

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**REPENSANDO O CICLO:**

**Avaliação do Ciclo de Vida do Ácido Polilático em  
Substituição do Polietileno em Absorventes Descartáveis**

**Beatriz Aparecida Muniz Pereira**

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof. Dra. Alice Medeiros de Lima

São Carlos – SP

2020

## **BANCA EXAMINADORA**

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de Dezembro de 2020 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Alice Medeiros de Lima, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Convidada: MSc. Ariane Silveira Sbrice Pinto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (PPGEQ/UFSCar).

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Marcelo Perencin de Arruda Ribeiro, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

## AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo amor e incentivo de sempre. Aos meus pais, Cida e Paulo, por possibilitarem que eu me mudasse e me mantivesse em São Carlos (a gente sabe que não foi fácil), por vibrarem comigo a cada conquista, por me confortarem quando tudo parecia dar errado. Não deu errado, e muito disso foi pelo apoio e carinho dos dois. Se não me ensinassem o que é amor e luta desde cedo, provavelmente não estaria prestes a concluir a graduação e escrevendo este trabalho. Sempre falo, e repito: esse diploma não é só meu, o mérito de mudar uma estrutura é nosso. Aos meus irmãos, Rafael e Bianca, por todo o apoio, amor e companheirismo. Bianca, especialmente, por sempre estar ao meu lado, mesmo a 200 km distância.

Aos meus amigos, por dividirem comigo os melhores e os piores momentos desses sete longos anos. Aos amigos da EQ, por deixarem a graduação mais leve, mesmo isso sendo uma tarefa quase impossível. Aos amigos que fiz na AIESEC, e à própria ONG, pela jornada e por me ensinarem tanto sobre mim. Aos profissionais com quem trabalhei, por me inspirarem a trabalhar com propósito; busquei encerrar esse ciclo trazendo nesse trabalho especialmente o que aprendi com vocês nesses últimos anos.

À minha orientadora, Alice, pela paciência acompanhando todas minhas mudanças (de tema, de cidade e de trabalho) desde o início de 2019. Agradeço por acolher tão bem as minhas ideias e por mostrar que a distância não é um empecilho para uma boa orientação quando se tem do outro lado uma orientadora tão aberta a escutar, a opinar e a cobrar sempre quando necessário.

Aos componentes da banca avaliadora, Ariane e Marcelo, e novamente minha orientadora, pelos feedbacks e contribuições para o trabalho.

À UFSCar e ao Departamento de Engenharia Química, pela qualidade do ensino oferecido, pelas oportunidades apresentadas durante a graduação e por mudar a minha vida.

## RESUMO

A forte tendência de produtos com ciclos de vidas mais sustentáveis está promovendo mudanças na forma como eles são produzidos atualmente, buscando matrizes energéticas mais limpas, fontes renováveis, e descartes ambientalmente favoráveis. A ferramenta da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se propõe a quantificar os impactos ambientais, diretos e indiretos, desses produtos e serviços, em todo o seu ciclo de vida, compreendendo desde a extração das matérias-primas até seu descarte ou disposição final. Embora o uso do método tenha se iniciado em 1960, sua aplicação se tornou difundida atualmente. Um produto que possui um ciclo de vida bastante controverso é o polímero convencional, por ter origem fóssil e não ser biodegradável. Por isso, buscam-se alternativas para sua aplicação, como os biopolímeros, por exemplo. Biopolímeros são definidos como polímeros originados de matérias-primas renováveis e que possuem um ciclo de vida mais curto. Destaca-se entre eles o ácido polilático (PLA), que tem como origem o amido ou açúcar e que pode ser usado em diversas aplicações, entre elas o absorvente descartável. O trabalho trouxe uma comparação entre os impactos do ciclo de vida do absorvente com PE e do absorvente com PLA, mostrando que o primeiro possui mais impactos negativos ao meio-ambiente em relação ao aquecimento global, depleção abiótica de combustíveis fósseis, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade de água doce e oxidação fotoquímica. Contudo, o estudo trouxe que o PLA também possui impactos negativos significativos em seu ciclo de vida e que devem ser avaliados com cautela, como a depleção abiótica de minerais, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio e ecotoxicidade terrestre. Além desses resultados, o trabalho também apresentou o método de ACV como uma ferramenta útil para o desenvolvimento de uma indústria química sustentável.

**Palavras-chave:** Avaliação de Ciclo de Vida; Sustentabilidade; Ácido polilático; Absorventes descartáveis.

## ABSTRACT

The strong trend of products with more sustainable life cycles is promoting changes in the way they are produced today, with the search for cleaner energy matrices, renewable sources, and environmentally favorable waste treatments. The Life Cycle Assessment (LCA) tool aims to quantify the direct and indirect environmental impacts of these products and services, throughout their entire life cycle, from the extraction of raw materials to their final disposal. Although the use of the method started in 1960, its application has become widespread today. A product that has a very controversial life cycle is the conventional polymer, as it has a fossil origin and is not biodegradable. Therefore, alternatives are sought for its application, such as biopolymers, for example. Biopolymers are defined as polymers originating from renewables raw materials and which have a shorter life cycle. Among them stands out the polylactic acid (PLA), which originates from starch or sugar and can be used in several applications, among them the disposable sanitary pad. The work brought a comparison between the life cycle impacts of the PE sanitary pad and the PLA sanitary pad. The results showed the PLA sanitary pad has the most sustainable process. PE sanitary pad has more negative impacts on the environment in relation to global warming, abiotic depletion of fossil fuels, human toxicity, marine ecotoxicity, freshwater ecotoxicity and photochemical oxidation. However, the results showed that PLA sanitary pad also has significant negative impacts on its life cycle that must be carefully evaluated, such as abiotic mineral depletion, acidification, eutrophication, ozone layer depletion and terrestrial ecotoxicity. In addition of these results, the work also presented the LCA method as a useful tool for the development a sustainable chemical industry.

**Keywords:** Life Cycle Assessment; Sustainability; Polylactic acid; Sanitary pads.

## SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA .....	i
AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	viii
NOMENCLATURA.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Economia Circular: uma resposta às crises climática e dos plásticos .....	3
2.2. Avaliação do Ciclo de Vida.....	5
2.2.1. Definição e Histórico .....	5
2.2.2. Método.....	8
2.2.2.1. Definição do Objetivo e Escopo .....	9
2.2.2.2. Análise de Inventário .....	13
2.2.2.3. Avaliação de Impacto .....	14
2.2.2.4. Interpretação .....	14
2.3. Biopolímeros: alternativa sustentável aos polímeros de origens fósseis .....	15
2.3.1. Conceitos Gerais .....	15
2.3.2. Mercado .....	17
2.4. Ácido Polilático .....	20
2.5. Absorventes descartáveis: O produto e seus aspectos ambientais.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1. Materiais .....	28
3.1.1. Software.....	28
3.1.2. Bases de Dados .....	29
3.2. Métodos .....	29
3.2.1. Definição do Objetivo e Escopo .....	29
3.2.2. Análise de Inventário.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1. Avaliação de Impactos.....	46
4.2. Interpretação .....	50
5. CONCLUSÃO.....	52

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....53

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Comparação entre a cadeia linear e a circular .....	4
<b>Figura 2:</b> Estágios do ciclo de vida de um produto .....	6
<b>Figura 3:</b> Associados da Rede ACV em 2019 .....	8
<b>Figura 4:</b> Framework metodológico da ACV .....	9
<b>Figura 5:</b> Definição de biopolímeros .....	15
<b>Figura 6:</b> Matriz de degradabilidade do polímero versus renovabilidade da fonte .....	17
<b>Figura 7:</b> Representatividade fontes renováveis para a produção de biopolímeros .....	18
<b>Figura 8:</b> Capacidade global de produção de bioplásticos em 2019, % (por material) .....	19
<b>Figura 9:</b> Capacidade global de produção de bioplásticos em 2019 (por região, em %) .....	19
<b>Figura 10:</b> Destino dos biopolímeros por segmento de mercado (2020) .....	20
<b>Figura 11:</b> Fórmula estrutural do PLA .....	21
<b>Figura 12:</b> Processo produtivo do ácido láctico .....	21
<b>Figura 13:</b> Produção do PLA por policondensação direta .....	23
<b>Figura 14:</b> Produção do PLA por polimerização por abertura de anel .....	23
<b>Figura 15:</b> Fluxograma de um processo de ROP típico .....	24
<b>Figura 16:</b> Camadas constituintes de um absorvente descartável padrão .....	26
<b>Figura 17:</b> Grau de comoditização de produtos para cuidados menstruais .....	27
<b>Figura 18:</b> Tela inicial do software openLCA .....	28
<b>Figura 19:</b> Massa de um absorvente distribuído pelos seus componentes (valor médio de 10 amostras) .....	30
<b>Figura 20:</b> Sistema de produto do estudo .....	31
<b>Figura 21:</b> Criação do fluxo de PE na saída do processo de produção do polímero no openLCA .....	33
<b>Figura 22:</b> Criação do processo de produção de PE no openLCA .....	34
<b>Figura 23:</b> Entradas e saídas do processo de produção do PE .....	35
<b>Figura 24:</b> Entradas e saídas do processo de produção do absorvente de PE .....	36
<b>Figura 25:</b> Entradas e saídas do processo de uso do absorvente de PE .....	37
<b>Figura 26:</b> Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos de PE em aterro sanitário .....	38
<b>Figura 27:</b> Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos de papelcartão em aterro sanitário .....	38
<b>Figura 28:</b> Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos de papéis gráficos em aterro sanitário .....	39
<b>Figura 29:</b> Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos sólidos municipais em aterro sanitário .....	39
<b>Figura 30:</b> Fechamento do ciclo de vida do absorvente de PE .....	40
<b>Figura 31:</b> Entradas e saídas do processo de produção do PLA .....	41
<b>Figura 32:</b> Entradas e saídas do processo de produção do absorvente de PLA .....	42
<b>Figura 33:</b> Entradas e saídas do processo de uso do absorvente de PLA .....	42
<b>Figura 34:</b> Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos de PLA .....	43
<b>Figura 35:</b> Fechamento do ciclo de vida do absorvente de PLA .....	44
<b>Figura 36:</b> Modelagem da AICV .....	45
<b>Figura 37:</b> Resultados comparativos relativos da Avaliação do Ciclo de Vida para os sistemas do estudo .....	46



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Categorias de impacto do método CML-IA e seus fatores de caracterização .....	31
<b>Tabela 2:</b> Dados de entrada para a produção de 1 unidade de absorvente de PE.....	35
<b>Tabela 3:</b> Resultados de impactos dos ciclos de vida dos absorventes de PE e de PLA.....	47
<b>Tabela 4:</b> Processos de maior impacto em cada categoria (Absorvente PLA).....	48
<b>Tabela 5:</b> Processos de maior impacto em cada categoria (Absorvente PE).....	49

## NOMENCLATURA

### Lista de Variáveis

ADP	Fator de Depleção Abiótica	kgSb <sub>eq</sub> /kg de minerais
HTP	Potencial de Toxicidade Humana	kgp-DCB <sub>eq</sub> /kg de emissão
OF	Oxidação fotoquímica	kgC <sub>2</sub> H <sub>4eq</sub> /kg de emissão
PA	Potencial de Acidificação	kgSO <sub>2eq</sub> /kg de emissão
PAG <sub>100</sub>	Potencial de Aquecimento Global em 100 anos	kgCO <sub>2eq</sub> /kg de emissão
PCI	Poder Calorífico Inferior	MJ/kg de combustível fóssil
PDO	Potencial de Destruição da Camada de Ozônio	kgCFC-11 <sub>eq</sub> /kg emissão
PEu	Potencial de Eutrofização	kgPO <sub>4eq</sub> /kg de emissão

### Lista de Abreviações

ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
DPC	<i>Direct Polycondensation</i> (Policondensação Direta)
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
FC	Fator de Caracterização
GANAA	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)

IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> (União Internacional de Química Pura e Aplicada)
MRI	<i>Midwest Research Institute</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Polietileno
PET	Politereftalato de Etileno
PLA	Ácido Polilático
PP	Polipropileno
PSA	Polímero Superabsorvente
PVC	Policloreto de Vinila
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i> (Análise de Recurso e Perfil Ambiental)
ROP	<i>Ring Opening Polymerization</i> (Polimerização de Abertura de Anel)
SETAC	Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química
TNT	Tecido Não Tecido

## 1. INTRODUÇÃO

Visto o crescente interesse pela sustentabilidade e circularidade de produtos e processos, se faz cada vez mais necessária a busca por soluções alternativas à maneira como diversos negócios são conduzidos hoje. A Engenharia Química está no cerne de várias dessas soluções, como a substituição de matriz energética e de matérias-primas fósseis por recursos renováveis, a busca por processos que consumam menos recursos naturais, soluções para tratamento de resíduos e desenvolvimento de produtos mais sustentáveis. Logo, é importante para diversos profissionais, sobretudo para o engenheiro químico, não só estar atualizado sobre essas soluções, como também conhecer técnicas e ferramentas que quantifiquem impactos ambientais, a fim de propor novas alternativas.

Uma dessas ferramentas é a Avaliação do Ciclo de Vida, que usa conceitos de balanços de massa e energia para mensurar esses impactos. A relevância da técnica é grande em variados setores da sociedade. Indústrias químicas como Braskem, BASF e Oxiteno, e tantas outras de diversos setores, fazem parte da Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida (REDE ACV, 2020), desenvolvem metodologias e apresentam resultados para os consumidores sobre os impactos positivos e negativos de seus produtos. Governos ao redor do mundo, como União Europeia, EUA, Japão, Coreia, Canadá e Austrália, usam a ACV como um elemento de suas políticas ambientais (GUINÉE et al, 2011). Também é observado um aumento na participação das publicações sobre ACV em relação ao total de publicações científicas existentes no mundo: até o ano de 2000, a participação era abaixo de 0,2%, aumentando a cada ano, até que em 2017 o percentual foi de 0,8% (ZIMEK et al, 2019).

Além da motivação já citada, há ainda o interesse por estudar a aplicação do método em produtos que tenham relevância mercadológica e interesse por sustentabilidade, comparando-os com alternativas mais favoráveis ao meio ambiente. Um produto que se enquadra em ambas as características é o absorvente descartável, que possui um alto grau de comoditização, devido a ampla utilização e recorrência de consumo (DAVIDSON, 2012) e é feito geralmente com polietileno, de origem fóssil e não biodegradável (BARMAN et al., 2017).

O presente trabalho tem como objetivos apresentar o método da Avaliação do Ciclo de Vida como uma forma de aplicação de conhecimentos básicos na área da Engenharia Química na indústria para a quantificação dos impactos ambientais de produtos e processos; e avaliar o

ácido polilático como uma alternativa de matéria-prima sustentável em relação ao polietileno para a manufatura de absorventes higiênicos descartáveis.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos para o entendimento do cenário climático global, da crescente preocupação com a sustentabilidade dos produtos e a necessidade de avaliação de seus impactos ambientais. Além disso, também serão apresentadas definições de biopolímeros e suas características, destacando o PLA como uma alternativa aos polímeros de origem fóssil em produtos descartáveis, como absorventes sanitários.

