan	Solo	µg	1,109056
Endothall	Solo	ng	1,18794
Energy, geothermal, converted	Matéria prima	kJ	1,233398
Energy, gross calorific value, in biomass	Matéria prima	MJ	4,748293
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	Matéria prima	kJ	41,92381
Energy, kinetic (in wind), converted	Matéria prima	kJ	794,3619

Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	Matéria prima	MJ	5,761547
Energy, solar, converted	Matéria prima	kJ	1,359718
Epoconazole	Solo	ng	77,38906
Esfenvalerate	Ar	ng	2,225538
Esfenvalerate	Solo	ng	19,29287
Ethalfuralin	Solo	ng	3,565342
Ethane	Ar	mg	10,54563
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	Ar	µg	3,310452
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	Ar	ng	137,3985
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	Água	pg	0,001043
Ethane, 1,1,1-trifluoro-, HFC-143a	Ar	pg	0,139053
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Ar	ng	616,1293
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Ar	ng	73,67026
Ethane, 1,2-dichloro-	Ar	µg	10,79588
Ethane, 1,2-dichloro-	Água	µg	15,24285
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Ar	µg	5,820918
Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124	Ar	ng	21,34668
Ethane, chloro-	Ar	ng	76,20397
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	Ar	µg	2,357946
Ethane, pentafluoro-, HFC-125	Ar	pg	1,805385
Ethanol	Ar	mg	86,97674
Ethanol	Água	µg	103,6821
Ethene	Ar	mg	6,968176
Ethene	Água	µg	82,12088
Ethene, chloro-	Ar	µg	2,62617
Ethene, chloro-	Água	ng	55,21179
Ethene, tetrachloro-	Ar	µg	10,9385
Ethene, trichloro-	Ar	ng	143,0823
Ethephon	Ar	pg	0,051545
Ethephon	Água	pg	0,003423
Ethephon	Solo	ng	-303,548
Ethofumesate	Solo	ng	314,7329
Ethoprop	Solo	ng	324,0307
Ethyl acetate	Ar	µg	249,4026
Ethyl acetate	Água	ng	764,6784
Ethyl cellulose	Ar	ng	502,0874
Ethylamine	Ar	µg	4,026192
Ethylamine	Água	µg	9,662958
Ethylene diamine	Ar	ng	617,3985
Ethylene diamine	Água	µg	1,483131
Ethylene oxide	Ar	µg	400,0524
Ethylene oxide	Água	µg	48,81282
Ethyne	Ar	µg	78,82764
Europium	Matéria prima	ng	5,371648
Feldspar	Matéria prima	ng	137,2434
Fenamiphos	Solo	ng	85,68835
Fenbuconazole	Solo	ng	1,556604
Fenoxaprop	Ar	ng	2,913059

Fenoxaprop	Solo	ng	11,36966
Fenoxaprop-P ethyl ester	Solo	ng	-3,87057
Fenoxaprop ethyl ester	Solo	ng	-22,9792
Fenpiclonil	Solo	ng	227,4508
Fenpropidin	Solo	ng	-491,683
Fenpropimorph	Solo	ng	21,84448
Fentin hydroxide	Solo	ng	56,06875
Fipronil	Solo	mg	17,58109
Fish, demersal, in ocean	Matéria prima	ng	877,9986
Fish, pelagic, in ocean	Matéria prima	µg	15,40377
Florasulam	Solo	ng	-4,84321
Fluazifop	Solo	ng	3,951978
Fluazifop-p-butyl	Ar	ng	4,180052
Fluazifop-P-butyl	Solo	ng	27,04751
Flucarbazon sodium salt	Solo	pg	27,78464
Fludioxonil	Solo	ng	18,52152
Flufenacet	Ar	ng	1,567293
Flufenacet	Solo	ng	-191,983
Flumetsulam	Ar	pg	366,6977
Flumetsulam	Solo	ng	18,3488
Flumiclorac-pentyl	Ar	pg	627,4605
Flumiclorac-pentyl	Solo	pg	26,88513
Flumioxazin	Ar	ng	6,34704
Flumioxazin	Solo	ng	10,42852
Fluoranthene	Ar	ng	1,239858
Fluoranthene	Água	µg	231,3591
Fluorene	Ar	ng	5,661619
Fluorene	Água	µg	85,27237
Fluoride	Água	mg	50,48676
Fluoride	Solo	µg	51,9989
Fluorine	Matéria prima	mg	94,18516
Fluorine	Ar	µg	114,2225
Fluorspar	Matéria prima	mg	29,48898
Fluosilicic acid	Ar	µg	5,846347
Fluosilicic acid	Água	µg	3,52828
Flupyr-sulfuron-methyl	Solo	pg	43,13522
Fluquinconazole	Solo	pg	848,6106
Flurochloridone	Solo	pg	6,699962
Fluroxypyr	Solo	ng	11,70384
Flurtamone	Solo	ng	-142,334
Flusilazole	Solo	ng	-18,7738
Flutolanil	Solo	ng	63,75652
Folpet	Solo	ng	1,364168
Fomesafen	Ar	ng	23,59843
Fomesafen	Solo	ng	43,66364
Foramsulfuron	Solo	ng	1,959406
Formaldehyde	Ar	mg	2,10161
Formaldehyde	Água	µg	229,1292

Formamide	Ar	ng	265,0326
Formamide	Água	ng	636,0854
Formate	Água	µg	256,3222
Formic acid	Ar	µg	907,3125
Formic acid	Água	ng	184,6493
Fosetyl	Solo	ng	6,10463
Fosetyl-aluminium	Solo	ng	297,0532
Fungicides, unspecified	Água	ng	5,638335
Fungicides, unspecified	Solo	ng	181,5189
Furan	Ar	mg	3,957496
Furathiocarb	Solo	ng	13,99507
Furfural	Ar	pg	16,95405
Gadolinium	Matéria prima	ng	13,40617
Gallium	Matéria prima	µg	81,75189
Gangue	Matéria prima	g	7,276048
Gangue, bauxite	Matéria prima	g	2,797296
Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	Matéria prima	cm3	158,826
Gas, natural/m3	Matéria prima	l	105,23
Glucose	Água	pg	964,7692
Glufosinate	Solo	ng	243,1557
Glutaraldehyde	Água	ng	762,3747
Glyphosate	Ar	µg	4,724409
Glyphosate	Água	ng	41,43251
Glyphosate	Solo	mg	2,192958
Gold	Matéria prima	µg	128,0668
Granite	Matéria prima	g	1,076827
Gravel	Matéria prima	g	99,10301
Gypsum	Matéria prima	mg	994,7829
Halosulfuron-methyl	Solo	pg	1,46104
Haloxypop- (R) Methylester	Solo	ng	105,9959
Heat, waste	Ar	kJ	27,06852
Heat, waste	Água	kJ	82,09485
Heat, waste	Solo	kJ	2,070176
Helium	Ar	µg	75,89814
Heptane	Ar	µg	9,320719
Herbicides, unspecified	Solo	ng	147,2678
Hexaconazole	Solo	ng	149,0652
Hexane	Ar	mg	1,639409
Hexazinone	Solo	ng	14,36065
Holmium	Matéria prima	mg	3,485201
Hydramethylnon	Solo	pg	330,9606
Hydrazine	Água	pg	17,58349
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyclic	Ar	µg	509,4423
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	Ar	mg	2,53872
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	Água	µg	152,8541
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	Ar	mg	3,71234
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	Água	µg	14,97033
Hydrocarbons, aromatic	Ar	mg	5,75894

Hydrocarbons, aromatic	Água	µg	621,3738
Hydrocarbons, chlorinated	Ar	µg	10,79072
Hydrocarbons, unspecified	Ar	µg	13,94676
Hydrocarbons, unspecified	Água	mg	1,225676
Hydrocarbons, unspecified	Solo	µg	48,00697
Hydrogen	Ar	mg	6,42313
Hydrogen-3, Tritium	Ar	Bq	2,407056
Hydrogen-3, Tritium	Água	Bq	283,3816
Hydrogen carbonate	Água	µg	376,6332
Hydrogen chloride	Ar	mg	27,72974
Hydrogen chloride	Água	µg	120,4166
Hydrogen fluoride	Ar	mg	2,942515
Hydrogen peroxide	Ar	ng	371,865
Hydrogen peroxide	Água	µg	14,49119
Hydrogen sulfide	Ar	mg	1,474512
Hydrogen sulfide	Água	mg	16,5934
Hydroxide	Água	µg	13,26547
Hypochlorite	Água	µg	255,0467
Imazamox	Ar	pg	938,6254
Imazamox	Solo	ng	39,38013
Imazapyr	Solo	pg	261,2559
Imazaquin	Ar	ng	2,992434
Imazaquin	Solo	pg	128,2386
Imazethapyr	Ar	ng	6,193117
Imazethapyr	Solo	ng	15,11292
Imidacloprid	Solo	µg	1,039517
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	Ar	pg	12,10382
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	Água	ng	8,075536
Indoxacarb	Solo	ng	81,07406
Insecticides, unspecified	Solo	ng	10,80069
Iodide	Água	mg	4,385137
Iodide	Solo	pg	252,1249
Iodine	Matéria prima	mg	7,52441
Iodine	Ar	µg	138,5544
Iodine-129	Ar	µBq	442,8017
Iodine-131	Ar	µBq	506,8134
Iodine-131	Água	µBq	921,3309
Iodine-133	Ar	µBq	96,8966
Iodine-133	Água	µBq	22,73026
Iodosulfuron	Solo	pg	56,57404
Iodosulfuron-methyl-sodium	Solo	pg	26,91633
Ioxynil	Solo	ng	-17,036
Iprodione	Solo	µg	1,185088
Iron	Matéria prima	g	6,562449
Iron	Ar	mg	1,591886
Iron	Água	g	1,338312
Iron	Solo	mg	14,72016
Iron-59	Água	mBq	2,279397