### **2.1. Economia Circular: uma resposta às crises climática e dos plásticos**

O planeta está vivendo uma crise climática. Bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são lançadas anualmente na atmosfera a partir da produção e uso de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural, resultantes da atividade humana (ONU, 2020). Tais emissões de CO<sub>2</sub> e outros Gases de Efeito Estufa (GEE) são responsáveis pelo aquecimento global (IPCC, 2019). Segundo o Acordo de Paris de 2015, deve-se manter a elevação da temperatura global bem abaixo de 2°C, e buscar esforços para limitá-la em 1,5°C (CABRAL, 2019). Contudo, se as emissões de GEE se mantiverem como estão atualmente, as temperaturas podem subir além de 3°C até 2100, gerando impactos irreversíveis, e alguns desses efeitos já podem ser observados atualmente: desastres relacionados às mudanças climáticas estão se tornando mais frequentes e intensos conforme o planeta esquenta (ONU, 2020).

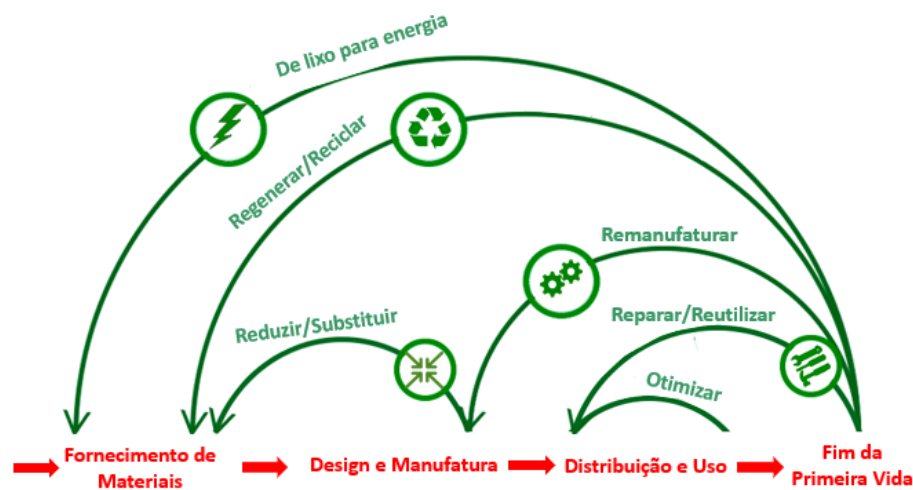
As mudanças do clima estão diretamente relacionadas às fontes de energia, devido às emissões de CO<sub>2</sub> e metano (CH<sub>4</sub>) da produção e combustão de combustíveis fósseis (PERKINS, 2019). De acordo com a publicação da Fundação Ellen MacArthur (2019), fontes energéticas são responsáveis por 55% das emissões atuais de GEE. Logo, a substituição da matriz fóssil por uma matriz energética “limpa” e renovável endereça uma parte do problema, sendo necessárias outras ações para a redução das emissões restantes, que são relativas aos produtos. Dessas emissões restantes, 45% podem ser reduzidas até 2050 através de iniciativas de Economia Circular (ELLEN MACARTHUR, 2019).

O termo Economia Circular foi introduzido em 1989 por Pearce e Turner, contudo, tem origem em estudos da década de 1960, com a contribuição de diversos pesquisadores (SARIATLI, 2017). Existem diversas definições e concepções, mas todas convergem em uma economia em que o valor de um produto é criado por meio da extensão de sua vida útil.

A Economia Circular vem como um contraponto à Economia Linear, predominante desde a Primeira Revolução Industrial, em que foi apresentado o modelo de produção e consumo de “pegar, fazer e desfazer” (ESPOSITO et al., 2018), ou em termos mais próximos do âmbito industrial, “extrair, produzir e descartar”. A Economia Linear é caracterizada pela exploração excessiva de recursos naturais e o acúmulo de resíduos poluentes, ou seja, matérias-primas são extraídas do meio ambiente e devolvidas a ele como resíduos. A Economia Circular, por sua vez, tem como premissa a redução do consumo de materiais e a reciclagem de produtos residuais sempre que possível, visando a sua reutilização no processo produtivo (SØRENSEN, 2017).

A Figura 1 ilustra uma cadeia produtiva linear e uma cadeia circular.

**Figura 1: Comparação entre a cadeia linear e a circular**



**Fonte:** UNIDO, 2020 (Adaptado).

Segundo relatório do Instituto de Economia Circular *Circle Economy* (2020), a economia global atual é 8,6% circular. Isso significa que apenas 8,6% das cerca de 100 bilhões de toneladas de recursos (minerais, combustíveis fósseis, metais e biomassa) que entram na economia mundial são reutilizados anualmente. Além disso, cerca de 52,6 bilhões de toneladas dos recursos consumidos são destinadas à produtos de vida curta, que atingem seu fim de uso geralmente dentro de um ano.

Um produto que está no centro das discussões sobre a Economia Circular é o plástico. Segundo a Fundação Ellen MacArthur (2019), a cadeia produtiva dos polímeros é predominantemente linear, com a extração de matérias-primas virgens e fósseis e sua disposição feita em aterros sanitários, vazamentos indevidos para o meio ambiente ou em incineradores. Apenas 2% das 78 milhões de toneladas de plástico para embalagens é reciclado e volta para a produção, fechando o ciclo. Algumas alternativas para tornar o ciclo de vida dos polímeros mais circular são ações como a adoção de matérias-primas renováveis, design voltado ao menor consumo de recursos, reciclagem e reutilização do material. Além disso, muitos polímeros de fontes renováveis possuem formas de descarte ambientalmente favoráveis, como a digestão anaeróbia e a compostagem.

Para a elaboração de propostas para o fechamento do ciclo dos produtos são necessários métodos bem fundamentados para a avaliação dos impactos das diferentes soluções. Um desses métodos é a Avaliação do Ciclo de Vida.

## **2.2. Avaliação do Ciclo de Vida**

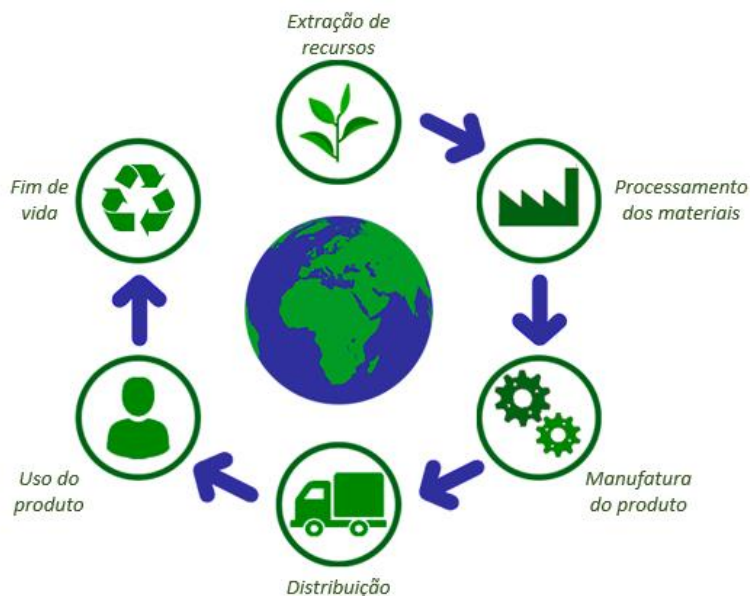
### **2.2.1. Definição e Histórico**

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser definida como um método para cálculo dos impactos ambientais diretos e indiretos de um produto ou serviço em todo o seu ciclo de vida, desde a aquisição de matéria-prima até a fabricação, uso e disposição final (descarte ou reutilização) (BRUSSEAU, 2019).

A Figura 2 apresenta os estágios do ciclo de vida de um produto que podem ser compreendidos em estudo de ACV.



**Figura 2: Estágios do ciclo de vida de um produto**



**Fonte:** Brusseau, 2019 (Adaptado).

Embora a vasta aplicação do método seja recente, os primeiros estudos de ACV datam do final da década de 1960 e início dos anos 1970, a partir da crescente preocupação com as limitações de recursos naturais, como energia e matéria-prima (CURRAN, 2016).

Um dos primeiros estudos publicados foi feito por Harold Smith e apresentado na Conferência Mundial de Energia, em 1963. Nele, Smith relatava seu cálculo das necessidades cumulativas de energia para a produção de intermediários e produtos químicos (BRUSSEAU, 2019). Em 1969, o instituto de pesquisa *Midwest Research Institute* (MRI) conduziu para a *Coca Cola Company* um estudo (interno e não publicado) quantificando as necessidades de recursos, cargas de emissão e vazões de resíduos para diferentes embalagens de bebidas (GUINÉE et al, 2011). O objetivo do estudo era avaliar qual tipo de embalagem possuía menores liberações para o meio-ambiente e usava menos recursos (como combustível e matéria-prima), tendo assim a embalagem mais sustentável. Esse estudo lançou as bases para os métodos atuais de ACV nos Estados Unidos, e outras companhias também fizeram estudos parecidos no mesmo período.

O período entre os anos 1970 e 1990 foi definido como as décadas de concepção do método (GUINÉE et al, 2011). Na década de 1970, o processo de quantificação do uso de recursos e liberações para o ambiente dos produtos ficou conhecido como Análise de Recursos

e Perfil Ambiental (REPA, em inglês), nos Estados Unidos, e como *Ecobalance* na Europa. Entre 1970 e 1975, cerca de 15 REPAs foram feitos, e devido ao crescente interesse no assunto, se deu início ao desenvolvimento de protocolos para padronização dos estudos, revisados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). Enquanto isso, na Europa foram desenvolvidas diferentes abordagens para o método (BRUSSEAU, 2019).

A década de 1990 foi denominada de Década de Padronização. Com o crescimento do número de eventos e guias sobre ACV publicados ao redor do mundo, além das primeiras publicações em revistas e periódicos científicos como os periódicos *Journal of Cleaner Production* e o *Journal of Industrial Ecology*, a necessidade de harmonização e padronização do método também aumentou. A Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química (SETAC) iniciou um trabalho de desenvolvimento e harmonização do método de ACV, criando um “Código de Prática”. Para a padronização do método, a Organização Internacional de Normalização (ISO) criou dois padrões internacionais: a ISO 14.040, que visava padronizar os princípios e a estrutura da ACV e a ISO 14.044, buscando padronizar requisitos e diretrizes do método (GUINÉE et al, 2011). Tais normas se tornaram a base para os estudos de ACV lançados atualmente.

A história da ACV no Brasil se inicia na década de 1990, com a criação de um subcomitê da ABNT junto ao Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANNA) em 1994 (IBICT, 2015). Na mesma década, em 1998, foi lançada a primeira publicação em língua portuguesa para fins didáticos sobre a metodologia, chamada “Análise de Ciclo de Vida de Produtos: Ferramenta Gerencial da ISO 14000” (CHEHEBE, 1997). Alguns anos depois, em 2002, ocorreu a fundação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), responsável pela disseminação e consolidação da metodologia no Brasil. A ABCV promove conferências e outros eventos, como a segunda edição da Conferência Internacional sobre Avaliação do Ciclo de Vida (CILCA), que agora denomina-se Conferência Internacional sobre Análise do Ciclo de Vida na América Latina, e o Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços (CBGCV) (WILLERS et al., 2013). Em 2013, com o objetivo de promover o método entre as companhias brasileiras, nove empresas, sendo elas Braskem, Danone, Embraer, GE, Grupo Boticário, Natura, Odebrecht, Oxiteno e Tetra Pak, em parceria com a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV) e o Instituto Akatu, fundaram a Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida (REDE ACV, 2020).

A Figura 3 traz os associados da Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida até dezembro de 2019. Nela estão empresas, universidades, institutos e fundações.

**Figura 3: Associados da Rede ACV em 2019**

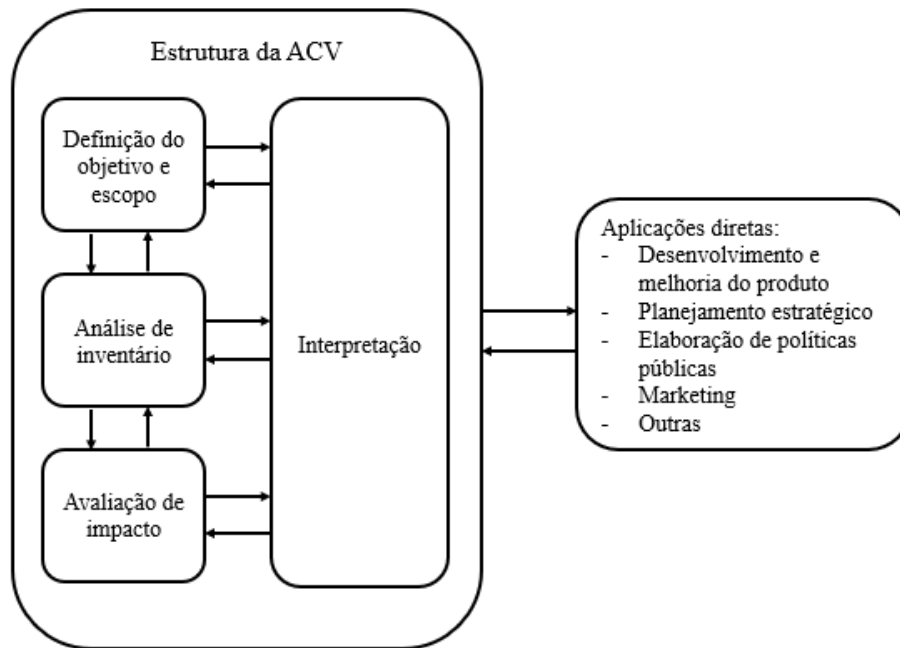


**Fonte:** Rede ACV, 2020 (Adaptado).

### 2.2.2. Método

De acordo com a NBR 14040:2001, a metodologia de ACV consiste em quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. A Figura 4 ilustra o framework metodológico da ACV, bem como as aplicações diretas do método.

**Figura 4: Framework metodológico da ACV**



**Fonte:** ABNT, 2001; ABNT, 2009 (Adaptado).

### **2.2.2.1. Definição do Objetivo e Escopo**

Nessa fase, a aplicação e o tipo de ACV são descritos, e os sistemas de produtos a serem avaliados e o escopo geográfico e temporal são definidos. Além disso, também será definida a unidade funcional, que servirá de referência para as etapas subsequentes (NIEUWLAAR, 2013).

O objetivo do estudo de ACV deve explicitar a aplicação pretendida, além das motivações para condução do estudo e o público-alvo a quem se pretende comunicar os resultados da avaliação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

O escopo de um estudo de ACV deve contemplar os seguintes itens: função, unidade funcional e fluxo de referência; sistema de produto e fronteiras de sistema; procedimentos de alocação; categorias de impacto; requisitos de dados; suposições e limitações do estudo; requisitos de qualidade dos dados; tipos de revisão crítica e de formato do relatório (IBICT, 2015).

- **Função, unidade funcional e fluxo de referência**

A função define a serventia do produto ou sistema a ser avaliado no estudo e deve ser passível de mensuração (IBICT, 2015). O produto ou sistema pode ter diversas funções possíveis, e a selecionada depende dos objetivos e do escopo do estudo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

A unidade funcional descreve e quantifica as funções selecionadas. Segundo a ISO 14040, seu propósito é fornecer uma referência para a qual as entradas e saídas são relacionadas, necessária para assegurar a comparabilidade de resultados do estudo de ACV. Quando diferentes produtos ou sistemas são avaliados, essa referência é importante para assegurar que as comparações sejam feitas em uma base comum.

O fluxo de referência pode ser definido como a quantidade de produto necessária para atender a unidade funcional (IBICT, 2015). Seu propósito é traduzir a unidade funcional abstrata em vazões de produto específicos, e é um ponto de partida para a modelagem dos sistemas de produto (EPA, 2004).

Nieuwlaar (2013) exemplifica tais conceitos usando a geração de energia. Para a produção de energia elétrica, a função pode ser definida como “entregar eletricidade à rede de elétrica”. A unidade funcional é então de 1 kWh de energia elétrica entregue à rede. Quando comparadas, a geração de energia elétrica de centrais elétricas a base de carvão e centrais elétricas a gás devem utilizar mesma unidade funcional, como uma base comum. Sendo assim, 1 kWh de eletricidade gerada de uma estação de energia a base de carvão deve ser equivalente à 1 kWh de energia elétrica gerada em uma estação de energia a gás.

- **Sistema do produto e fronteiras do sistema**

A ISO 14.040 define o sistema de produto como um conjunto de unidades de processo (operações unitárias) conectadas de forma material e energética, e que realiza uma ou mais funções determinadas.

Define-se fronteira do sistema como a interface entre um sistema de produto e o meio ambiente ou outros sistemas de produto. As fronteiras do sistema definem quais das unidades de processo devem estar inseridas no estudo de ACV, e podem ser determinadas por diversos

fatores, como a aplicação do estudo, premissas e simplificações adotadas, restrições de dados, público-alvo do estudo etc (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). Tais fatores devem ser descritos e justificados no escopo do estudo.

Existem diferentes abordagens para definição das fronteiras do sistema:

- *Cradle-to-grave* (abordagem “do berço ao túmulo”): considera o ciclo de vida desde a extração das matérias-primas até o “fim da vida” do produto, isto é, a disposição final, podendo ser o descarte, a reciclagem, a degradação etc.;
- *Cradle-to-gate* (abordagem “do berço ao portão”): também considera o ciclo de vida a partir da extração de materiais, mas aqui ele se encerra no “portão” da fábrica, ou seja, ao fim da manufatura do produto;
- *Gate-to-gate* (abordagem “do portão ao portão”): o ciclo de vida considera uma unidade de processo específica, podendo ser somente a manufatura do produto, por exemplo.

- **Procedimentos de alocação**

A Norma ISO 14.040 define o procedimento de alocação como a repartição dos fluxos de entrada ou de saída de uma unidade de processo no sistema de produto estudado. Segundo Ramirez (2009), a alocação pode ser física ou econômica/arbitrária; se existir a possibilidade de uso de relações físicas para definir a alocação, o procedimento físico é mais indicado. Tal método usa dados físicos como massa, alimentação de energia, condutividade térmica, viscosidade e massa específica para a alocação. O procedimento econômico utiliza o valor econômico dos coprodutos, e assim tem como desvantagem a flutuação do mercado (RAMIREZ, 2009).

- **Categorias de impacto**

Nessa fase, devem ser definidas as categorias de impacto a serem avaliadas no estudo de ACV. Segundo Keulenaer et al. (2015), as seis principais categorias de impacto são acidificação, eutrofização, destruição da camada de ozônio, aquecimento global, criação de ozônio fotoquímico e uso de energia primária. Um método de impacto pode incluir além dessas categorias, outras como toxicidade humana, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade

marinha, ecotoxicidade terrestre, radiação ionizante, oxidação fotoquímica, esgotamento abiótico, uso e ocupação da terra e uso da água.

A norma ISO 14.044 sugere que a escolha das categorias de impacto deva ser consistente com os objetivos do estudo. Para isso, é necessário conhecer o ciclo de vida do produto ou serviço avaliado (ou produtos ou serviços, em caso de estudos comparativos), e suas interações com o meio ambiente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

- **Requisitos de dados**

Os requisitos de dados classificam o dado quanto a alguns fatores: à fonte, à forma de agregação à forma de obtenção e à natureza da corrente de origem do dado.

Quanto à fonte, o dado pode ser primário ou secundário. O dado primário é coletado diretamente junto ao processo, enquanto o secundário é calculado ou estimado a partir de informações disponíveis na literatura. Quanto à forma de agregação, o dado pode ser individual ou consolidado. Quanto à forma de obtenção, ele pode ser medido, calculado ou estimado. E por fim, quanto à natureza da corrente, o dado pode ser de entrada ou de saída (IBICT, 2015).

- **Suposições e limitações do estudo**

O estudo de ACV também deve conter todas as premissas adotadas e limitações consideradas em sua elaboração. Tais considerações podem ser: uso de tecnologias diferentes, dados desatualizados ou fora da realidade do estudo etc (IBICT, 2015).

- **Requisitos de qualidade dos dados**

Os requisitos da qualidade dos dados especificam características dos dados necessários ao estudo, e devem ser definidos para possibilitar que os objetivos e o escopo do estudo da ACV sejam alcançados. Tais requisitos podem abordar: cobertura geográfica, temporal e tecnológica; precisão, completeza e representatividade; consistência e reprodutibilidade dos métodos usados no estudo; fontes dos dados e sua representatividade; incerteza da informação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

- **Tipo de revisão crítica e de formato de relatório**

A revisão crítica visa avaliar se o estudo foi elaborado seguindo as normas de ACV. Ela pode ser conduzida por um especialista interno ou externo à organização que realizou o estudo, ou por um painel composto por no mínimo três membros, sob a coordenação de um especialista independente externo (preferencialmente), escolhido pelo solicitante do estudo de ACV (IBICT, 2015).

#### **2.2.2.2. Análise de Inventário**

A próxima fase do estudo é a análise do inventário do ciclo de vida (ICV). Nessa etapa, são identificados e quantificados o uso de recursos como energia, água e matéria-prima, e lançamentos para o ambiente, como emissões atmosféricas, disposição de resíduos e descarte de efluentes (BRUSSEAU, 2019). Essa fase determina e quantifica as entradas e saídas de materiais relacionadas a uma unidade funcional de um sistema de produto ou serviço e as vincula aos seus impactos ambientais, e pode ser resumida como um simples balanço material (JONKER et al., 2012). Os dados coletados na análise do inventário são considerados o primeiro passo para a etapa da avaliação do impacto do ciclo de vida, e devem ser levantados para cada unidade de processo dentro das fronteiras do sistema (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

Existem 4 componentes-chave para a condução da análise do inventário determinados por publicações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (SAIC, 2006):

- Desenvolvimento de um fluxograma do processo avaliado;
- Desenvolvimento de um plano para coleta de dados;
- Coleta dos dados;
- Avaliação e reporte dos resultados.

Cabe destacar que o processo de condução de uma análise de inventário é iterativo, pois conforme a coleta de dados é feita, mais se conhece sobre o sistema e o processo, o que requer uma reavaliação posterior de dos procedimentos de coleta (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).



Nessa etapa são utilizados conceitos de balanços de massa e energia para a alocação dos fluxos.

### **2.2.2.3. Avaliação de Impacto**

Os fluxos do inventário já conseguem dar uma ideia dos impactos ambientais avaliados, através das emissões quantificadas e recursos utilizados. Contudo, uma avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) é capaz de fornecer uma base significativa e comparável (CURRAN, 2016). A AICV é a fase do estudo de ACV que compreende a correlação e quantificação dos impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida de um sistema de produto (IBICT, 2015).

Nessa etapa, os fluxos elementares (recursos consumidos e poluentes emitidos) são traduzidos em impactos ambientais. Tais impactos podem ser orientados aos problemas (abordagem do ponto médio) ou aos danos (abordagem do ponto final). Essa tradução é feita através de Fatores de Caracterização (FCs), a fim de refletir valores associados às três principais Áreas de Proteção: Saúde Humana, Recursos Naturais e Ambiente Natural (ARBAULT, 2014). A caracterização é a modelagem dos dados de inventário dentro das categorias de impacto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

### **2.2.2.4. Interpretação**

A última fase do estudo de ACV é a interpretação do ciclo de vida, que visa identificar, quantificar, verificar, avaliar e comunicar eficientemente as informações dos resultados do ICV e da AICV (CURRAN, 2016). A partir da interpretação, podem ser obtidas conclusões e geradas recomendações para os tomadores de decisão, de acordo com o objetivo e escopo do estudo definidos previamente. Além disso, a etapa também pode envolver o processo iterativo de análise crítica e revisão do escopo da ACV, da natureza e da qualidade dos dados coletados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

## 2.3. Biopolímeros: alternativa sustentável aos polímeros de origens fósseis

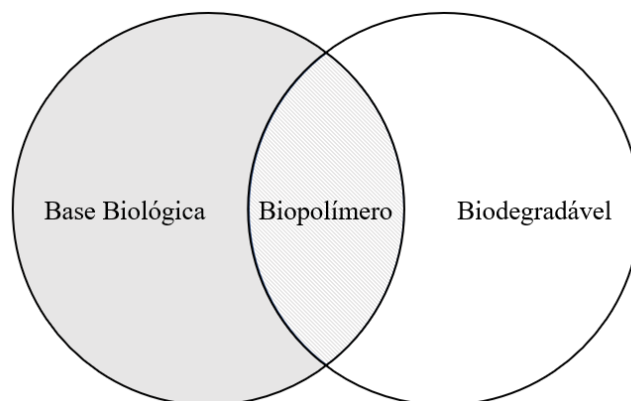
### 2.3.1. Conceitos Gerais

A IUPAC (1997) define polímero como uma macromolécula de alta massa molecular, cuja estrutura compreende essencialmente a múltipla repetição de unidades derivadas, de moléculas de baixa massa molecular relativa. Essas unidades são chamadas de monômeros, e seu número dentro de um polímero é variável, bem como sua ordem, orientação e diversidade de monômeros dentro da macromolécula (GAD, 2014).

Existem diversas formas de classificar polímeros, como por exemplo pela estrutura da cadeia polimérica (lineares, ramificados ou reticulados), pelas propriedades de resposta térmica (termoplásticos ou termofixos) e pela origem (natural ou sintética) (WANG et al, 2018). Neste trabalho será dado o enfoque na classificação quanto à origem da matéria-prima, que pode ser de origem fóssil ou renovável e a biodegradabilidade do polímero.

Os polímeros de origem fóssil são os polímeros já convencionais no mercado, geralmente derivado do petróleo. Os exemplos mais comuns desses polímeros são o polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e politereftalato de etileno (PET). A *European Bioplastics* (2020) define os biopolímeros ou bioplásticos como plásticos com origem renovável ou parcialmente renovável, biodegradável ou com ambas as características, como ilustrado na Figura 5.

**Figura 5: Definição de biopolímeros**



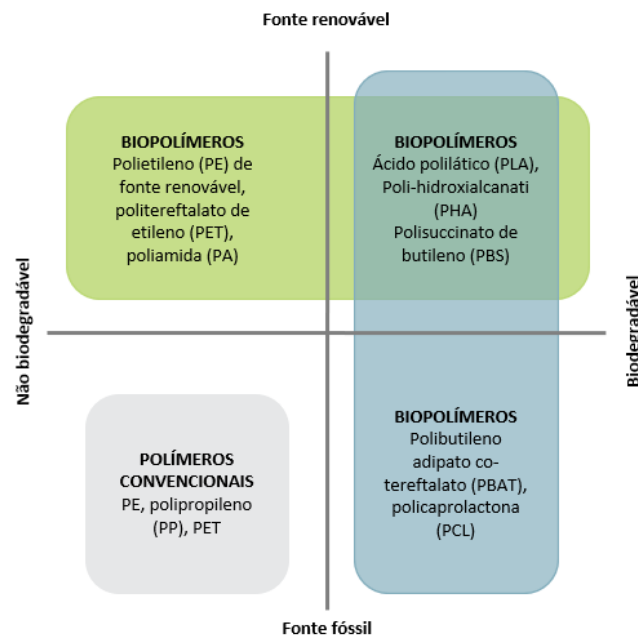
**Fonte:** European Bioplastics, 2020 (Adaptado).

Um importante fator pelo qual biopolímeros estão se tornando alternativas atrativas aos polímeros de origens fósseis é o fato de serem considerados ambientalmente favoráveis. Isso porque podem possuir emissões de gases de efeito estufa menores em sua fabricação, se comparados aos polímeros de origem petroquímica (LACA et al., 2011). Além disso, diversos biopolímeros também são biodegradáveis, o que pode dar vantagens ao final do ciclo de vida do produto; muitos polímeros de origem fóssil não são biodegradáveis e a destinação final é muitas vezes não é adequada: de acordo com estimativas publicadas pela ONU (2018), 79% dos resíduos plásticos produzidos estão dispostos em aterros sanitários, lixões ou no meio ambiente, enquanto aproximadamente 12% foram incinerados e apenas 9% reciclados.

Cabe novamente destacar que nem todo biopolímero é biodegradável, pois a biodegradabilidade não depende unicamente da matéria-prima utilizada em sua produção. Ela também é dependente da estrutura química do material e da constituição do produto final. Sendo assim, polímeros biodegradáveis podem ser sintéticos ou naturais (NAMPOOTHIRI et al, 2010).

A Figura 6 traz uma matriz que leva em conta a origem da matéria-prima (renovável ou fóssil) versus sua degradabilidade, considerando diferentes polímeros (European Bioplastics, 2020). Nela, pode-se observar a posição de destaque do ácido polilático (PLA) em relação a sua degradabilidade e sua origem renovável. Devido a esse posicionamento, ele será o objeto de estudo desse trabalho.