Isocyanic acid	Ar	µg	1,941617
Isoprene	Ar	µg	13,19165
Isopropylamine	Ar	µg	3,350922
Isopropylamine	Água	µg	8,042114
Isoproturon	Solo	ng	-982,742
Isoxaflutole	Solo	ng	64,88637
Kaolin	Solo	ng	27,17131
Kaolinite	Matéria prima	mg	171,9955
Kieserite	Matéria prima	mg	9,331118
Kresoxim-methyl	Solo	ng	24,31528
Krypton	Matéria prima	ng	396,1021
Krypton-85	Ar	mBq	4,636841
Krypton-85m	Ar	mBq	528,9081
Krypton-87	Ar	mBq	1,399387
Krypton-88	Ar	mBq	1,838304
Krypton-89	Ar	µBq	773,7047
Lactic acid	Ar	ng	148,771
Lactic acid	Água	ng	357,0487
Lactofen	Ar	ng	3,013561
Lactofen	Solo	pg	129,144
Lambda-cyhalothrin	Ar	pg	0,001631
Lambda-cyhalothrin	Água	pg	8,25E-07
Lambda-cyhalothrin	Solo	ng	314,6638
Lanthanum	Matéria prima	ng	642,7613
Lanthanum-140	Ar	nBq	36,60587
Lanthanum-140	Água	µBq	27,40127
Laterite	Matéria prima	mg	68,16653
Lead	Matéria prima	mg	11,51875
Lead	Ar	µg	477,8428
Lead	Água	mg	37,98019
Lead	Solo	µg	214,0157
Lead-210	Ar	mBq	62,79903
Lead-210	Água	mBq	23,09649
Lenacil	Solo	ng	22,70536
Linuron	Solo	mg	1,866562
Lithium	Matéria prima	µg	20,11778
Lithium	Ar	pg	55,15172
Lithium	Água	mg	56,36221
Lithium	Solo	ng	25,03437
m-Xylene	Ar	µg	150,7768
m-Xylene	Água	µg	11,78065
Magnesite	Matéria prima	mg	5,008557
Magnesium	Matéria prima	mg	13,71706
Magnesium	Ar	µg	644,0759
Magnesium	Água	mg	934,8306
Magnesium	Solo	mg	9,099122
Malathion	Solo	ng	40,09019
Maleic anhydride	Água	pg	276,1431

Maleic hydrazide	Solo	ng	354,4164
Mancozeb	Solo	µg	14,72984
Mandipropamid	Solo	pg	765,3109
Maneb	Solo	ng	8,250844
Manganese	Matéria prima	mg	98,61867
Manganese	Ar	µg	521,3506
Manganese	Água	mg	78,96635
Manganese	Solo	mg	5,052891
Manganese-54	Ar	nBq	3,407339
Manganese-54	Água	µBq	714,8515
MCPB	Ar	pg	410,0386
MCPB	Água	pg	949,1329
MCPB	Solo	ng	42,22502
Mecoprop	Solo	ng	25,38063
Mecoprop-P	Solo	ng	16,96847
Mefenpyr	Solo	ng	-45,7895
Mefenpyr-diethyl	Solo	ng	-26,6325
Mepiquat chloride	Solo	ng	-187,255
Mercury	Matéria prima	ng	95,59015
Mercury	Ar	µg	4,700596
Mercury	Água	µg	95,24902
Mercury	Solo	µg	1,340177
Mesosulfuron-methyl (prop)	Solo	pg	148,4785
Mesotrione	Solo	ng	941,1315
Metalaxil	Solo	ng	199,4185
Metalaxyl-M	Solo	µg	3,379914
Metaldehyde (tetramer)	Solo	ng	-283,31
Metam-sodium dihydrate	Solo	µg	57,71915
Metamitron	Solo	µg	1,201323
Metamorphous rock, graphite containing	Matéria prima	µg	259,607
Metazachlor	Solo	ng	103,9256
Metconazole	Solo	ng	3,015393
Methane	Ar	ng	932,5376
Methane, biogenic	Ar	g	2,331673
Methane, bromo-, Halon 1001	Ar	pg	150,9162
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Ar	ng	178,3393
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Ar	µg	1,753056
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Ar	µg	8,834667
Methane, dichloro-, HCC-30	Ar	µg	4,513434
Methane, dichloro-, HCC-30	Água	µg	23,14818
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Ar	ng	88,6479
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	Ar	pg	191,9602
Methane, fossil	Ar	g	1,414525
Methane, land transformation	Ar	mg	5,606452
Methane, monochloro-, R-40	Ar	µg	3,646495
Methane, tetrachloro-, CFC-10	Ar	µg	4,926398
Methane, tetrachloro-, CFC-10	Água	pg	310,0536
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	Ar	µg	15,03267

Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	Ar	pg	211,719
Methane, trifluoro-, HFC-23	Ar	ng	61,07824
Methanesulfonic acid	Ar	ng	278,8366
Methanol	Ar	mg	13,32981
Methanol	Água	µg	150,0531
Methiocarb	Solo	ng	2,959361
Methomyl	Ar	pg	0,176329
Methomyl	Água	pg	0,002749
Methomyl	Solo	pg	0,555615
Methoxyfenozide	Solo	ng	11,21642
Methyl acetate	Ar	mg	1,097524
Methyl acetate	Água	ng	182,9593
Methyl acrylate	Ar	ng	505,5944
Methyl acrylate	Água	µg	9,876935
Methyl borate	Ar	ng	155,688
Methyl ethyl ketone	Ar	µg	249,1169
Methyl formate	Ar	ng	-706,109
Methyl formate	Água	ng	-281,909
Methyl lactate	Ar	ng	163,3178
Methyl pentane	Água	ng	1,841224
Methylamine	Ar	ng	345,995
Methylamine	Água	ng	828,3213
Metiram	Solo	ng	240,776
Metolachlor	Ar	ng	50,57391
Metolachlor	Água	ng	2,602879
Metolachlor	Solo	µg	33,47578
Metosulam	Solo	pg	85,04767
Metribuzin	Ar	ng	19,54514
Metribuzin	Solo	ng	944,1923
Metsulfuron-methyl	Solo	ng	20,96024
Mineral oil	Solo	mg	23,11722
Molinate	Solo	pg	437,8212
Molybdenum	Ar	µg	39,50049
Molybdenum	Água	mg	1,080147
Molybdenum	Solo	µg	1,374598
Molybdenum-99	Água	nBq	726,9387
Monobutyltin	Água	pg	0,023953
Monocrotophos	Solo	ng	640,8288
Monoethanolamine	Ar	µg	151,2141
Monoethanolamine	Água	ng	5,60168
Monophenyltin	Água	pg	2,63E-05
Myclobutanil	Solo	ng	15,57017
Naphthalene	Ar	µg	42,77103
Naphthalene	Água	µg	17,09854
Napropamide	Solo	ng	170,9313
Neodymium	Matéria prima	ng	353,5187
Nickel	Matéria prima	mg	135,9446
Nickel	Ar	µg	934,6791

Nickel	Água	mg	13,52965
Nickel	Solo	µg	93,04524
Nicosulfuron	Solo	ng	19,87945
Niobium-95	Ar	mBq	2,767521
Niobium-95	Água	µBq	164,0467
Nitrate	Ar	µg	48,98896
Nitrate	Água	g	2,387623
Nitrate	Solo	µg	28,84919
Nitric acid	Solo	ng	3,845647
Nitrite	Água	mg	11,09209
Nitrobenzene	Ar	µg	1,533728
Nitrobenzene	Água	µg	6,146453
Nitrogen dioxide	Água	ng	1,707453
Nitrogen fluoride	Ar	pg	1,222187
Nitrogen monoxide	Ar	ng	29,72236
Nitrogen oxides	Ar	mg	992,2525
Nitrogen, atmospheric	Matéria prima	g	30,49442
Nitrogen, atmospheric	Ar	g	26,1714
Nitrogen, atmospheric	Água	mg	4,952202
Nitrogen, atmospheric	Solo	µg	63,38268
Nitrogen, organic bound	Água	mg	322,4821
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Ar	mg	397,9907
Noble gases, radioactive, unspecified	Ar	kBq	4,262775
Norflurazon	Solo	ng	44,83775
Novaluron	Solo	pg	113,8824
o-Xylene	Ar	µg	3,852584
o-Xylene	Água	µg	1,156712
Occupation, annual crop	Matéria prima	mm2a	235,2583
Occupation, annual crop, greenhouse	Matéria prima	mm2a	0,061616
Occupation, annual crop, irrigated	Matéria prima	mm2a	19,54219
Occupation, annual crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2a	6,687618
Occupation, annual crop, non-irrigated	Matéria prima	mm2a	3,982088
Occupation, annual crop, non-irrigated, extensive	Matéria prima	mm2a	12,02724
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	cm2a	326,0647
Occupation, arable land, unspecified use	Matéria prima	mm2a	0,038147
Occupation, construction site	Matéria prima	mm2a	246,689
Occupation, dump site	Matéria prima	mm2a	784,7333
Occupation, forest, extensive	Matéria prima	mm2a	287,5227
Occupation, forest, intensive	Matéria prima	cm2a	278,8741
Occupation, grassland, natural (non-use)	Matéria prima	mm2a	7,624737
Occupation, grassland, natural, for livestock grazing	Matéria prima	mm2a	786,6792
Occupation, industrial area	Matéria prima	cm2a	12,04682
Occupation, inland waterbody, unspecified	Matéria prima	mm2a	0,009558
Occupation, mineral extraction site	Matéria prima	mm2a	513,8248
Occupation, pasture, man made	Matéria prima	cm2a	14,19263
Occupation, pasture, man made, extensive	Matéria prima	mm2a	0,040227
Occupation, pasture, man made, intensive	Matéria prima	mm2a	93,99633
Occupation, permanent crop	Matéria prima	mm2a	9,755776

Occupation, permanent crop, irrigated	Matéria prima	cm2a	235,1708
Occupation, permanent crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2a	1,079556
Occupation, permanent crop, non-irrigated	Matéria prima	cm2a	724,4798
Occupation, permanent crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	mm2a	0,13748
Occupation, sea and ocean	Matéria prima	mm2a	0,00773
Occupation, seabed, drilling and mining	Matéria prima	mm2a	9,910871
Occupation, seabed, infrastructure	Matéria prima	mm2a	0,062564
Occupation, shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	mm2a	36,87552
Occupation, traffic area, rail network	Matéria prima	mm2a	35,19335
Occupation, traffic area, rail/road embankment	Matéria prima	mm2a	424,9384
Occupation, traffic area, road network	Matéria prima	cm2a	11,89709
Occupation, unknown	Matéria prima	mm2a	2,309491
Occupation, unspecified, natural (non-use)	Matéria prima	mm2a	1,147527
Occupation, urban, continuously built	Matéria prima	mm2a	0,030222
Occupation, urban, discontinuously built	Matéria prima	mm2a	82,06137
Occupation, urban, green areas	Matéria prima	m2a	2,309648
Occupation, urban/industrial fallow (non-use)	Matéria prima	mm2a	1,846484
Occupation, water bodies, artificial	Matéria prima	cm2a	251,9488
Octaethylene glycol monododecyl ether	Ar	ng	2,198412
Oil, crude	Matéria prima	g	73,32859
Oils, biogenic	Água	µg	8,029626
Oils, biogenic	Solo	µg	221,855
Oils, unspecified	Água	mg	77,91583
Oils, unspecified	Solo	mg	87,90353
Olivine	Matéria prima	µg	166,7864
Orbencarb	Solo	µg	1,318258
Organic carbon	Ar	ng	803,0946
Organic carbon	Água	µg	2,613237
Organic carbon	Solo	µg	2,613237
Oryzalin	Solo	ng	20,81242
Oxamyl	Solo	ng	274,6807
Oxydemeton methyl	Solo	ng	3,957933
Oxyfluorfen	Solo	ng	172,9022
Oxygen	Matéria prima	g	12,45251
Oxygen	Água	pg	85,679
Ozone	Ar	mg	11,00089
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Ar	µg	142,6422
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Água	µg	10,90016
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Solo	ng	75,1032
Palladium	Matéria prima	µg	-1,70958
Palladium	Ar	ng	5,514724
Paraffins	Ar	ng	41,57941
Paraffins	Água	ng	184,8394
Paraquat	Ar	ng	12,57336
Paraquat	Solo	µg	1,28216
Parathion	Solo	ng	6,528321
Parathion, methyl	Ar	ng	2,412962
Parathion, methyl	Solo	pg	103,4299

Particulates, < 2.5 um	Ar	mg	313,1118
Particulates, > 10 um	Ar	mg	979,7761
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Ar	mg	278,9429
Peat	Matéria prima	mg	14,59638
Pendimethalin	Ar	ng	135,4602
Pendimethalin	Água	pg	263,9037
Pendimethalin	Solo	ng	990,6577
Pentane	Ar	mg	2,913412
Pentane	Água	pg	33,6011
Pentane, 2-methyl-	Ar	ng	272,7596
Pentane, 2,2,4-trimethyl-	Ar	ng	57,54522
Perlite	Matéria prima	mg	4,575184
Permethrin	Ar	ng	1,968397
Permethrin	Solo	ng	17,21351
Pesticides, unspecified	Solo	mg	1,298918
Phenanthrene	Ar	ng	18,53255
Phenanthrene	Água	µg	191,9179
Phenmedipham	Solo	ng	174,1022
Phenol	Ar	µg	57,21326
Phenol	Água	µg	338,5576
Phenol, 2,4-dichloro-	Ar	ng	508,9
Phenol, pentachloro-	Ar	µg	8,646981
Phenol, pentachloro-	Solo	pg	403,5055
Phorate	Solo	ng	585,8165
Phosgene	Ar	ng	27,7782
Phosmet	Solo	ng	74,5808
Phosphate	Água	mg	295,4191
Phosphine	Ar	ng	3,238788
Phosphoric acid	Ar	ng	41,94652
Phosphoric acid	Água	pg	415,8788
Phosphorus	Matéria prima	mg	376,1529
Phosphorus	Ar	µg	347,2937
Phosphorus	Água	mg	9,617201
Phosphorus	Solo	mg	2,533622
Phosphorus oxychloride	Água	pg	146,2406
Phosphorus pentachloride	Água	pg	426,8497
Phosphorus trichloride	Ar	ng	42,8978
Phosphorus trichloride	Água	pg	16,89982
Picloram	Solo	pg	55,56928
Picoxystrobin	Solo	ng	197,1867
Piperonyl butoxide	Solo	ng	4,000673
Pirimicarb	Solo	ng	311,2305
Pirimiphos methyl	Solo	ng	37,46266
Platinum	Matéria prima	ng	960,184
Platinum	Ar	ng	930,2361
Plutonium-238	Ar	nBq	0,060405
Plutonium-alpha	Ar	nBq	0,138472
Polonium-210	Ar	mBq	109,733

Polonium-210	Água	mBq	132,3933
Polychlorinated biphenyls	Ar	ng	43,95673
Polychlorinated biphenyls	Água	pg	67,14901
Potassium	Matéria prima	µg	233,6651
Potassium	Ar	mg	26,86448
Potassium	Água	mg	598,1907
Potassium	Solo	mg	14,06075
Potassium-40	Ar	mBq	19,70043
Potassium-40	Água	mBq	19,31805
Potassium chloride	Matéria prima	g	1,88747
Praseodymium	Matéria prima	ng	37,50972
Primisulfuron	Solo	ng	6,531533
Prochloraz	Solo	ng	11,43896
Procymidone	Solo	ng	1,708315
Profenofos	Solo	ng	80,50558
Prohexadione-calcium	Solo	pg	33,48329
Pronamide	Solo	pg	0,51033
Propachlor	Solo	ng	524,0178
Propamocarb HCl	Solo	ng	2,812788
Propanal	Ar	µg	2,661943
Propanal	Água	ng	474,5886
Propane	Ar	mg	4,086161
Propanil	Solo	ng	1,133952
Propargite	Solo	ng	187,8984
Propene	Ar	µg	677,3892
Propene	Água	µg	210,5165
Propiconazole	Ar	ng	2,308366
Propiconazole	Água	pg	-6,5363
Propiconazole	Solo	ng	-197,691
Propineb	Solo	ng	1,342083
Propionic acid	Ar	µg	37,41094
Propionic acid	Água	µg	7,685758
Propoxycarbazone-sodium (prop)	Solo	pg	185,6314
Propylamine	Ar	ng	74,55111
Propylamine	Água	ng	178,9251
Propylene oxide	Ar	µg	3,123174
Propylene oxide	Água	µg	7,278725
Prosulfuron	Solo	ng	2,519769
Protactinium-234	Ar	mBq	1,145369
Protactinium-234	Água	mBq	5,326931
Prothioconazol	Ar	pg	0,004502
Prothioconazol	Água	pg	0,00047
Prothioconazol	Solo	ng	315,4115
Pumice	Matéria prima	mg	4,172378
Pymetrozine	Solo	ng	18,00219
Pyraclostrobin (prop)	Ar	ng	5,445362
Pyraclostrobin (prop)	Água	pg	2,09931
Pyraclostrobin (prop)	Solo	ng	642,2958