**Figura 6: Matriz de degradabilidade do polímero versus renovabilidade da fonte**



**Fonte:** European Bioplastics, 2020 (Adaptado).

### 2.3.2. Mercado

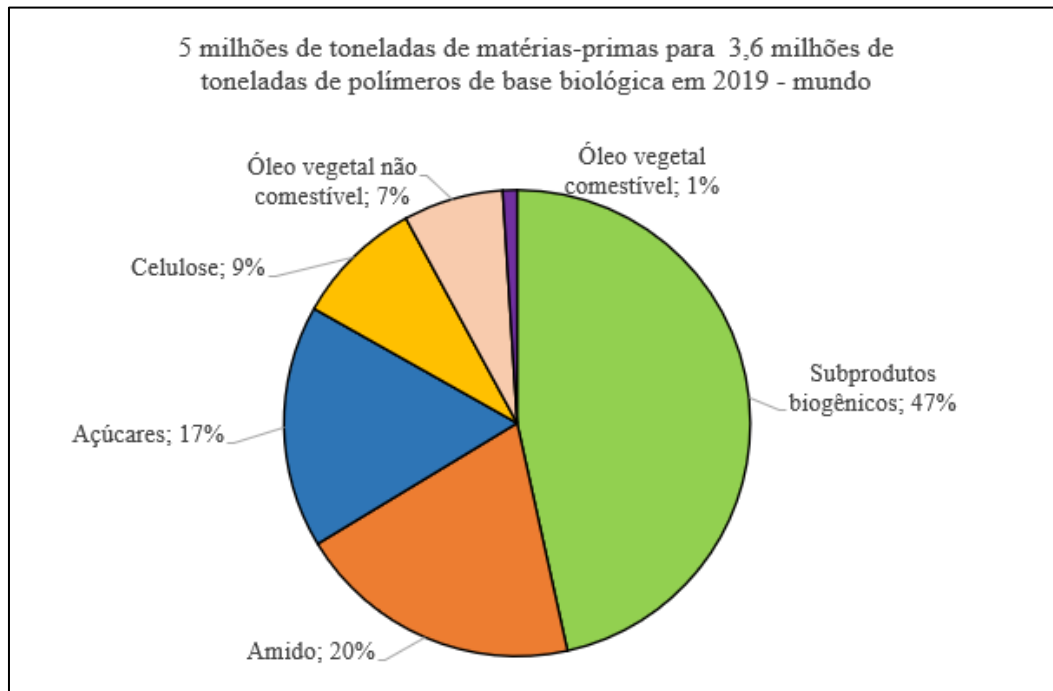
Embora haja um crescente interesse na substituição de polímeros de origens fósseis por renováveis, a representatividade dos biopolímeros no mercado mundial de plásticos ainda é pequena. O instituto alemão nova-Institut publicou em 2020 um relatório em que estima que, em 2018, foram produzidos cerca de 359 milhões de toneladas de polímeros de origem fóssil, versus uma produção de 3,5 milhões de toneladas de biopolímeros. Para 2019, a estimativa traz um aumento de 3% no volume produzido de biopolímeros.

Há ainda uma dominação do mercado pelos plásticos não degradáveis provenientes do petróleo. Contudo, existem dois fatores econômicos relevantes que podem motivar uma mudança para biopolímeros biodegradáveis no futuro: as questões ambientais e econômicas relacionadas à destinação de resíduos plásticos e o aumento dos gastos com a produção de petróleo decorrente da redução de reservas de fácil acessibilidade (NAMPOOTHIRI et al, 2010).

Outro fator que deve ser considerado quando se fala do futuro dos biopolímeros é o fornecimento de matéria-prima. Para a produção mundial estimada de 3,6 milhões de toneladas

de biopolímeros em 2019, são necessários cerca de 5 milhões de toneladas de biomassa (Figura 7). Destaca-se a representatividade de 46% da matéria-prima proveniente de subprodutos biogênicos (produzidos pela ação de organismos vivos), como o glicerol na produção do biodiesel, e de 37% de amidos e açúcares (nova-Institut, 2020).

**Figura 7: Representatividade fontes renováveis para a produção de biopolímeros**

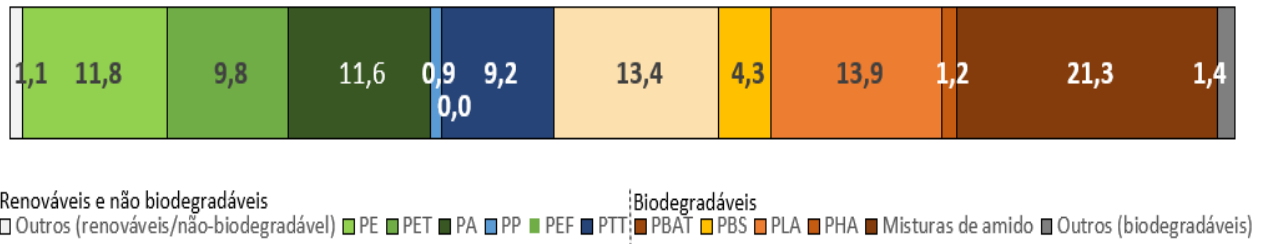


**Fonte:** nova-Institut, 2020 (Adaptado).

A *European Bioplastics* estima uma produção mundial de biopolímeros menor, de cerca de 2,1 milhões de toneladas. A Figura 8 segmenta a capacidade global de produção de acordo com o biopolímero e sua biodegradabilidade.

**Figura 8: Capacidade global de produção de bioplásticos em 2019, % (por material)**

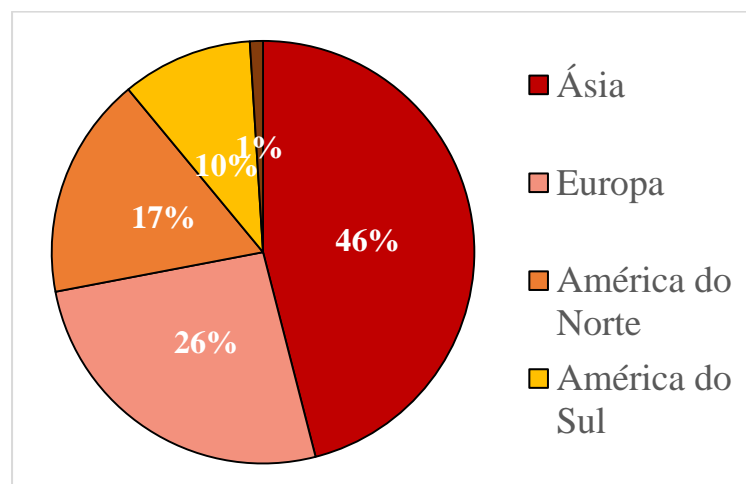
Total: 2,11 Milhões de Toneladas



**Fonte:** European Bioplastics, 2020 (Adaptado).

Ao observar a segmentação da capacidade produtiva por região apresentada na Figura 9, pode-se perceber o domínio da região asiática, com 46% da capacidade de produção mundial. No Brasil não há muitas estimativas da produção e consumo de bioplásticos no país. Entretanto, sabe-se que a Braskem possui uma capacidade instalada de 200 mil toneladas do seu “Plástico Verde”, um polietileno produzido a partir do etanol da cana-de-açúcar (BRASKEM, 2019). Tal capacidade representa cerca de 10% da capacidade global considerando os números da *European Bioplastics*.

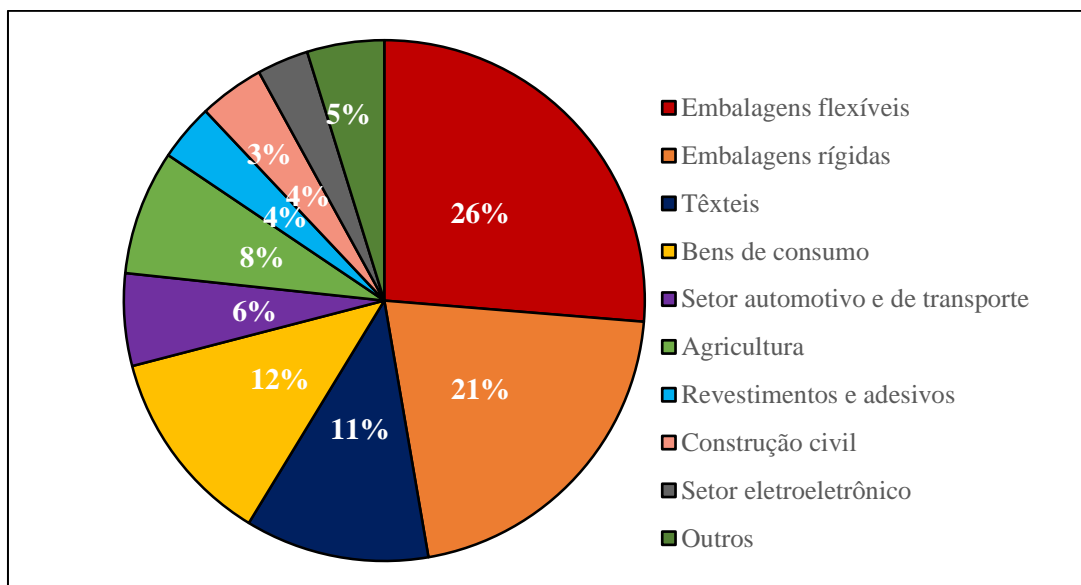
**Figura 9: Capacidade global de produção de bioplásticos em 2019 (por região, em %)**



**Fonte:** European Bioplastics, 2020 (Adaptado).

A Figura 10 traz a participação de cada segmento de mercado em 2020 entre os destinos dos biopolímeros. Percebe-se uma alta representatividade do setor de embalagens, com quase a metade do mercado.

**Figura 10: Destino dos biopolímeros por segmento de mercado (2020)**



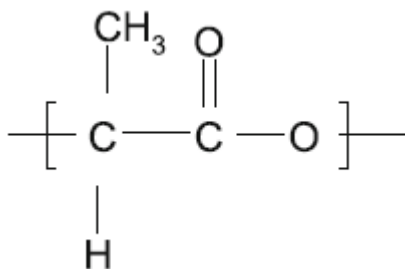
**Fonte:** European Bioplastics (Adaptado).

De acordo com dados da *European Bioplastics* (2020), o PLA destaca-se dentre os biopolímeros, pois está presente em todos os segmentos apresentados acima. No tópico a seguir será abordado com maior detalhamento as características, propriedades e o processo de produção desse biopolímero tão versátil e de grande interesse comercial.

## 2.4. Ácido Polilático

O ácido polilático (PLA), também chamado poliácido láctico ou polilactídeo é um poliéster alifático, que tem origem em matérias-primas de fontes renováveis, sendo considerado assim um biopolímero (AVINC, 2009; HAGEN, 2016). A Figura 11 traz a fórmula estrutural do PLA.

**Figura 11: Fórmula estrutural do PLA**

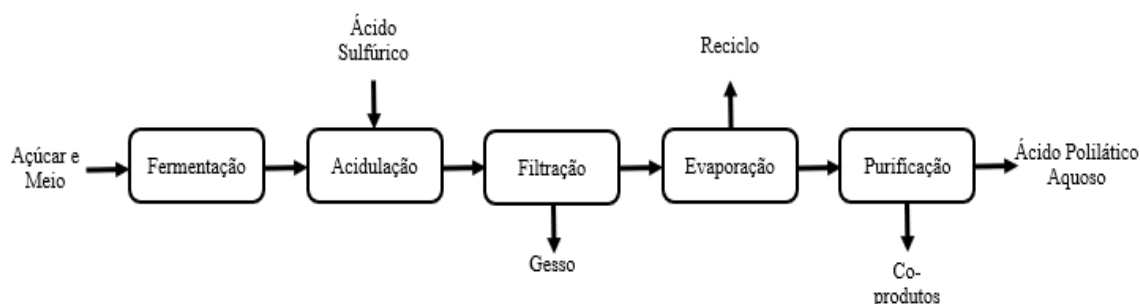


**Fonte:** Acervo pessoal.

A produção de PLA começa com a extração do amido ou do açúcar. O primeiro pode ser extraído de plantas como milho, arroz e batata-doce, e o segundo, de beterraba e melado de cana-de-açúcar, por exemplo. Quando a produção se inicia com a extração de amido, há a conversão do mesmo em açúcares fermentáveis, como a glicose, através de hidrólise enzimática. Através da fermentação, o açúcar é quebrado por microrganismos, se tornando uma espécie menor, chamada de ácido lático (AVINC et al, 2009).

A Figura 12 apresenta um fluxograma simplificado do processo de produção do ácido lático.

**Figura 12: Processo produtivo do ácido lático**



**Fonte:** VINK et al, 2014 (Adaptado).

O ácido lático, matéria-prima do PLA, é frequentemente encontrado como um subproduto ou produto intermediário do metabolismo de plantas e animais (HAGEN, 2016). Segundo Avinc et. al (2009), existem duas rotas de produção do PLA a partir do monômero de



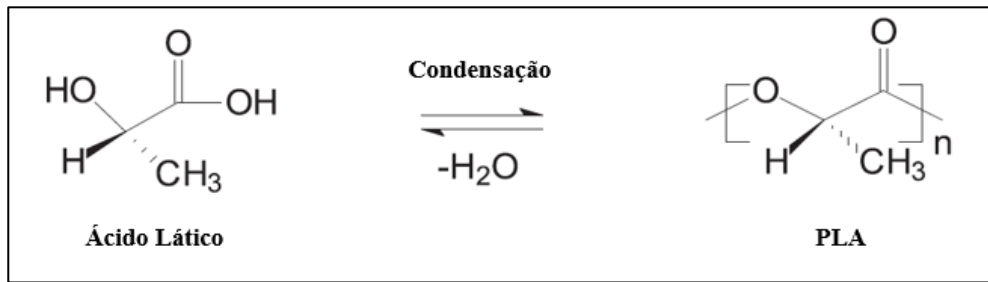
ácido láctico. A primeira delas é a policondensação direta (DPC) do ácido láctico, usando solvente para extrair a água produzida na reação, que é conduzida a alta temperatura e vácuo. A segunda é a polimerização por abertura do anel (ROP) de um dímero cíclico de ácido láctico, utilizando condições de temperatura e pressão mais brandas que a primeira.

O processo de DPC ocorre a partir da desidratação do ácido láctico em oligômeros, que em seguida são polimerizados em PLA com desidratação simultânea, a fim de evitar sua degradação pela umidade. A dificuldade de remoção da água gerada na condensação do ácido láctico ocorre devido à lentidão da difusão da umidade no fundido polimérico, que possui alta viscosidade. A água residual no PLA limita algumas de suas características, como o peso molecular, sendo ele de baixo a intermediário. Tal característica do processo justifica a sua menor utilização, se comparada à ROP (JEM ET AL, 2020; AVINC ET. AL, 2009).