Pyraflufen-ethyl	Solo	ng	65,46523
Pyrene	Ar	pg	394,9266
Pyrene	Água	µg	174,2906
Pyrethrin	Solo	ng	2,309541
Pyrimethanil	Solo	ng	14,04829
Quinclorac	Solo	pg	18,93913
Quinmerac	Solo	pg	0,337082
Quinoxifen	Solo	ng	1,623337
Quizalofop-P	Solo	pg	245,7433
Quizalofop-p-ethyl	Solo	ng	16,58793
Quizalofop ethyl ester	Ar	pg	730,6792
Quizalofop ethyl ester	Solo	pg	249,9594
Radioactive species, alpha emitters	Água	mBq	1,935904
Radioactive species, Nuclides, unspecified	Água	mBq	433,3076
Radioactive species, other beta emitters	Ar	mBq	330,5402
Radium-224	Água	mBq	58,79002
Radium-226	Ar	mBq	27,37159
Radium-226	Água	Bq	2,018771
Radium-228	Ar	mBq	6,104721
Radium-228	Água	mBq	215,2396
Radon-220	Ar	mBq	435,7738
Radon-222	Ar	kBq	24,73458
residual wood, dry	Social	mm3	43,13008
Rhenium	Matéria prima	pg	1,375507
Rhodium	Matéria prima	ng	181,9396
Rhodium	Ar	ng	5,514724
Rimsulfuron	Solo	ng	15,16036
Rotenone	Solo	ng	1,293343
Rubidium	Água	µg	11,758
Ruthenium-103	Ar	nBq	0,088867
Ruthenium-103	Água	µBq	15,17952
Samarium	Matéria prima	ng	26,76642
Sand	Matéria prima	g	4,266241
Scandium	Ar	µg	2,277142
Scandium	Água	mg	1,680831
Scandium	Solo	ng	138,4207
Selenium	Ar	µg	31,68546
Selenium	Água	µg	331,2092
Selenium	Solo	ng	630,912
Sethoxydim	Ar	ng	1,572726
Sethoxydim	Solo	ng	8,676172
Shale	Matéria prima	g	3,248592
Silicon	Ar	µg	904,5746
Silicon	Água	g	2,307086
Silicon	Solo	mg	25,8388
Silicon dioxide	Água	ng	836,7106
Silicon tetrachloride	Ar	ng	98,58105
Silicon tetrafluoride	Ar	µg	1,304928

Silthiofam	Solo	ng	2,494741
Silver	Matéria prima	µg	-4,96606
Silver	Ar	ng	160,0391
Silver	Água	mg	1,001417
Silver	Solo	ng	55,92682
Silver-110	Ar	nBq	166,6409
Silver-110	Água	µBq	539,1736
Simazine	Solo	ng	873,8841
Sodium	Matéria prima	µg	7,13481
Sodium	Ar	mg	1,718426
Sodium	Água	g	3,41566
Sodium	Solo	mg	2,669368
Sodium-24	Água	µBq	531,6219
Sodium chlorate	Ar	µg	9,212129
Sodium chloride	Matéria prima	g	1,458189
Sodium dichromate	Ar	ng	149,9449
Sodium formate	Ar	ng	5,650346
Sodium formate	Água	ng	13,57461
Sodium hydroxide	Ar	µg	1,384266
Sodium nitrate	Matéria prima	mg	16,11959
Sodium sulfate	Matéria prima	mg	-6,7137
Sodium tetrahydroborate	Ar	pg	811,4186
Solids, inorganic	Água	mg	205,1853
Spinosad	Solo	ng	2,619573
Spiroxamine	Solo	ng	40,78716
Spodumene	Matéria prima	µg	6,880786
Strontium	Matéria prima	µg	15,12718
Strontium	Ar	µg	58,35645
Strontium	Água	mg	45,06113
Strontium	Solo	µg	19,67874
Strontium-89	Água	µBq	200,2002
Strontium-90	Água	mBq	17,74305
Styrene	Ar	µg	94,15932
Sulfate	Ar	mg	7,747897
Sulfate	Água	g	6,610245
Sulfate	Solo	µg	48,16269
Sulfentrazone	Ar	ng	15,03913
Sulfentrazone	Solo	mg	3,888433
Sulfide	Água	µg	670,0359
Sulfite	Água	µg	673,4153
Sulfosate	Solo	ng	275,5993
Sulfosulfuron	Solo	ng	1,556557
Sulfur	Matéria prima	mg	5,720823
Sulfur	Água	mg	12,90896
Sulfur	Solo	mg	4,546519
Sulfur dioxide	Ar	g	1,420809
Sulfur hexafluoride	Ar	µg	6,278385
Sulfur oxides	Ar	mg	5,278839

Sulfur trioxide	Ar	µg	8,453758
Sulfuric acid	Ar	µg	2,672727
Sulfuric acid	Água	µg	47,83827
Sulfuric acid	Solo	µg	85,9252
Suspended solids, unspecified	Água	g	2,553927
t-Butyl methyl ether	Ar	ng	572,9619
t-Butyl methyl ether	Água	ng	143,9451
t-Butylamine	Ar	ng	831,6152
t-Butylamine	Água	µg	1,995901
Talc	Matéria prima	mg	6,545837
Tantalum	Matéria prima	µg	43,02322
Tau-fluvalinate	Solo	pg	0,005373
Tebuconazole	Ar	pg	0,011996
Tebuconazole	Água	pg	0,003711
Tebuconazole	Solo	ng	105,9209
Tebupirimphos	Solo	ng	54,8664
Tebutam	Solo	ng	672,5563
Technetium-99m	Água	µBq	158,2155
Teflubenzuron	Solo	ng	164,4885
Tefluthrin	Ar	pg	138,9751
Tefluthrin	Água	pg	0,000681
Tefluthrin	Solo	ng	43,61182
Tellurium	Matéria prima	pg	47,44817
Tellurium	Ar	ng	7,337758
Tellurium-123m	Água	µBq	83,8154
Tellurium-132	Água	µBq	4,482799
Terbacil	Solo	ng	191,9819
Terbufos	Solo	ng	809,5801
Terbutylazin	Solo	µg	12,43473
Terpenes	Ar	µg	123,6717
Tetramethyl ammonium hydroxide	Ar	ng	29,31146
Thallium	Ar	ng	311,5614
Thallium	Água	µg	839,4315
Thallium	Solo	ng	38,18646
Thiamethoxam	Solo	µg	3,48752
Thiazole, 2-(thiocyanatemethylthio)benzo-	Solo	µg	5,4621
Thifensulfuron	Ar	pg	214,3446
Thifensulfuron-methyl	Solo	pg	544,8466
Thiobencarb	Solo	pg	242,6916
Thiocyanate, ion	Água	pg	939,72
Thiodicarb	Ar	pg	763,8781
Thiodicarb	Solo	ng	139,4901
Thiophanate-methyl	Solo	ng	247,6903
Thiram	Solo	ng	11,27783
Thorium	Ar	ng	35,00729
Thorium-228	Ar	mBq	2,919547
Thorium-228	Água	mBq	235,1654
Thorium-230	Ar	mBq	5,206474

Thorium-230	Água	mBq	451,0065
Thorium-232	Ar	mBq	4,244151
Thorium-232	Água	mBq	1,759683
Thorium-234	Ar	mBq	1,145565
Thorium-234	Água	mBq	5,329023
Tin	Matéria prima	µg	584,5281
Tin	Ar	µg	46,349
Tin	Água	mg	4,543542
Tin	Solo	µg	6,231792
Titanium	Matéria prima	mg	15,3499
Titanium	Ar	µg	64,14557
Titanium	Água	mg	114,1961
Titanium	Solo	µg	459,6354
TOC, Total Organic Carbon	Água	g	13,61095
Toluene	Ar	mg	2,136038
Toluene	Água	µg	228,1248
Toluene, 2-chloro-	Ar	µg	5,354672
Toluene, 2-chloro-	Água	µg	12,20636
Tralkoxydim	Solo	ng	-454,591
Transformation, from annual crop	Matéria prima	mm2	772,2117
Transformation, from annual crop, greenhouse	Matéria prima	mm2	0,151508
Transformation, from annual crop, irrigated	Matéria prima	mm2	14,88622
Transformation, from annual crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	3,627235
Transformation, from annual crop, non-irrigated	Matéria prima	cm2	365,0897
Transformation, from annual crop, non-irrigated, extensive	Matéria prima	mm2	20,44908
Transformation, from annual crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	-32,0392
Transformation, from cropland fallow (non-use)	Matéria prima	mm2	0,052767
Transformation, from dump site, inert material landfill	Matéria prima	mm2	2,083097
Transformation, from dump site, residual material landfill	Matéria prima	mm2	1,068352
Transformation, from dump site, sanitary landfill	Matéria prima	mm2	4,144207
Transformation, from dump site, slag compartment	Matéria prima	mm2	0,077739
Transformation, from forest, extensive	Matéria prima	mm2	12,60581
Transformation, from forest, intensive	Matéria prima	mm2	399,9335
Transformation, from forest, primary (non-use)	Matéria prima	mm2	236,9161
Transformation, from forest, secondary (non-use)	Matéria prima	mm2	3,022083
Transformation, from forest, unspecified	Matéria prima	mm2	206,0683
Transformation, from grassland, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	469,0386
Transformation, from grassland, natural, for livestock grazing	Matéria prima	mm2	21,94108
Transformation, from heterogeneous, agricultural	Matéria prima	mm2	-0,00025
Transformation, from industrial area	Matéria prima	mm2	0,597002
Transformation, from mineral extraction site	Matéria prima	mm2	5,862277
Transformation, from pasture, man made	Matéria prima	cm2	14,10726
Transformation, from pasture, man made, extensive	Matéria prima	mm2	0,000805
Transformation, from pasture, man made, intensive	Matéria prima	mm2	85,7358
Transformation, from permanent crop	Matéria prima	mm2	100,7958
Transformation, from permanent crop, irrigated	Matéria prima	cm2	77,06711
Transformation, from permanent crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	0,922389
Transformation, from permanent crop, non-irrigated	Matéria prima	cm2	36,22399

Transformation, from permanent crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	0,13748
Transformation, from river, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	0,141125
Transformation, from seabed, infrastructure	Matéria prima	mm2	0,00076
Transformation, from seabed, unspecified	Matéria prima	mm2	9,914805
Transformation, from shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	mm2	7,576172
Transformation, from traffic area, rail/road embankment	Matéria prima	mm2	1,740546
Transformation, from traffic area, road network	Matéria prima	mm2	1,84E-05
Transformation, from unknown	Matéria prima	mm2	36,11619
Transformation, from unspecified, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	0,365928
Transformation, from urban, continuously built	Matéria prima	mm2	0,000247
Transformation, from urban, green areas	Matéria prima	mm2	9,02E-05
Transformation, from wetland, inland (non-use)	Matéria prima	mm2	0,256802
Transformation, to annual crop	Matéria prima	mm2	196,8178
Transformation, to annual crop, fallow	Matéria prima	mm2	0,085239
Transformation, to annual crop, greenhouse	Matéria prima	mm2	0,151508
Transformation, to annual crop, irrigated	Matéria prima	mm2	14,88622
Transformation, to annual crop, irrigated, extensive	Matéria prima	mm2	0,189997
Transformation, to annual crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	13,22837
Transformation, to annual crop, non-irrigated	Matéria prima	mm2	388,4642
Transformation, to annual crop, non-irrigated, extensive	Matéria prima	mm2	20,96192
Transformation, to annual crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	cm2	362,271
Transformation, to dump site	Matéria prima	mm2	4,856224
Transformation, to dump site, inert material landfill	Matéria prima	mm2	2,083097
Transformation, to dump site, residual material landfill	Matéria prima	mm2	1,068362
Transformation, to dump site, sanitary landfill	Matéria prima	mm2	4,144207
Transformation, to dump site, slag compartment	Matéria prima	mm2	0,077739
Transformation, to forest, extensive	Matéria prima	mm2	2,223582
Transformation, to forest, intensive	Matéria prima	mm2	369,0346
Transformation, to forest, secondary (non-use)	Matéria prima	mm2	2,17E-05
Transformation, to forest, unspecified	Matéria prima	mm2	11,02857
Transformation, to grassland, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	0,101931
Transformation, to grassland, natural, for livestock grazing	Matéria prima	mm2	47,21474
Transformation, to heterogeneous, agricultural	Matéria prima	mm2	0,957552
Transformation, to industrial area	Matéria prima	mm2	29,78419
Transformation, to inland waterbody, unspecified	Matéria prima	mm2	9,56E-05
Transformation, to mineral extraction site	Matéria prima	mm2	45,56411
Transformation, to pasture, man made	Matéria prima	mm2	49,03883
Transformation, to pasture, man made, extensive	Matéria prima	mm2	0,000805
Transformation, to pasture, man made, intensive	Matéria prima	mm2	82,48291
Transformation, to permanent crop	Matéria prima	cm2	25,9604
Transformation, to permanent crop, irrigated	Matéria prima	cm2	77,06711
Transformation, to permanent crop, irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	0,922389
Transformation, to permanent crop, non-irrigated	Matéria prima	cm2	36,22399
Transformation, to permanent crop, non-irrigated, intensive	Matéria prima	mm2	0,13748
Transformation, to seabed, drilling and mining	Matéria prima	mm2	9,910871
Transformation, to seabed, infrastructure	Matéria prima	mm2	0,003935
Transformation, to seabed, unspecified	Matéria prima	mm2	0,00076
Transformation, to shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	mm2	7,373395

Transformation, to traffic area, rail network	Matéria prima	mm2	0,081405
Transformation, to traffic area, rail/road embankment	Matéria prima	mm2	2,820813
Transformation, to traffic area, road network	Matéria prima	mm2	4,339037
Transformation, to unknown	Matéria prima	mm2	4,092061
Transformation, to unspecified, natural (non-use)	Matéria prima	mm2	0,027988
Transformation, to urban, continuously built	Matéria prima	mm2	0,000403
Transformation, to urban, discontinuously built	Matéria prima	mm2	1,635992
Transformation, to urban/industrial fallow	Matéria prima	mm2	0,02462
Transformation, to water bodies, artificial	Matéria prima	mm2	167,1445
Transformation, to wetland, inland (non-use)	Matéria prima	mm2	6,87E-05
Triadimenol	Solo	ng	2,430537
Triallate	Solo	ng	1,500393
Triasulfuron	Solo	pg	444,5598
Tribenuron	Solo	pg	213,2833
Tribenuron-methyl	Solo	ng	-9,97582
Tributyltin compounds	Água	ng	8,600428
Trichlorfon	Solo	ng	155,2504
Triclopyr	Solo	ng	17,00101
Triethylene glycol	Água	µg	4,197127
Trifloxystrobin	Ar	pg	137,1532
Trifloxystrobin	Água	pg	0,000139
Trifloxystrobin	Solo	ng	296,5822
Trifluralin	Ar	ng	216,6082
Trifluralin	Solo	ng	666,1423
Triforine	Solo	ng	4,122385
Trimethylamine	Ar	ng	160,4182
Trimethylamine	Água	ng	385,0037
Trinexapac-ethyl	Solo	ng	-347,145
Trioctyltin	Água	pg	0,006181
Triphenyltin	Água	pg	0,002627
Trisodium phosphate	Ar	ng	1,321911
Tungsten	Ar	ng	254,8326
Tungsten	Água	µg	201,2308
Ulexite	Matéria prima	µg	528,3359
Uranium	Matéria prima	mg	1,441969
Uranium	Ar	ng	47,24545
Uranium-234	Ar	mBq	7,60268
Uranium-234	Água	mBq	6,165425
Uranium-235	Ar	µBq	110,0625
Uranium-235	Água	mBq	6,87923
Uranium-238	Ar	mBq	19,56768
Uranium-238	Água	mBq	58,07845
Uranium alpha	Ar	mBq	12,66349
Uranium alpha	Água	mBq	207,9984
Urea	Água	ng	717,6904
Vanadium	Matéria prima	ng	238,6591
Vanadium	Ar	µg	526,8023
Vanadium	Água	mg	16,90056

Vanadium	Solo	µg	41,23932
venting of argon, crude, liquid	Social	mg	561,9869
venting of nitrogen, liquid	Social	g	25,78649
Vermiculite	Matéria prima	µg	678,9352
Vinclozolin	Solo	pg	569,4324
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	Ar	µg	70,00439
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	Água	mg	1,846741
Volume occupied, final repository for low-active radioactive waste	Matéria prima	mm3	5,918584
Volume occupied, final repository for radioactive waste	Matéria prima	mm3	0,370047
Volume occupied, reservoir	Matéria prima	m3day	259,9442
Volume occupied, underground deposit	Matéria prima	mm3	3,653444
Water	Ar	g	4,100219
Water, AR	Água	l	1,302376
Water, AT	Água	cm3	111,767
Water, AU	Água	cm3	992,5555
Water, BA	Água	l	1,169287
Water, BD	Água	mm3	9,4E-07
Water, BE	Água	cm3	42,28061
Water, BG	Água	cm3	119,4386
Water, BR	Água	m3	5,433156
Water, CA	Água	l	3,965713
Water, CH	Água	l	3,429274
Water, CI	Água	mm3	106,9625
Water, CL	Água	cm3	795,5398
Water, CN	Água	l	33,36889
Water, CO	Água	cm3	688,2213
Water, cooling, unspecified natural origin, AR	Matéria prima	cm3	1,968633
Water, cooling, unspecified natural origin, AT	Matéria prima	cm3	7,948137
Water, cooling, unspecified natural origin, AU	Matéria prima	cm3	15,97507
Water, cooling, unspecified natural origin, BA	Matéria prima	cm3	1,208103
Water, cooling, unspecified natural origin, BE	Matéria prima	cm3	9,691637
Water, cooling, unspecified natural origin, BG	Matéria prima	cm3	1,906619
Water, cooling, unspecified natural origin, BR	Matéria prima	l	12,34679
Water, cooling, unspecified natural origin, CA	Matéria prima	cm3	20,05497
Water, cooling, unspecified natural origin, CH	Matéria prima	cm3	7,76194
Water, cooling, unspecified natural origin, CL	Matéria prima	cm3	1,904641
Water, cooling, unspecified natural origin, CN	Matéria prima	cm3	321,0899
Water, cooling, unspecified natural origin, CO	Matéria prima	cm3	4,137158
Water, cooling, unspecified natural origin, CY	Matéria prima	mm3	266,0895
Water, cooling, unspecified natural origin, CZ	Matéria prima	cm3	140,0858
Water, cooling, unspecified natural origin, DE	Matéria prima	cm3	65,00212
Water, cooling, unspecified natural origin, DK	Matéria prima	cm3	3,741521
Water, cooling, unspecified natural origin, EE	Matéria prima	mm3	352,3687
Water, cooling, unspecified natural origin, ES	Matéria prima	cm3	19,72056
Water, cooling, unspecified natural origin, Europe without Switzerland	Matéria prima	cm3	10,33881
Water, cooling, unspecified natural origin, FI	Matéria prima	cm3	5,306864
Water, cooling, unspecified natural origin, FR	Matéria prima	cm3	15,08722