O processo mais convencionalmente utilizado é o ROP. Inicialmente, oligômeros são produzidos a partir da desidratação e policondensação do ácido láctico, sob alta temperatura e vácuo. O lactídeo cíclico é obtido com a despolimerização catalítica de cadeias curtas de PLA, usando catalisadores organometálicos e baixa pressão. O lactídeo produzido precisa ser purificado, pois há ainda certa quantidade de umidade residual, além de ácido láctico e o meso-lactídeo. Para isso, são utilizados meios como destilação ou cristalização. Após a purificação, o lactídeo é polimerizado em uma reação de abertura de anel, em condições de temperatura acima do ponto de fusão do lactídeo e abaixo da temperatura de degradação do PLA, que por fim, é produzido nessa reação. Cerca de 5% do lactídeo não reage, sendo necessário sua remoção do PLA. O produto é então transformado em pellets a partir de cristalização ou solidificação, e nesse processo, há pouca ou nenhuma umidade residual na resina (JEM ET AL, 2020).

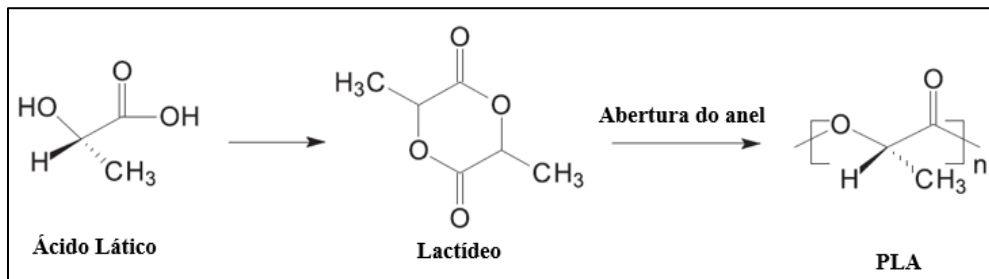
As Figuras 13 e 14 apresentam resumidamente as duas rotas de produção do PLA.

**Figura 13: Produção do PLA por policondensação direta**



**Fonte:** JEM et al, 2020 (Adaptado).

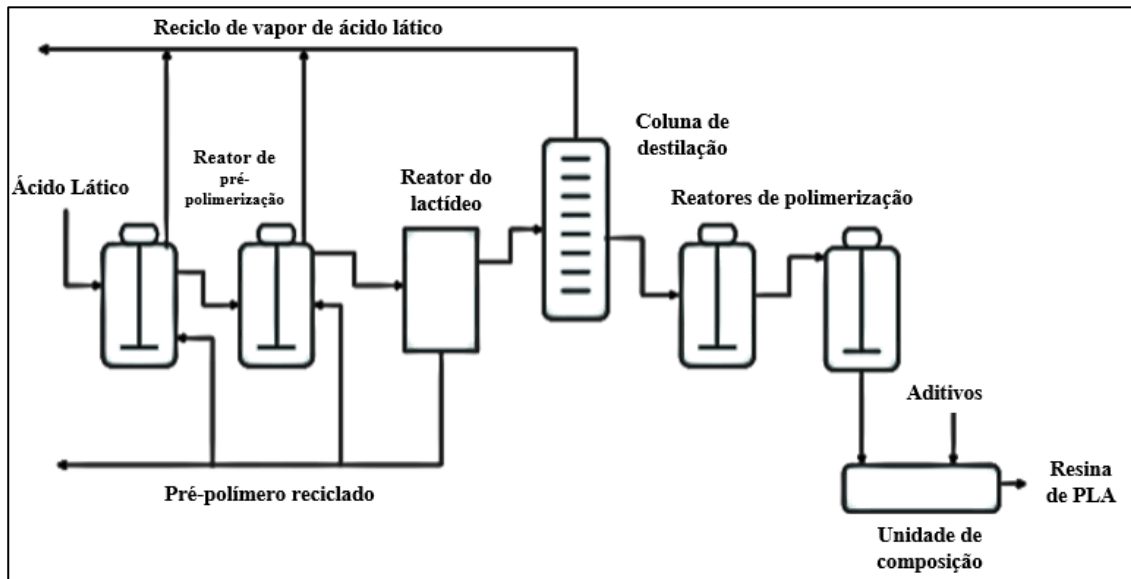
**Figura 14: Produção do PLA por polimerização por abertura de anel**



**Fonte:** JEM et al, 2020 (Adaptado).

Um dos processos de ROP mais conhecidos é o da NatureWorks (Cargill), apresentado na Figura 15.

**Figura 15: Fluxograma de um processo de ROP típico**



**Fonte:** JEM et al, 2020 (Adaptado).

Na primeira etapa do fluxograma apresentado acima, o ácido láctico é convertido continuamente em oligômeros (pré-polímeros) de PLA com baixo peso molecular. Em seguida há a conversão catalítica dos pré-polímeros nos dímeros cíclicos de lactídeo, que são despolimerizados no reator subsequente. O lactídeo é então purificado em uma coluna de destilação a vácuo, e o ácido láctico residual é removido. A próxima etapa é a polimerização de abertura de anel do lactídeo, formando o PLA, que segue para a extrusão e formação de pellets, enquanto o ácido láctico e o lactídeo residuais são removidos em uma corrente de reciclo a vácuo (JEM et al, 2020; VINK et al, 2003).

Uma das vantagens do PLA já relatadas acima é a sua biodegradabilidade, contudo, ela não é atingida em condições ambientes. Segundo o nova-Institut (2020), o PLA somente é biodegradável através de compostagem industrial e digestão anaeróbica. No primeiro caso, 90% de biodegradação do PLA é alcançada em seis meses, a uma temperatura de 58°C; no segundo, 90% de biodegradação é somente comprovadamente atingida na digestão anaeróbica termofílica, a temperaturas de 52 °C.

Além dos motivos de impacto ambiental, o PLA tem como vantagem o seu processamento, que pode ser feito em equipamentos comuns. Ou seja, empresas que convertem poliolefinas não têm a necessidade de trocar o equipamento para a conversão do PLA. Alguns

dos exemplos de processamento são: moldagem por injeção ou por sopro de folha, extrusão e termoformação (HAGEN, 2016).

## **2.5. Absorventes descartáveis: O produto e seus aspectos ambientais**

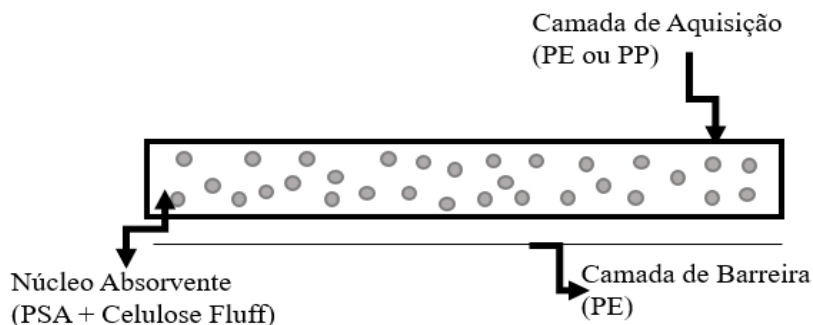
Durante milhares de anos, pessoas que menstruam (aqui não restringindo só às mulheres, mas também incluindo homens trans, por exemplo) lidam com seus ciclos menstruais de diferentes formas: já foram pedaços de tecido, cintos, copos de alumínio, toalhas, entre outros produtos, até a chegada dos modelos descartáveis (KOTLER, 2018).

O primeiro absorvente descartável foi produzido pela Johnson & Johnson em 1888; contudo, a ampla comercialização de produtos menstruais descartáveis se deu nas décadas de 1960 e 1970, com o aumento da atividade após a Segunda Guerra Mundial, aliada aos tabus culturais relativos à menstruação, como o sigilo esperado. Os produtos descartáveis trouxeram maior autonomia às pessoas que menstruam, tornando possível que fizessem atividades fora de casa (como trabalhar) de uma forma que não eram capazes de fazer anteriormente (HAIT et al, 2019; KOTLER, 2018).

O absorvente descartável padrão é constituído por três camadas: uma camada superior permeável ao fluxo menstrual e outros fluidos, de tecido não-tecido (TNT), comumente de polipropileno ou polietileno, que fica em contato com a pele; um núcleo absorvente, feito de celulose *fluff* e polímero superabsorvente (PSA) para conter o fluxo; e uma camada inferior impermeável, feita de polietileno (BARMAN et al., 2017; WOELLER et al, 2015).

A Figura 16 esquematiza as camadas constituintes de um absorvente sanitário.

**Figura 16: Camadas constituintes de um absorvente descartável padrão**



**Fonte:** Barman et al., 2017 (Adaptado).

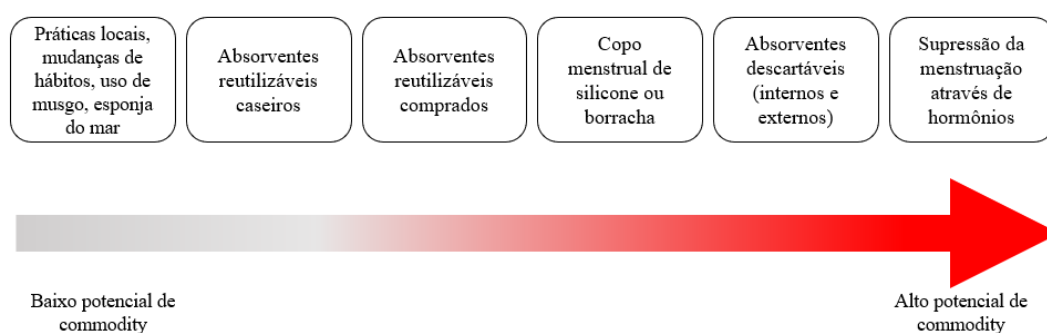
O Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos Estados Unidos (2018) estima que uma pessoa que menstrua possui ciclos menstruais durante cerca de 40 anos, menstruando durante aproximadamente 5 dias por mês, resultando em 2400 dias em uma vida. Nesse período, também é estimado que são utilizados entre 5 e 15 mil absorventes (BORUNDA, 2019). Absorventes externos, que são a escolha mais comum para conter fluxos menstruais em todo o mundo, podem ter, em alguns casos, acima de 90% de plástico em sua composição, correspondendo a cerca de quatro sacolas plásticas (COOPER, 2018). Uma estimativa publicada pela iniciativa Recicla Sampa mostra que uma pessoa no Brasil joga cerca de 3 kg de absorvente por ano. Em 40 anos, serão 120 kg de resíduos gerados por pessoa.

Por questões sanitárias e tecnológicas, o absorvente não pode ser reciclado em muitos países, o que revela uma preocupação em relação à sua disposição final. Uma publicação da organização *Zero Waste Europe* (2019) traz que os principais destinos para produtos menstruais são os aterros sanitários e a incineração. Existe ainda o problema da destinação incorreta: segundo a Comissão Europeia (2017) produtos menstruais (incluindo absorventes internos e externos, toalhas, entre outros) ocupam a 5ª posição entre os dez produtos de plástico de uso único mais encontrados nos mares da Europa.

Nos últimos anos, diversas alternativas sustentáveis aos absorventes sanitários habituais vêm sendo desenvolvidas e comercializadas na tentativa de se obter ciclos menstruais que gerem menos ou nenhum resíduo plástico. Soluções como coletores menstruais de silicone, absorventes de tecido reutilizáveis, calcinhas absorventes e até absorventes de fibras vegetais foram criadas em diferentes países, mostrando uma tendência de mudança de comportamento. Entretanto, o amplo consumo de muitas dessas soluções ainda é barrado pela escalabilidade ou

custos de produção elevados. O *framework* apresentado na Figura 17 apresenta diferentes produtos para cuidados menstruais de acordo com seu grau de comoditização. Vale destacar que as soluções com menores graus de comoditização são também aquelas com menores impactos ambientais (DAVIDSON, 2012).

**Figura 17: Grau de comoditização de produtos para cuidados menstruais**



**Fonte:** Davidson, 2012 (Adaptado).

Os absorventes descartáveis (internos e externos) possuem um potencial de mercadoria relativamente elevado, somente abaixo do consumo de hormônios que suprimem a menstruação (como pílulas anticoncepcionais). Isso porque os absorventes não exigem um consumo diário (ao contrário dos medicamentos já citados), mas sim, a cada ciclo menstrual, o que gera uma recorrência de compra e eleva seu grau de comoditização (DAVIDSON, 2012). Visto isso, se faz necessária a existência de soluções alternativas que sejam ambientalmente sustentáveis, mas que também possuam um alto potencial de mercadoria, para atrair o interesse de empresas para a produção.

Barman et al (2017) aponta o PLA como o material mais promissor para a substituição dos polímeros à base de petróleo em absorventes sanitários. Com a adição de  $\text{TiO}_2/\text{Ag}^+$ , sua taxa antibacteriana pode exceder 95%. Contudo, uma desvantagem para sua aplicação é o elevado custo para a síntese do PLA de alto peso molecular, sendo ele de cerca de 5 a 6 vezes maior que o dos polímeros convencionais.

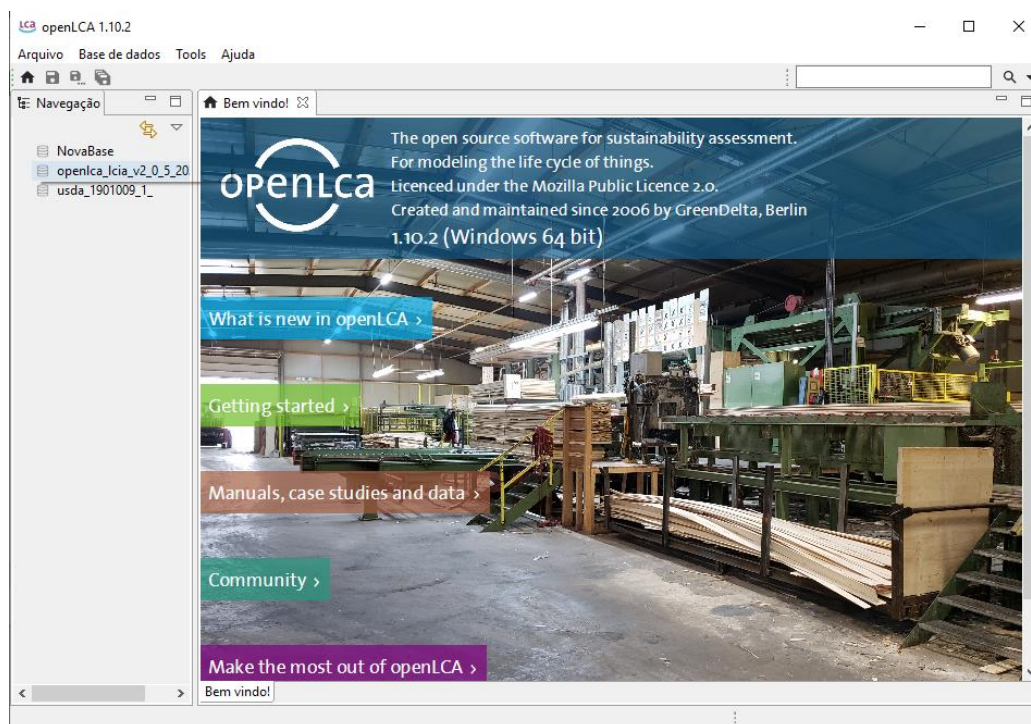
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Software

O software utilizado para a elaboração do estudo de ACV foi o openLCA, em sua versão 1.10.2 (Windows 64 bit). A ferramenta foi desenvolvida em 2006 pela consultoria de sustentabilidade alemã GreenDelta, e a principal vantagem de sua utilização é o fato de ser um software livre, sem custos para sua operação, além de ser uma ferramenta de fácil interação. Contudo, um ponto negativo é a ausência de bases de dados em seu pacote, ao contrário de alguns softwares pagos, sendo necessário adquirir essas bases de outras fontes (muitas vezes, pagas). A Figura 18 apresenta a tela inicial do software.

**Figura 18: Tela inicial do software openLCA**



**Fonte:** Acervo pessoal.

### 3.1.2. Bases de Dados

O software openLCA possibilita a inserção de diversas bases de dados já existentes e revisadas por outras fontes. Tais bases de dados podem incluir fluxos elementares, de produto ou de perdas, processos definidos, métodos de avaliação de impactos, parâmetros, entre outros dados relevantes para a elaboração do estudo de ACV. Para o *input* de dados do trabalho, foram utilizadas informações da literatura e as seguintes bases de dados:

- Ecoinvent 3.7 LCIA methods
- Agribalyse V3.0.1
- openLCA LCIA methods v.2.0.5

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Definição do Objetivo e Escopo

O objetivo do estudo de ACV é comparar os impactos ambientais de dois tipos de absorventes descartáveis: o primeiro é convencional, que possui PE em sua composição (nomeado no estudo como “absorvente de PE”); e o segundo, que é uma proposta inovadora, possui PLA em substituição do PE já citado (denominado aqui como “absorvente de PLA”). A motivação é avaliar o impacto da substituição da matéria-prima de origem fóssil pela renovável em produtos descartáveis em todo o ciclo de vida do produto. O estudo possui fins didáticos, e seu público-alvo é a comunidade da UFSCar, bem como todos os interessados no tema.

A definição do escopo foi dividida em algumas etapas:

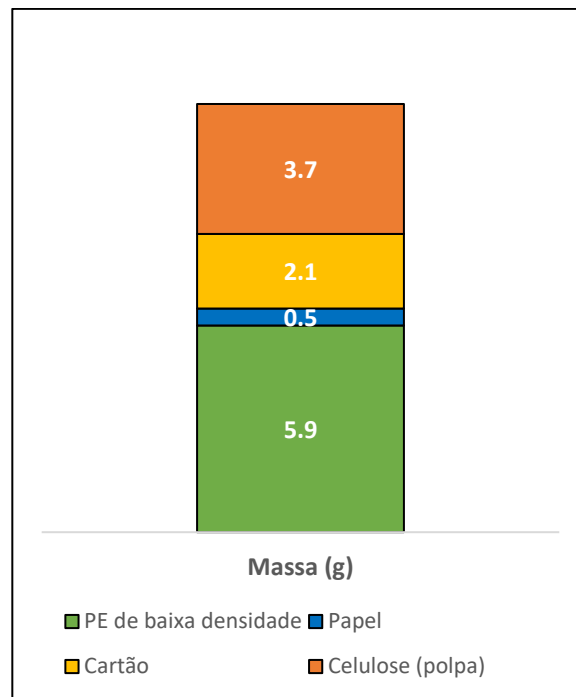
- **Função, unidade funcional, e fluxo de referência:**

Por premissa, foi considerado que ambos os absorventes (PE e PLA) são capazes de realizar a mesma função, sem nenhuma diferença em relação à qualidade do produto. Sendo assim, a função de ambos é conter o fluxo menstrual de uma pessoa. A unidade funcional é de 240 absorventes, sendo esse valor a média do que é utilizado por ano por uma pessoa (HAIT, 2019). O fluxo de referência definido é de 1 unidade de absorvente.



A Figura 19 traz a composição mássica média de um absorvente com PE com base no estudo de caso de Hait (2019). A mesma composição foi utilizada para o absorvente de PLA, substituindo apenas o polímero na matéria-prima. Nota-se que também é considerado o volume relativo à embalagem de cartão e de papel.

**Figura 19: Massa de um absorvente distribuído pelos seus componentes (valor médio de 10 amostras)**

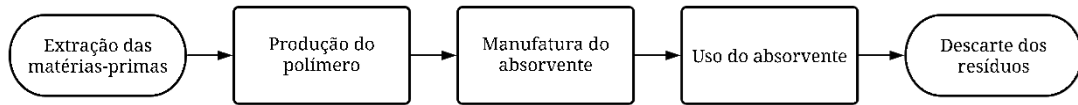


**Fonte:** Hait, 2019 (Adaptado).

- **Sistema do produto, fronteiras do sistema e procedimentos de alocação**

O sistema de produto foi definido considerando as seguintes unidades de processo simplificadas, conforme ilustrado na Figura 20:

**Figura 20: Sistema de produto do estudo**



**Fonte:** Elaborado pela autora.

A abordagem utilizada para esse estudo de ACV foi a “do berço ao túmulo”, ou seja, considerando desde a extração das matérias-primas até o fim de vida do produto. A repartição dos fluxos de entrada ou de saída seguem o procedimento de alocação físico (por massa e unidade).

- **Categorias de impacto**

As categorias de impacto selecionadas seguem a metodologia de ACV denominada CML-IA, que segue uma abordagem orientada para o problema (ponto médio). O método agrupa as categorias apresentadas na Tabela 1:

**Tabela 1: Categorias de impacto do método CML-IA e seus fatores de caracterização**

<b>Categoria</b>	<b>Fator de Caracterização</b>
Depleção abiótica	Fator de Depleção Abiótica (ADP)
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	Valor de Aquecimento Inferior (LHV)
Aquecimento global	Potencial de Aquecimento Global para o horizonte de tempo de 100 anos (PAG <sub>100</sub> )
Depleção da Camada de Ozônio	Potencial de destruição da camada de ozônio (PDO)
Toxicidade humana	Potenciais de toxicidade humana (HTP)
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce	Potenciais de Toxicidade Humana (HTP)
Ecotoxicidade aquática marinha	Potenciais de toxicidade humana (HTP)
Ecotoxicidade terrestre	Potenciais de toxicidade humana (HTP)
Oxidação fotoquímica	Oxidação fotoquímica (OF)
Acidificação	Potencial de acidificação (PA)
Eutrofização	Potencial de eutrofização (PEu)

**Fonte:** openLCA (Adaptado).

- **Requisitos de dados**

Os dados podem ser classificados como secundários, pois são adaptados de bases de dados já existentes, e calculados ou estimados com base em informações da literatura. As naturezas das correntes são de entrada e de saída, visto que há ambos os casos no estudo.

- **Suposições e limitações do estudo e requisitos de qualidade dos dados**

Devido à baixa disponibilidade de bases de dados ou informações na literatura para unidades de processo brasileiras, foram usadas bases de diferentes localidades, sendo isso uma das limitações do estudo. Sempre que possível, alguma corrente foi adaptada para dados do Brasil. Outro ponto que deve ser levado em consideração é que os dados foram retirados de bases de dados diferentes e da literatura (alguns dados se baseiam em medições). A diversidade de situações existentes para cada estudo também pode ter influência nos resultados obtidos, contudo, ambos os sistemas estudos apresentam dados comparáveis.

- **Tipo de revisão crítica e de formato de relatório**

O presente estudo não possui revisão crítica por terceira parte independente, devido ao seu caráter didático.

### **3.2.2. Análise de Inventário**

- **Desenvolvimento de um fluxograma do processo avaliado**

Foram construídos os fluxogramas dos processos no software openLCA, de acordo com o sistema de produto apresentado anteriormente na Figura 20. Foram criados cinco processos principais para cada sistema: produção do polímero (incluindo a extração de matérias-primas), manufatura do absorvente, uso do absorvente, sistema de tratamento de resíduos (para quatro resíduos diferentes: resíduos do polímero, papéis gráficos, papelcartão e resíduos sólidos municipais) e fim de vida do produto, esse último somente para agregar os resíduos tratados.

- **Desenvolvimento de um plano para coleta de dados**

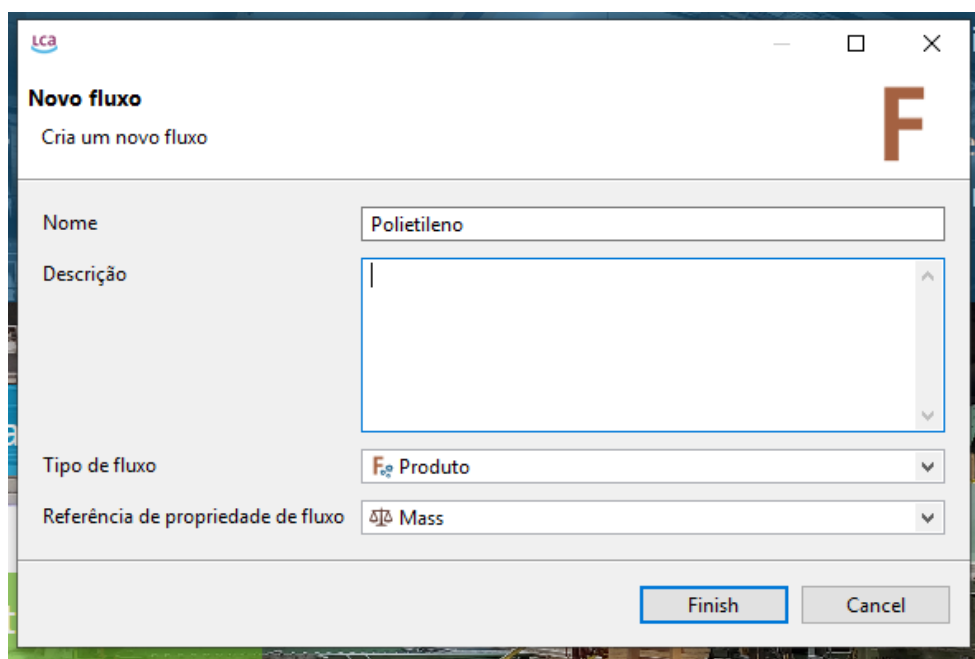
Para a coleta dos dados, foram utilizadas fontes variadas. Priorizou-se inicialmente dados já disponíveis em bases terceiras e revisadas; na ausência destas, coletou-se dados

disponíveis na literatura. Por fim, caso ambos os casos anteriores não fossem possíveis, a última opção foi o uso de adaptações, cálculos e estimativas para se obter os dados necessários.

- **Input de dados**

A simulação no software iniciou-se com a criação das unidades de processo para o sistema de produto do absorvente de PE. Para cada unidade de processo, é necessário ter um fluxo de produto associado, então tais fluxos também foram criados. A Figura 21 apresenta um exemplo da tela de criação de fluxo de produto (no caso, 1 kg de PE como saída do processo de produção do polímero).

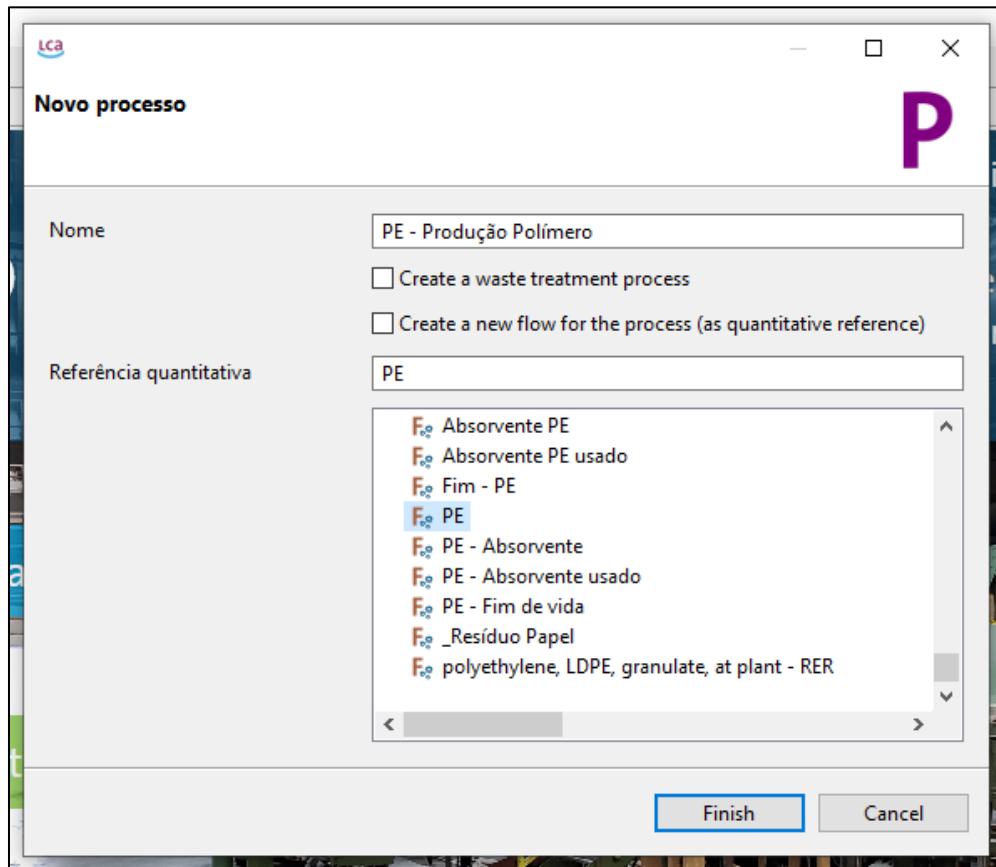
**Figura 21: Criação do fluxo de PE na saída do processo de produção do polímero no openLCA**



**Fonte:** Acervo pessoal

Em seguida, foi necessária a criação do processo de produção de PE, fazendo referência ao fluxo de produto criado anteriormente. A Figura 22 apresenta a tela do software de criação do processo.

**Figura 22: Criação do processo de produção de PE no openLCA**



**Fonte:** Acervo pessoal.

Como já havia uma base de dados existente para o processo de produção de 1 kg de PE no Ecoinvent, essa foi utilizada para o projeto, não sendo necessários outros cálculos de balanços de massa ou energia. A Figura 23 apresenta a tela de inserção de dados de entrada e saída do processo no openLCA (já preenchida com os dados do Ecoinvent).