Water, cooling, unspecified natural origin, GB	Matéria prima	cm3	34,69921
Water, cooling, unspecified natural origin, GLO	Matéria prima	cm3	22,88528
Water, cooling, unspecified natural origin, GR	Matéria prima	cm3	43,75117
Water, cooling, unspecified natural origin, HR	Matéria prima	cm3	2,348133
Water, cooling, unspecified natural origin, HU	Matéria prima	cm3	9,060175
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, Africa	Matéria prima	mm3	4,818607
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, Asia, without China and GCC	Matéria prima	mm3	0,003673
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, EU27 & EFTA	Matéria prima	mm3	22,90193
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, Gulf Cooperation Council	Matéria prima	mm3	0,006261
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	Matéria prima	mm3	25,75714
Water, cooling, unspecified natural origin, IAI Area, South America	Matéria prima	mm3	3,602528
Water, cooling, unspecified natural origin, ID	Matéria prima	cm3	11,31847
Water, cooling, unspecified natural origin, IE	Matéria prima	cm3	1,165884
Water, cooling, unspecified natural origin, IN	Matéria prima	cm3	182,2051
Water, cooling, unspecified natural origin, IR	Matéria prima	cm3	15,22674
Water, cooling, unspecified natural origin, IS	Matéria prima	mm3	0,559953
Water, cooling, unspecified natural origin, IT	Matéria prima	cm3	63,33118
Water, cooling, unspecified natural origin, JP	Matéria prima	cm3	-5,98314
Water, cooling, unspecified natural origin, KR	Matéria prima	cm3	28,38377
Water, cooling, unspecified natural origin, LT	Matéria prima	cm3	3,971829
Water, cooling, unspecified natural origin, LU	Matéria prima	cm3	1,720737
Water, cooling, unspecified natural origin, LV	Matéria prima	cm3	1,859534
Water, cooling, unspecified natural origin, MA	Matéria prima	cm3	1,568237
Water, cooling, unspecified natural origin, MK	Matéria prima	cm3	1,06353
Water, cooling, unspecified natural origin, MT	Matéria prima	mm3	587,9297
Water, cooling, unspecified natural origin, MX	Matéria prima	cm3	17,78058
Water, cooling, unspecified natural origin, MY	Matéria prima	cm3	5,786732
Water, cooling, unspecified natural origin, NL	Matéria prima	cm3	34,10595
Water, cooling, unspecified natural origin, NO	Matéria prima	mm3	100,1413
Water, cooling, unspecified natural origin, OCE	Matéria prima	mm3	0,353314
Water, cooling, unspecified natural origin, PE	Matéria prima	cm3	1,666337
Water, cooling, unspecified natural origin, PH	Matéria prima	mm3	1,245236
Water, cooling, unspecified natural origin, PL	Matéria prima	cm3	236,9777
Water, cooling, unspecified natural origin, PT	Matéria prima	cm3	1,758015
Water, cooling, unspecified natural origin, RER	Matéria prima	l	1,441763
Water, cooling, unspecified natural origin, RNA	Matéria prima	mm3	29,75386
Water, cooling, unspecified natural origin, RO	Matéria prima	cm3	8,754609
Water, cooling, unspecified natural origin, RoW	Matéria prima	l	15,39649
Water, cooling, unspecified natural origin, RS	Matéria prima	cm3	7,209937
Water, cooling, unspecified natural origin, RU	Matéria prima	cm3	512,481
Water, cooling, unspecified natural origin, SA	Matéria prima	cm3	18,50246
Water, cooling, unspecified natural origin, SE	Matéria prima	cm3	4,495499
Water, cooling, unspecified natural origin, SI	Matéria prima	cm3	21,88762
Water, cooling, unspecified natural origin, SK	Matéria prima	cm3	23,74903
Water, cooling, unspecified natural origin, TH	Matéria prima	cm3	7,098892

Water, cooling, unspecified natural origin, TR	Matéria prima	cm3	14,78724
Water, cooling, unspecified natural origin, TW	Matéria prima	cm3	10,38132
Water, cooling, unspecified natural origin, TZ	Matéria prima	mm3	102,9741
Water, cooling, unspecified natural origin, UA	Matéria prima	cm3	47,45546
Water, cooling, unspecified natural origin, US	Matéria prima	cm3	139,2751
Water, cooling, unspecified natural origin, WEU	Matéria prima	mm3	2,002549
Water, cooling, unspecified natural origin, ZA	Matéria prima	cm3	8,047347
Water, CR	Água	mm3	1,236821
Water, CY	Água	mm3	268,8533
Water, CZ	Água	cm3	95,58717
Water, DE	Água	cm3	698,6948
Water, DK	Água	cm3	1,131282
Water, EC	Água	mm3	14,0458
Water, EE	Água	mm3	947,0602
Water, ES	Água	cm3	677,7818
Water, Europe without Switzerland	Água	cm3	35,70412
Water, Europe, without Russia and Turkey	Água	mm3	389,5713
Water, FI	Água	cm3	263,1647
Water, FR	Água	l	2,002258
Water, GB	Água	cm3	134,8965
Water, GH	Água	mm3	104,9519
Water, GLO	Água	cm3	52,93476
Water, GR	Água	cm3	237,836
Water, HN	Água	mm3	0,132916
Water, HR	Água	cm3	4,886131
Water, HU	Água	cm3	14,42546
Water, IAI Area, Africa	Água	mm3	418,8242
Water, IAI Area, Asia, without China and GCC	Água	mm3	545,5459
Water, IAI Area, EU27 & EFTA	Água	cm3	1,569743
Water, IAI Area, Gulf Cooperation Council	Água	cm3	2,209823
Water, IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	Água	cm3	1,087681
Water, IAI Area, South America	Água	mm3	236,0046
Water, ID	Água	cm3	67,75015
Water, IE	Água	cm3	70,68816
Water, IL	Água	mm3	0,472822
Water, IN	Água	l	4,091283
Water, in air	Matéria prima	mm3	41,63412
Water, IR	Água	l	1,967245
Water, IS	Água	cm3	871,6106
Water, IT	Água	cm3	-396,837
Water, JP	Água	cm3	282,2778
Water, KR	Água	l	1,105836
Water, lake, BR	Matéria prima	cm3	16,74062
Water, lake, CA	Matéria prima	cm3	3,496339
Water, lake, CH	Matéria prima	mm3	192,8383
Water, lake, CN	Matéria prima	mm3	0,023285
Water, lake, CO	Matéria prima	mm3	167,4524
Water, lake, DE	Matéria prima	mm3	14,30141

Water, lake, Europe without Switzerland	Matéria prima	cm3	4,155545
Water, lake, GLO	Matéria prima	mm3	63,38512
Water, lake, IN	Matéria prima	mm3	940,7835
Water, lake, RER	Matéria prima	mm3	2,840983
Water, lake, RNA	Matéria prima	mm3	0,003959
Water, lake, RoW	Matéria prima	cm3	18,48704
Water, lake, SE	Matéria prima	mm3	0,000427
Water, lake, US	Matéria prima	mm3	0,600614
Water, lake, ZA	Matéria prima	mm3	279,9874
Water, LT	Água	cm3	15,58106
Water, LU	Água	cm3	-33,4636
Water, LV	Água	cm3	57,4941
Water, MA	Água	cm3	1,104559
Water, MK	Água	cm3	241,5387
Water, MT	Água	mm3	598,0422
Water, MX	Água	l	3,034288
Water, MY	Água	cm3	47,76223
Water, NL	Água	cm3	35,15227
Water, NO	Água	cm3	251,5748
Water, NORDEL	Água	mm3	0,163821
Water, NP	Água	cm3	89,01993
Water, NZ	Água	mm3	0,009399
Water, OCE	Água	mm3	99,1412
Water, PE	Água	cm3	10,17168
Water, PG	Água	mm3	81,64295
Water, PH	Água	cm3	21,94245
Water, PL	Água	cm3	-31,0684
Water, PT	Água	l	1,36871
Water, RAF	Água	cm3	2,414636
Water, RAS	Água	cm3	16,47964
Water, RER	Água	l	1,00008
Water, river, AR	Matéria prima	mm3	51,7389
Water, river, AT	Matéria prima	mm3	0,052194
Water, river, AU	Matéria prima	mm3	745,4298
Water, river, BE	Matéria prima	mm3	0,193054
Water, river, BG	Matéria prima	mm3	0,034825
Water, river, BR	Matéria prima	cm3	855,5862
Water, river, CA	Matéria prima	cm3	14,52485
Water, river, CH	Matéria prima	cm3	1,58496
Water, river, CN	Matéria prima	l	1,362154
Water, river, CO	Matéria prima	cm3	2,44921
Water, river, CZ	Matéria prima	mm3	0,001096
Water, river, DE	Matéria prima	cm3	1,866079
Water, river, DK	Matéria prima	mm3	0,074328
Water, river, ES	Matéria prima	cm3	56,41141
Water, river, Europe without Switzerland	Matéria prima	cm3	1,744641
Water, river, FI	Matéria prima	mm3	0,045553
Water, river, FR	Matéria prima	cm3	10,22838