**Figura 23: Entradas e saídas do processo de produção do PE**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / r...	Incerteza	Avoided ...	Provedor ...	Entrada d...	Descrição
Aluminium	Resource/in ground	7.98416E-6	kg		none				
Anhydrite	Resource/in ground	6.01034E-6	kg		none				
Argon-40	Resource/in air	1.30776E-7	kg		none				
Barite	Resource/in ground	4.19051E-6	kg		none				
Basalt	Resource/in ground	4.05318E-7	kg		none				
Borax	Resource/in ground	9.25164E-10	kg		none				
Bromine	Resource/in water	1.04667E-11	kg		none				
Cadmium	Resource/in ground	8.82200E-9	kg		none				
Calcite	Resource/in ground	0.00812	kg		none				

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / r...	Incerteza	Produto d...	Provedor ...	Entrada d...	Descrição
1,3-Dioxolan-2-one	Emission to water/uns...	1.09724E-11	kg		none				
1,4-Butanediol	Emission to air/high p...	1.55073E-14	kg		none				
1,4-Butanediol	Emission to water/river	3.56589E-14	kg		none				
1-Butanol	Emission to air/high p...	5.54562E-14	kg		none				
1-Butanol	Emission to water/river	5.49680E-12	kg		none				
1-Pentanol	Emission to air/high p...	5.95507E-16	kg		none				
1-Pentanol	Emission to water/river	1.42922E-15	kg		none				
1-Pentene	Emission to air/high p...	2.75580E-14	kg		none				
1-Pentene	Emission to water/river	1.08004E-15	kg		none				
1-Propanol	Emission to air/hinh n...	7.01417E-14	kg		none				

**Fonte:** Acervo pessoal.

Para o processo de produção do absorvente, foi feita uma adaptação dos dados de entrada e saída publicados por Hait et al (2019). A Tabela 2 apresenta os dados de entrada para a produção de 1 unidade de absorvente de PE.

**Tabela 2: Dados de entrada para a produção de 1 unidade de absorvente de PE**

Entrada	Valor	Unidade
Polietileno de Baixa Densidade	$5,9 \times 10^{-3}$	kg
Celulose	$3,7 \times 10^{-3}$	kg
Papel	$4,8 \times 10^{-4}$	kg
Cartão	$2,1 \times 10^{-3}$	kg
Energia térmica (gás natural)	$3,7 \times 10^{-3}$	MJ
Energia elétrica (grid)	$2,3 \times 10^{-2}$	MJ

**Fonte:** Hait, 2019 (adaptado)

Foi criado um fluxo de produto de 1 unidade de absorvente, associado ao processo de produção apresentado na Figura 24. Observa-se que foi possível relacionar algumas das entradas com processos já existentes na base de dados do Ecoinvent, bem como o processo de produção do PE criado na etapa anterior.

**Figura 24: Entradas e saídas do processo de produção do absorvente de PE**

**Entradas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	C...	Incerteza	A..	Provedor padrão	Entrada ...	Descriç...
F <sub>2</sub> Corrugated board box (GL...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00212	kg		lognorm...				
F <sub>2</sub> Electricity, high voltage (B...	Ecoinvent cut-off S ...	0.02280	MJ		lognorm...				
F <sub>2</sub> Heat, district or industrial, ...	Ecoinvent cut-off S ...	0.03720	MJ		lognorm...				
F <sub>2</sub> Paper, woodfree, coated {...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00047	kg		lognorm...		P market for paper, woodf...		
F <sub>2</sub> PE		0.00586	kg		lognorm...		P PE - Produção Polímero		
F <sub>2</sub> wood pulp; southern blea...	Agriculture, forestry ...	0.00368	kg		lognorm...		P wood pulp; southern ble...		

**Saídas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Cust...	Incerteza	Produto descartado	Provedor...	Entrada ...	Descri
F <sub>2</sub> PE - Absorvente		1.00000	Item...		lognorm...				

**Fonte:** Acervo pessoal.

Em seguida, criou-se o fluxo de 1 unidade de absorvente usado. Para a unidade de processo de uso do absorvente de PE, foram adicionadas como entradas o absorvente produzido anteriormente e o combustível consumido para transporte do produto até o consumidor final. A Figura 25 apresenta a tela de inserção de dados de entrada e saída para o processo de uso do absorvente de PE.

**Figura 25: Entradas e saídas do processo de uso do absorvente de PE**

The screenshot displays a software interface with the following data:

**Entradas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Avoided ...	Provedor padrão	Entrada ...
Diesel, burned in lorry, EU...	Oil/Transformation	1.64000E-5	kg		lognorm...		operation, lorry 16-32t, E...	
PE - Absorvente		1.00000	Item(s)		lognorm...		PE - Produção Absorvente	

**Saídas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Produto ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
PE - Absorvente usado		1.00000	Item...		lognorm...				

**Fonte:** Acervo pessoal.

Para o tratamento dos resíduos pós uso do produto, foi considerado que todos os materiais que constituem o absorvente foram destinados a um aterro sanitário. Sendo assim, foram criados quatro processos de tratamento para cada um dos materiais (PE, papelcartão, papel revestido e celulose), todos com bases de dados do Ecoinvent. Foi feita uma aproximação entre os processos de tratamento de papel revestido e papéis gráficos, e entre celulose e resíduos sólidos municipais, devido à ausência de informações relativas aos processos de tratamento de resíduos de ambos os materiais. As Figuras 26, 27, 28 e 29 apresentam os processos de tratamento de cada um dos resíduos descritos.



**Figura 26: Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos de PE em aterro sanitário**

**Entradas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Avoided ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
Aluminium	Resource/in ground	1.34308E-6	kg		none				
Anhydrite	Resource/in ground	1.06368E-9	kg		none				
Argon-40	Resource/in air	5.33621E-7	kg		none				
Barite	Resource/in ground	1.69725E-5	kg		none				
Basalt	Resource/in ground	1.53311E-6	kg		none				
Borax	Resource/in ground	8.92868E-10	kg		none				
Bromine	Resource/in water	2.34652E-11	kg		none				
Cadmium	Resource/in ground	1.55087E-8	kg		none				
Calcite	Resource/in ground	0.00062	kg		none				

**Saídas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Produto ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
Waste polyethylene (CH)...	Ecoinvent cut-off S...	1.00000	kg		none				
1,4-Butanediol	Emission to air/high...	7.63525E-15	kg		none				
1-Butanol	Emission to air/high...	2.65238E-14	kg		none				
1-Pentanol	Emission to air/high...	1.38474E-15	kg		none				
1-Pentene	Emission to air/high...	2.54389E-14	kg		none				
1-Propanol	Emission to air/high...	2.75832E-13	kg		none				
2-Aminopropanol	Emission to air/high...	2.54290E-16	kg		none				
2-Butene, 2-methyl-	Emission to air/high...	2.15342E-18	kg		none				
2-Methyl-1-propanol	Emission to air/high...	3.08372E-15	kg		none				

Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 27: Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos de papelcartão em aterro sanitário**

**Entradas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Avoided ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
Aluminium	Resource/in ground	1.89211E-6	kg		none				
Anhydrite	Resource/in ground	1.06860E-9	kg		none				
Argon-40	Resource/in air	6.06687E-7	kg		none				
Barite	Resource/in ground	1.71389E-5	kg		none				
Basalt	Resource/in ground	1.57180E-6	kg		none				
Borax	Resource/in ground	7.50706E-9	kg		none				
Bromine	Resource/in water	2.74818E-11	kg		none				
Cadmium	Resource/in ground	1.99203E-8	kg		none				
Calcite	Resource/in ground	0.00068	kg		none				
Carbon dioxide in air	Resource/in air	0.00032	kg		none				

**Saídas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Produto ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
Waste paperboard (CH) ...	Ecoinvent cut-off S...	1.00000	kg		none				
1,4-Butanediol	Emission to air/high...	1.71079E-14	kg		none				
1-Butanol	Emission to air/high...	3.71812E-14	kg		none				
1-Pentanol	Emission to air/high...	1.59666E-15	kg		none				
1-Pentene	Emission to air/high...	3.81903E-14	kg		none				
1-Propanol	Emission to air/high...	7.44853E-12	kg		none				
2-Aminopropanol	Emission to air/high...	3.44695E-16	kg		none				
2-Butene, 2-methyl-	Emission to air/high...	2.50586E-18	kg		none				
2-Methyl-1-propanol	Emission to air/high...	3.57950E-15	kg		none				

Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 28: Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos de papéis gráficos em aterro sanitário**

**Entradas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Avoided ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
Aluminium	Resource/in ground	2.23335E-6	kg		none				
Anhydrite	Resource/in ground	1.07128E-9	kg		none				
Argon-40	Resource/in air	6.21658E-7	kg		none				
Barite	Resource/in ground	1.72529E-5	kg		none				
Basalt	Resource/in ground	1.58915E-6	kg		none				
Borax	Resource/in ground	8.53172E-9	kg		none				
Bromine	Resource/in water	2.85083E-11	kg		none				
Cadmium	Resource/in ground	2.07923E-8	kg		none				
Calrite	Resource/in ground	0.00075	kg		none				

**Saídas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Produto ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
1,3-Dioxolan-2-one	Emission to water/u...	6.09718E-11	kg		none				
1,4-Butanediol	Emission to air/high...	1.91900E-14	kg		none				
1,4-Butanediol	Emission to water/ri...	4.41361E-14	kg		none				
1-Butanol	Emission to air/high...	3.95439E-14	kg		none				
1-Butanol	Emission to water/ri...	4.41709E-11	kg		none				
1-Pentanol	Emission to air/high...	1.64712E-15	kg		none				
1-Pentanol	Emission to water/ri...	3.95311E-15	kg		none				
1-Pentene	Emission to air/high...	4.28715E-14	kg		none				
1-Pentene	Emission to water/ri...	2.98720E-15	kg		none				

Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 29: Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos sólidos municipais em aterro sanitário**

**Entradas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Avoided ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
Aluminium	Resource/in ground	3.87203E-6	kg		none				
Anhydrite	Resource/in ground	1.08127E-9	kg		none				
Argon-40	Resource/in air	6.56344E-7	kg		none				
Barite	Resource/in ground	2.05080E-5	kg		none				
Basalt	Resource/in ground	1.75506E-6	kg		none				
Borax	Resource/in ground	8.64809E-9	kg		none				
Bromine	Resource/in water	3.54937E-11	kg		none				
Cadmium	Resource/in ground	2.45848E-8	kg		none				
Calrite	Resource/in ground	0.00065	kg		none				

**Saídas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Produto ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
1,3-Dioxolan-2-one	Emission to water/u...	7.17373E-11	kg		none				
1,4-Butanediol	Emission to air/high...	1.53583E-14	kg		none				
1,4-Butanediol	Emission to water/ri...	3.53212E-14	kg		none				
1-Butanol	Emission to air/high...	2.72885E-13	kg		none				
1-Butanol	Emission to water/ri...	4.64795E-11	kg		none				
1-Pentanol	Emission to air/high...	2.02933E-15	kg		none				
1-Pentanol	Emission to water/ri...	4.87042E-15	kg		none				
1-Pentene	Emission to air/high...	3.57365E-14	kg		none				
1-Pentene	Emission to water/ri...	3.69048E-15	kg		none				

Fonte: Acervo pessoal.

Para o fechamento do ciclo de vida, foi criado um fluxo de produto e um novo processo (Figura 30), que possui como entradas os fluxos de resíduos tratados anteriormente. A massa de cada um dos resíduos foi definida como a mesma de entrada do material antes do uso do absorvente.

**Figura 30: Fechamento do ciclo de vida do absorvente de PE**

The screenshot displays a software window titled 'PE - Fim de vida'. It contains two tables: 'Entradas' and 'Saídas'.

**Entradas Table:**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Avoided ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
Municipal solid waste (Ro...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00368	kg		lognorm...		P PE - ...		
Waste graphical paper (C...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00047	kg		lognorm...		P PE - ...		
Waste paperboard (CH) tr...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00212	kg		lognorm...		P PE - ...		
Waste polyethylene (CH) ...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00587	kg		lognorm...		P PE - ...		

**Saídas Table:**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Produto ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
PE - Fim de vida		1.00000	Item...		none				

**Fonte:** Acervo pessoal.

Para o ciclo de vida do absorvente de PLA, foram seguidos passos semelhantes. Para a produção do biopolímero, foi criado um fluxo de produto de 1 kg de PLA. O processo produtivo foi adaptado com base em dados do Ecoinvent. As entradas e saídas do processo estão apresentadas na Figura 31.

**Figura 31: Entradas e saídas do processo de produção do PLA**

The screenshot displays a software interface for managing the input and output flows of the PLA production process. The interface is titled "Entradas/Saídas: PLA - Produção Polímero" and is divided into two main sections: "Entradas" (Inputs) and "Saídas" (Outputs).

**Entradas (Inputs):**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / r...	Incerteza	Avoided ...	Provedor padr...	Entrada d...	Descrição
Chemical factory, organics {...	Ecoinvent cut-off S co...	4.00000E-10	Item(s)		lognorma...				
Electricity, low voltage (BR) ...	Ecoinvent cut-off S co...	1.82800	MJ		lognorma...				
Heat, district or industrial, na...	Ecoinvent cut-off S co...	17.53700	MJ		lognorma...				
Heat, district or industrial, ot...	Ecoinvent cut-off S co...	0.15105	MJ		lognorma...				
Maize grain, at farm (WFLDB ...	Cereals/Transformation	1.50700	kg		lognorma...		Maize grai...		
Naphtha (RoW) market for   ...	Ecoinvent cut-off S co...	0.00700	kg		lognorma...		market for...		
Natural gas, high pressure (R...	Ecoinvent cut-off S co...	0.00360	m3		lognorma...		market for...		
Water, unspecified natural or...	Resource/in ground	0.00320	m3		lognorma...				

**Saídas (Outputs):**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / r...	Incerteza	Produto d...	Provedor ...	Entrada d...	Descrição
[PLA]		1.00000	kg		none				
Hazardous waste, for inciner...	Ecoinvent cut-off S co...	0.00640	kg		lognorma...	<input type="checkbox"/>			
NMVOC, non-methane volat...	Emission to air/high p...	0.00252	kg		lognorma...				
Waste plastic, mixture (RoW)...	Ecoinvent cut-off S co...	0.00100	kg		lognorma...	<input type="checkbox"/>			
Wastewater from maize starc...	Ecoinvent cut-off S co...	0.00320	m3		lognorma...	<input type="checkbox"/>			

**Fonte:** Acervo pessoal.

Nota-se que foi possível relacionar o fluxo do grão de milho de entrada no processo com o seu processo de produção, bem como os fluxos de nafta e gás natural.

Para as etapas de produção e uso do absorvente, foram criados fluxos e processos similares aos criados para o absorvente de PE, exceto pela substituição do polímero na matéria-prima do primeiro (o que impacta na saída de produto). As etapas descritas podem ser observadas nas Figuras 32 e 33.