Water, river, GB	Matéria prima	cm3	1,272492
Water, river, GLO	Matéria prima	cm3	12,24766
Water, river, HU	Matéria prima	mm3	0,025297
Water, river, IN	Matéria prima	cm3	939,1327
Water, river, IT	Matéria prima	mm3	1,177646
Water, river, JP	Matéria prima	mm3	3,49E-06
Water, river, KR	Matéria prima	mm3	113,5672
Water, river, LU	Matéria prima	mm3	0,000577
Water, river, MA	Matéria prima	cm3	38,44346
Water, river, MY	Matéria prima	cm3	22,50289
Water, river, NL	Matéria prima	mm3	0,383491
Water, river, NO	Matéria prima	mm3	0,01915
Water, river, PE	Matéria prima	cm3	48,25807
Water, river, PH	Matéria prima	cm3	343,894
Water, river, PL	Matéria prima	mm3	0,005401
Water, river, PT	Matéria prima	mm3	0,019478
Water, river, RAS	Matéria prima	cm3	33,50759
Water, river, RER	Matéria prima	cm3	2,665637
Water, river, RLA	Matéria prima	cm3	1,751489
Water, river, RNA	Matéria prima	cm3	2,183785
Water, river, RO	Matéria prima	mm3	157,0571
Water, river, RoW	Matéria prima	l	4,347271
Water, river, RU	Matéria prima	mm3	627,441
Water, river, SE	Matéria prima	mm3	19,95235
Water, river, SK	Matéria prima	mm3	8,93E-05
Water, river, TN	Matéria prima	cm3	5,480824
Water, river, TZ	Matéria prima	mm3	10,88581
Water, river, US	Matéria prima	cm3	351,1523
Water, river, WEU	Matéria prima	mm3	9,11E-05
Water, river, ZA	Matéria prima	cm3	56,59834
Water, RLA	Água	cm3	34,42387
Water, RME	Água	cm3	23,74392
Water, RNA	Água	cm3	5,221388
Water, RO	Água	cm3	820,3846
Water, RoW	Água	l	235,5559
Water, RS	Água	l	1,534541
Water, RU	Água	l	-1,26718
Water, SA	Água	cm3	18,74569
Water, salt, ocean	Matéria prima	cm3	47,10195
Water, salt, sole	Matéria prima	cm3	50,01262
Water, SE	Água	l	1,487679
Water, SI	Água	cm3	212,0858
Water, SK	Água	cm3	233,8744
Water, TH	Água	cm3	23,88298
Water, TR	Água	l	1,942706
Water, turbine use, unspecified natural origin, AR	Matéria prima	l	1,300983
Water, turbine use, unspecified natural origin, AT	Matéria prima	cm3	104,0459
Water, turbine use, unspecified natural origin, AU	Matéria prima	cm3	970,4851

Water, turbine use, unspecified natural origin, BA	Matéria prima	l	1,168322
Water, turbine use, unspecified natural origin, BE	Matéria prima	cm3	32,66288
Water, turbine use, unspecified natural origin, BG	Matéria prima	cm3	117,6162
Water, turbine use, unspecified natural origin, BR	Matéria prima	m3	5,464577
Water, turbine use, unspecified natural origin, CA	Matéria prima	l	3,948239
Water, turbine use, unspecified natural origin, CH	Matéria prima	l	3,41854
Water, turbine use, unspecified natural origin, CL	Matéria prima	cm3	793,5242
Water, turbine use, unspecified natural origin, CN	Matéria prima	l	33,03581
Water, turbine use, unspecified natural origin, CO	Matéria prima	cm3	682,9702
Water, turbine use, unspecified natural origin, CZ	Matéria prima	cm3	-39,0324
Water, turbine use, unspecified natural origin, DE	Matéria prima	cm3	643,0121
Water, turbine use, unspecified natural origin, DK	Matéria prima	mm3	278,3345
Water, turbine use, unspecified natural origin, EE	Matéria prima	mm3	643,9926
Water, turbine use, unspecified natural origin, ES	Matéria prima	cm3	658,3726
Water, turbine use, unspecified natural origin, FI	Matéria prima	cm3	259,6354
Water, turbine use, unspecified natural origin, FR	Matéria prima	l	1,987391
Water, turbine use, unspecified natural origin, GB	Matéria prima	cm3	99,96028
Water, turbine use, unspecified natural origin, GLO	Matéria prima	mm3	1,228007
Water, turbine use, unspecified natural origin, GR	Matéria prima	cm3	194,9973
Water, turbine use, unspecified natural origin, HR	Matéria prima	cm3	2,53438
Water, turbine use, unspecified natural origin, HU	Matéria prima	cm3	5,375702
Water, turbine use, unspecified natural origin, ID	Matéria prima	cm3	41,9559
Water, turbine use, unspecified natural origin, IE	Matéria prima	cm3	69,50414
Water, turbine use, unspecified natural origin, IN	Matéria prima	l	2,663957
Water, turbine use, unspecified natural origin, IR	Matéria prima	l	1,951795
Water, turbine use, unspecified natural origin, IS	Matéria prima	cm3	874,7659
Water, turbine use, unspecified natural origin, IT	Matéria prima	cm3	-460,924
Water, turbine use, unspecified natural origin, JP	Matéria prima	cm3	290,5395
Water, turbine use, unspecified natural origin, KR	Matéria prima	l	1,081495
Water, turbine use, unspecified natural origin, LT	Matéria prima	cm3	11,61349
Water, turbine use, unspecified natural origin, LU	Matéria prima	cm3	-35,2078
Water, turbine use, unspecified natural origin, LV	Matéria prima	cm3	55,54777
Water, turbine use, unspecified natural origin, MK	Matéria prima	cm3	240,5127
Water, turbine use, unspecified natural origin, MX	Matéria prima	l	3,016218
Water, turbine use, unspecified natural origin, MY	Matéria prima	cm3	41,87767
Water, turbine use, unspecified natural origin, NL	Matéria prima	cm3	2,783103
Water, turbine use, unspecified natural origin, NO	Matéria prima	cm3	259,9829
Water, turbine use, unspecified natural origin, NP	Matéria prima	cm3	89,01993
Water, turbine use, unspecified natural origin, PE	Matéria prima	cm3	9,150966
Water, turbine use, unspecified natural origin, PL	Matéria prima	cm3	-233,985
Water, turbine use, unspecified natural origin, PT	Matéria prima	l	1,367355
Water, turbine use, unspecified natural origin, RER	Matéria prima	cm3	2,500523
Water, turbine use, unspecified natural origin, RNA	Matéria prima	mm3	0,42919
Water, turbine use, unspecified natural origin, RO	Matéria prima	cm3	811,8003
Water, turbine use, unspecified natural origin, RoW	Matéria prima	l	220,4516
Water, turbine use, unspecified natural origin, RS	Matéria prima	l	1,527614
Water, turbine use, unspecified natural origin, RU	Matéria prima	l	-1,71342
Water, turbine use, unspecified natural origin, SE	Matéria prima	l	1,483716

Water, turbine use, unspecified natural origin, SI	Matéria prima	cm3	190,6881
Water, turbine use, unspecified natural origin, SK	Matéria prima	cm3	211,1487
Water, turbine use, unspecified natural origin, TH	Matéria prima	cm3	16,72286
Water, turbine use, unspecified natural origin, TR	Matéria prima	l	1,928181
Water, turbine use, unspecified natural origin, TW	Matéria prima	l	1,077769
Water, turbine use, unspecified natural origin, TZ	Matéria prima	cm3	7,02752
Water, turbine use, unspecified natural origin, UA	Matéria prima	l	5,676871
Water, turbine use, unspecified natural origin, US	Matéria prima	cm3	452,5621
Water, turbine use, unspecified natural origin, ZA	Matéria prima	cm3	164,5517
Water, TW	Água	l	1,088035
Water, TZ	Água	cm3	7,115885
Water, UA	Água	l	5,724996
Water, UCTE	Água	mm3	0,129068
Water, UCTE without Germany	Água	mm3	0,000942
Water, unspecified natural origin, AT	Matéria prima	mm3	0,03007
Water, unspecified natural origin, AU	Matéria prima	mm3	0,000215
Water, unspecified natural origin, BD	Matéria prima	mm3	9,4E-07
Water, unspecified natural origin, BE	Matéria prima	mm3	0,386844
Water, unspecified natural origin, BG	Matéria prima	mm3	0,007678
Water, unspecified natural origin, BR	Matéria prima	cm3	5,139343
Water, unspecified natural origin, CA	Matéria prima	cm3	1,276882
Water, unspecified natural origin, CH	Matéria prima	cm3	27,8219
Water, unspecified natural origin, CL	Matéria prima	mm3	-0,03685
Water, unspecified natural origin, CN	Matéria prima	cm3	1,042205
Water, unspecified natural origin, CO	Matéria prima	mm3	39,75019
Water, unspecified natural origin, CZ	Matéria prima	mm3	0,069948
Water, unspecified natural origin, DE	Matéria prima	mm3	0,119797
Water, unspecified natural origin, DK	Matéria prima	mm3	0,016405
Water, unspecified natural origin, EE	Matéria prima	mm3	0,003552
Water, unspecified natural origin, ES	Matéria prima	mm3	2,207366
Water, unspecified natural origin, Europe without Switzerland	Matéria prima	cm3	13,06981
Water, unspecified natural origin, FI	Matéria prima	mm3	0,089132
Water, unspecified natural origin, FR	Matéria prima	mm3	0,331018
Water, unspecified natural origin, GB	Matéria prima	mm3	0,218968
Water, unspecified natural origin, GLO	Matéria prima	cm3	9,813871
Water, unspecified natural origin, HN	Matéria prima	mm3	0,132916
Water, unspecified natural origin, HU	Matéria prima	mm3	0,013447
Water, unspecified natural origin, IAI Area, Africa	Matéria prima	mm3	53,30031
Water, unspecified natural origin, IAI Area, Asia, without China and GCC	Matéria prima	mm3	105,1949
Water, unspecified natural origin, IAI Area, EU27 & EFTA	Matéria prima	mm3	331,2069
Water, unspecified natural origin, IAI Area, Gulf Cooperation Council	Matéria prima	mm3	4,735895
Water, unspecified natural origin, IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	Matéria prima	mm3	393,5747
Water, unspecified natural origin, IAI Area, South America	Matéria prima	mm3	155,2288
Water, unspecified natural origin, ID	Matéria prima	mm3	0,32401
Water, unspecified natural origin, IN	Matéria prima	cm3	47,51438
Water, unspecified natural origin, IT	Matéria prima	mm3	0,297796

Water, unspecified natural origin, JP	Matéria prima	mm3	0,691098
Water, unspecified natural origin, KR	Matéria prima	mm3	0,526555
Water, unspecified natural origin, LU	Matéria prima	mm3	0,000206
Water, unspecified natural origin, MX	Matéria prima	mm3	0,000212
Water, unspecified natural origin, NL	Matéria prima	mm3	0,381912
Water, unspecified natural origin, NO	Matéria prima	mm3	0,019549
Water, unspecified natural origin, OCE	Matéria prima	mm3	145,335
Water, unspecified natural origin, PE	Matéria prima	mm3	154,4412
Water, unspecified natural origin, PG	Matéria prima	mm3	9,967508
Water, unspecified natural origin, PH	Matéria prima	mm3	0,311309
Water, unspecified natural origin, PL	Matéria prima	mm3	0,089544
Water, unspecified natural origin, PT	Matéria prima	mm3	0,004296
Water, unspecified natural origin, RAF	Matéria prima	cm3	2,840749
Water, unspecified natural origin, RER	Matéria prima	cm3	127,6937
Water, unspecified natural origin, RER w/o CH+DE	Matéria prima	mm3	0,009765
Water, unspecified natural origin, RLA	Matéria prima	cm3	4,215957
Water, unspecified natural origin, RME	Matéria prima	cm3	27,93403
Water, unspecified natural origin, RNA	Matéria prima	mm3	927,2479
Water, unspecified natural origin, RoW	Matéria prima	cm3	814,6198
Water, unspecified natural origin, RU	Matéria prima	cm3	3,975004
Water, unspecified natural origin, SE	Matéria prima	mm3	0,110393
Water, unspecified natural origin, SK	Matéria prima	mm3	0,001488
Water, unspecified natural origin, TH	Matéria prima	mm3	0,004597
Water, unspecified natural origin, TR	Matéria prima	mm3	0,001198
Water, unspecified natural origin, TW	Matéria prima	mm3	0,001356
Water, unspecified natural origin, UA	Matéria prima	mm3	0,019214
Water, unspecified natural origin, US	Matéria prima	mm3	904,3487
Water, unspecified natural origin, VN	Matéria prima	mm3	0,603798
Water, unspecified natural origin, WEU	Matéria prima	mm3	0,160576
Water, unspecified natural origin, ZA	Matéria prima	mm3	428,6075
Water, US	Água	cm3	592,0322
Water, VN	Água	mm3	10,10364
Water, well, AT	Matéria prima	mm3	0,000111
Water, well, AU	Matéria prima	cm3	5,700445
Water, well, BD	Matéria prima	mm3	2,49E-07
Water, well, BE	Matéria prima	mm3	0,000411
Water, well, BG	Matéria prima	mm3	2,09E-05
Water, well, BR	Matéria prima	l	1,062734
Water, well, CA	Matéria prima	cm3	1,028037
Water, well, CH	Matéria prima	mm3	823,1671
Water, well, CN	Matéria prima	cm3	579,2359
Water, well, CO	Matéria prima	mm3	123,3386
Water, well, CR	Matéria prima	mm3	0,018519
Water, well, CZ	Matéria prima	mm3	6,58E-07
Water, well, DE	Matéria prima	mm3	673,7634
Water, well, DK	Matéria prima	mm3	4,46E-05
Water, well, ES	Matéria prima	cm3	32,83649
Water, well, Europe without Switzerland	Matéria prima	mm3	665,696

Water, well, Europe, without Russia and Turkey	Matéria prima	mm3	350,5055
Water, well, FI	Matéria prima	mm3	2,74E-05
Water, well, FR	Matéria prima	cm3	6,307361
Water, well, GB	Matéria prima	mm3	0,000579
Water, well, GLO	Matéria prima	cm3	6,560017
Water, well, HU	Matéria prima	mm3	1,52E-05
Water, well, ID	Matéria prima	cm3	1,796665
Water, well, IN	Matéria prima	l	1,610481
Water, well, IS	Matéria prima	mm3	0,025671
Water, well, IT	Matéria prima	mm3	0,002024
Water, well, JP	Matéria prima	mm3	0,000615
Water, well, KE	Matéria prima	mm3	0,053114
Water, well, LU	Matéria prima	mm3	1,23E-06
Water, well, MA	Matéria prima	cm3	32,58984
Water, well, MX	Matéria prima	mm3	0,001371
Water, well, MY	Matéria prima	cm3	1,956773
Water, well, NI	Matéria prima	mm3	0,009537
Water, well, NL	Matéria prima	mm3	0,000189
Water, well, NO	Matéria prima	mm3	1,15E-05
Water, well, NORDEL	Matéria prima	mm3	0,192731
Water, well, NZ	Matéria prima	mm3	0,096687
Water, well, PE	Matéria prima	cm3	18,44093
Water, well, PG	Matéria prima	mm3	86,08302
Water, well, PH	Matéria prima	cm3	53,7602
Water, well, PL	Matéria prima	mm3	3,24E-06
Water, well, PT	Matéria prima	mm3	4,61E-05
Water, well, RER	Matéria prima	cm3	6,462616
Water, well, RLA	Matéria prima	cm3	32,88949
Water, well, RNA	Matéria prima	cm3	2,279875
Water, well, RoW	Matéria prima	l	3,099417
Water, well, RU	Matéria prima	cm3	1,016298
Water, well, SE	Matéria prima	mm3	3,43028
Water, well, SK	Matéria prima	mm3	5,35E-08
Water, well, SV	Matéria prima	mm3	0,020328
Water, well, TH	Matéria prima	mm3	2,36E-07
Water, well, TN	Matéria prima	cm3	8,432289
Water, well, TR	Matéria prima	mm3	0,070698
Water, well, US	Matéria prima	cm3	514,3344
Water, well, WEU	Matéria prima	mm3	0,000892
Water, well, ZA	Matéria prima	cm3	6,10391
Water, WEU	Água	mm3	1,354992
Water, ZA	Água	cm3	178,4549
Water/m3	Ar	l	58,0992
Wood, hard, standing	Matéria prima	cm3	6,589968
Wood, soft, standing	Matéria prima	cm3	12,14262
Wood, unspecified, standing/m3	Matéria prima	mm3	0,23695
Xenon	Matéria prima	ng	46,47008
Xenon-131m	Ar	mBq	7,365027

Xenon-133	Ar	Bq	32,25564
Xenon-133m	Ar	μBq	282,6685
Xenon-135	Ar	Bq	8,898156
Xenon-135m	Ar	mBq	67,36656
Xenon-137	Ar	mBq	2,116646
Xenon-138	Ar	mBq	15,80988
Xylene	Ar	mg	3,427043
Xylene	Água	μg	160,5583
Zeta-cypermethrin	Ar	pg	903,012
Zeta-cypermethrin	Solo	pg	38,69189
Zinc	Matéria prima	mg	52,69081
Zinc	Ar	μg	719,5919
Zinc	Água	mg	57,3894
Zinc	Solo	mg	2,591189
Zinc-65	Ar	nBq	17,01367
Zinc-65	Água	μBq	233,2137
Zineb	Solo	ng	2,875892
Ziram	Solo	pg	647,0758
Zirconium	Matéria prima	μg	526,0783
Zirconium	Ar	ng	10,19126
Zirconium-95	Ar	μBq	3,077632
Zirconium-95	Água	mBq	1,20828