**Figura 32: Entradas e saídas do processo de produção do absorvente de PLA**

**Entradas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / re...	Incerteza	Avoided w...	Provedor ...	Entrada de...
F <sub>2</sub> [PLA]		0.00586	kg		lognormal...		P PLA - ...	
F <sub>2</sub> Corrugated board box (GLO) market for corrugat...	Ecoinvent cut-off S copy	0.00212	kg		lognormal...			
F <sub>2</sub> Electricity, high voltage (BR) electricity producti...	Ecoinvent cut-off S copy	0.02280	MJ		lognormal...			
F <sub>2</sub> Heat, district or industrial, natural gas (RoW) ma...	Ecoinvent cut-off S copy	0.03720	MJ		lognormal...			
F <sub>2</sub> Paper, woodfree, coated (RER) market for   Cut-...	Ecoinvent cut-off S copy	0.00047	kg		lognormal...		P market...	
F <sub>2</sub> wood pulp; southern bleached softwood kraft, el...	Agriculture, forestry an...	0.00368	kg		lognormal...		P wood ...	

**Saídas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / re...	Incerteza	Produto d...	Provedor ...	Entrada de...	Descrição
F <sub>2</sub> PLA - Absorvente		1.00000	Item(s)		lognorma...				

Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 33: Entradas e saídas do processo de uso do absorvente de PLA**

**Entradas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / re...	Incerteza	Avoided w...	Provedor ...	Entrada de...	Descrição
F <sub>2</sub> Diesel, burned in lorry, EURO5 ...	Oil/Transformation	1.64000E-5	kg		lognormal...		P operati...		
F <sub>2</sub> PLA - Absorvente		1.00000	Item(s)		lognormal...		P PLA - ...		

**Saídas**

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / re...	Incerteza	Produto d...	Provedor ...	Entrada de...	Descrição
F <sub>2</sub> PLA - Absorvente usado		1.00000	Item(s)		lognorma...				

Fonte: Acervo pessoal.

Para o tratamento dos resíduos, foram feitos processos iguais aos do absorvente de PE para três de seus quatro materiais (papel gráfico, cartão e celulose). Para o processo de tratamento dos resíduos de PLA, foi utilizado a digestão anaeróbia. Os dados do processo foram adaptados da base Ecoinvent e estão expressos na Figura 34.

**Figura 34: Entradas e saídas do processo de tratamento dos resíduos de PLA**

Entradas									
Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / r...	Incerteza	Avoided ...	Provedor ...	Entrada d...	Descrição
F <sub>2</sub> Anaerobic digestion plant, a...	Ecoinvent cut-off S co...	3.3631184288...	Item(s)		none				Referen...
F <sub>2</sub> Electricity, low voltage (FR)] ...	Ecoinvent cut-off S co...	15.00000	kWh		none				Calculat...
F <sub>2</sub> F. Digestate, from anaerobic ...	Fertilisers (organic)/Dt...	1000+10-120...	kg		none		P Digest...		
F <sub>2</sub> Heat, central or small-scale, ...	Ecoinvent cut-off S co...	1.89*120	MJ		none				Calculat...
F <sub>2</sub> PLA - Absorvente usado		1000.00000	kg		none		P PLA - ...		
F <sub>2</sub> Tap water (Europe without S...	Ecoinvent cut-off S co...	10.00000	kg		none				Water
F <sub>2</sub> Waste plastic, mixture {CH}] t...	Ecoinvent cut-off S co...	153.00000	kg		none				residues...

Saídas									
Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / r...	Incerteza	Produto d...	Provedor ...	Entrada d...	Descrição
F <sub>2</sub> Ammonia	Emission to air/low po...	0.00000	kg		none				Assume...
F <sub>2</sub> Biogas, from anaerobic diges...	Fertilisers (organic)/Dt...	120.00000	m3		none	<input type="checkbox"/>			Econo...
F <sub>2</sub> Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air/low po...	1.67*0.91	kg		none				1.67 kg ...
F <sub>2</sub> Dinitrogen monoxide	Emission to air/low po...	0.00000	kg		none				Assume...
F <sub>2</sub> F. Digestate, from anaerobi...	Fertilisers (organic)/...	1000+10-12...	kg		none				
F <sub>2</sub> Hydrogen sulfide	Emission to air/low po...	0.00000	kg		none				Assume...
F <sub>2</sub> Methane, non-fossil	Emission to air/low po...	0.1*0.508*179...	kg		none				10% (1 - ...

Fonte: Acervo pessoal.

A última fase para o absorvente de PLA é o fechamento do ciclo. Aqui a única mudança em relação ao absorvente de PE foi a premissa de entrada de  $5,9 \times 10^{-4}$  kg de resíduos da digestão anaeróbia ao invés do PE, representando 90% de degradação do PLA original, como pode ser visto na Figura 35.

**Figura 35: Fechamento do ciclo de vida do absorvente de PLA**

The screenshot shows a software window titled 'Bem vindo!' with a search bar containing 'digestate'. The main content area is titled 'P Entradas/Saídas: PLA - Fim de Vida'. It features two expandable sections: 'Entradas' and 'Saídas'. Each section has a table with columns for Fluxo, Categoria, Quantidade, Unidade, Custos / ..., Incerteza, Avoidead..., Provedor..., Entrada..., and Descrição... The 'Entradas' table has 4 rows of data, and the 'Saídas' table has 1 row of data.

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Avoidead ...	Provedo...	Entrada ...	Descriç...
F <sub>2</sub> F. Digestate, from anaero...	Fertilisers (organic)/...	0.00059	kg		none		P PLA ...		
F <sub>2</sub> Municipal solid waste (Ro...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00368	kg		lognor...		P PLA ...		
F <sub>2</sub> Waste graphical paper (C...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00047	kg		lognor...		P PLA ...		
F <sub>2</sub> Waste paperboard (CH)   t...	Ecoinvent cut-off S ...	0.00212	kg		lognor...		P PLA ...		

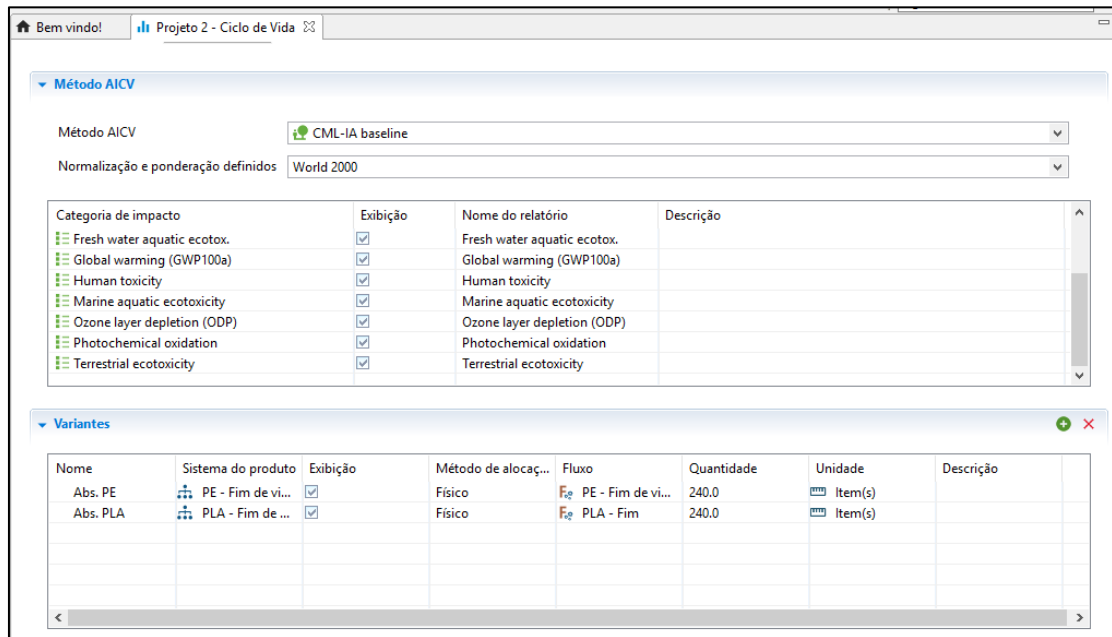
  

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / ...	Incerteza	Produto ...	Provedor...	Entrada ...	Descriç...
F <sub>2</sub> PLA - Fim		1.00000	Item...		none				

**Fonte:** Acervo pessoal.

A última etapa da simulação foi a modelagem da comparação do ciclo de vida dos 240 absorventes de ambos os materiais. Foi feita a escolha do método de impacto CML-IA, que compreende as categorias de impacto de depleção abiótica de minerais, depleção abiótica de combustíveis fósseis, acidificação, eutrofização, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade marinha e oxidação fotoquímica. A Figura 36 apresenta a tela de configuração do projeto.

**Figura 36: Modelagem da AICV**



**Fonte:** Acervo pessoal.

Com o projeto configurado, foi feito o cálculo do inventário completo e dos impactos pelo software. Nas próximas seções os resultados desses cálculos serão apresentados.

- **Avaliação e reporte dos resultados**

Com os ciclos de vida dos dois tipos de absorventes criados no software, foi feita a simulação para obtenção do inventário completo e da avaliação de impactos para as 240 unidades de absorvente. Os principais resultados do inventário e a avaliação dos impactos do ciclo de vida dos sistemas de produto estão presentes na próxima seção.

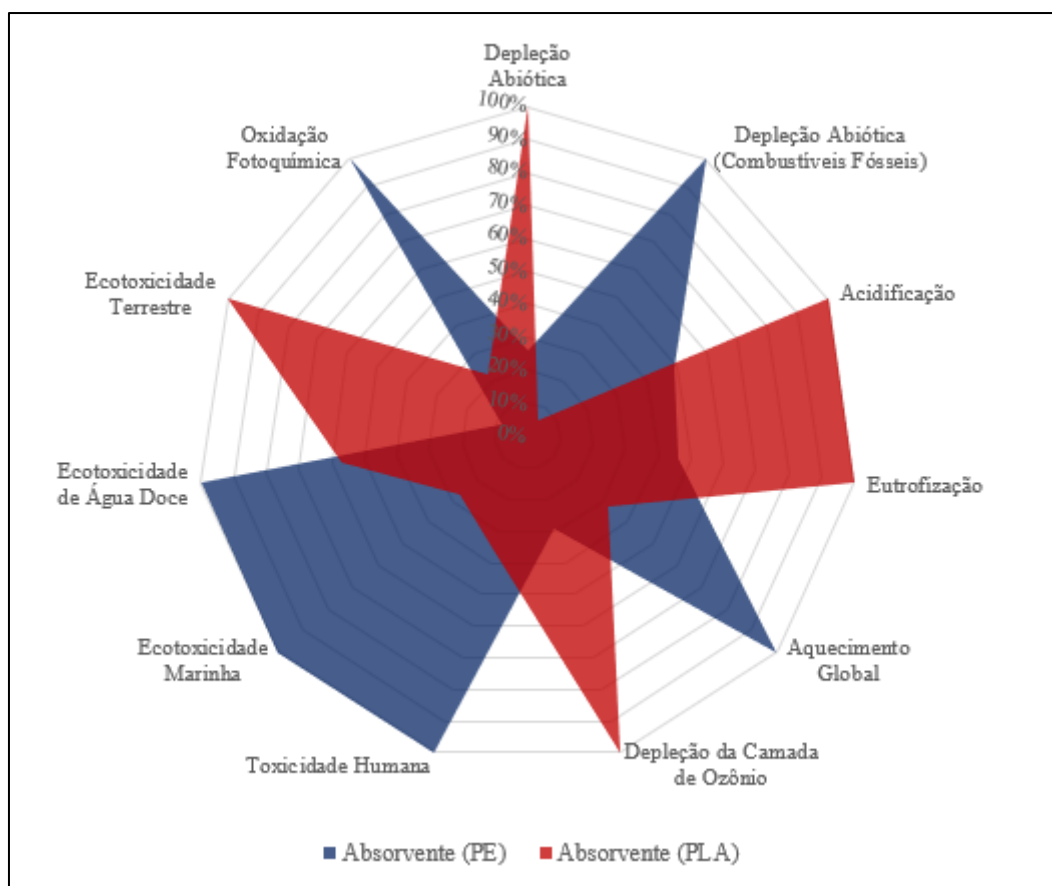


## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Avaliação de Impactos

A Figura 37 apresenta o resumo dos resultados comparativos relativos entre os impactos do ciclo de vida do absorvente com PE e o absorvente com PLA. O uso do gráfico de radar para a representação dessa comparação é comum em estudos de ACV, em que o impacto do sistema de produto com maior valor é representado como 100%, e o impacto do outro sistema é dado relativamente ao primeiro.

**Figura 37: Resultados comparativos relativos da Avaliação do Ciclo de Vida para os sistemas do estudo**



Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar os resultados por categoria de impacto, apresentados na Tabela 3 de forma resumida.

**Tabela 3: Resultados de impactos dos ciclos de vida dos absorventes de PE e de PLA**

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Absorvente (PE)</b>	<b>Absorvente (PLA)</b>
Depleção Abiótica	kgSbeq/kg de minerais extraídos	$2,3 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
Depleção Abiótica (combustíveis fósseis)	MJ/kg de combustível fóssil consumido	374,9	21,2
Acidificação	kgSO <sub>2</sub> eq/kg de emissão	$4,6 \times 10^{-2}$	$9,3 \times 10^{-2}$
Eutrofização	kgPO <sub>4</sub> eq/kg de emissão	$1,6 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$
Ecotox. de água doce	kgp-DCBeq/kg de emissão	11,0	6,3
Aquecimento Global (100 anos)	kgCO <sub>2</sub> eq/kg de emissão	14,2	4,6
Toxicidade Humana	kgp-DCBeq/kg de emissão	4,4	1,6
Ecotox. Aquática Marinha	kgp-DCBeq/kg de emissão	13115,1	3596,3
Depleção da Camada de Ozônio	kgCFC-11eq/kg de emissão	$5,6 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-7}$
Oxidação Fotoquímica	kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/kg de emissão	$2,8 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidade terrestre	kgp-DCBeq/kg de emissão	$5,7 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-2}$

**Fonte:** Elaborado pela autora.

As Tabelas 4 e 5 apresentam para os absorventes de PLA e de PE os dois principais processos que impactam em cada categoria, o resultado do impacto e os principais materiais emitidos ou extraídos nos processos citados.

**Tabela 4: Processos de maior impacto em cada categoria (Absorvente PLA)**

<b>Fator de Caracterização</b>	<b>Principais processos envolvidos</b>	<b>Resultado</b>	<b>Principais recursos extraídos ou emissões liberadas</b>
Depleção abiótica (kgSbeq/kg de minerais extraídos)	Produção de TSP	$3,1 \times 10^{-6}$	Cádmio, chumbo e prata
	Produção de ureia	$2,8 \times 10^{-6}$	Cádmio, ouro e chumbo
Depleção abiótica (fósseis) (MJ/kg de combustível fóssil consumido)	Produção de ureia	9,9	Gás natural, óleo cru e carvão
	Produção do papel	4,6	Gás natural, óleo cru e carvão
Acidificação (kgSO <sub>2</sub> eq/kg de emissão)	Produção do milho	$8,5 \times 10^{-2}$	Amônia
	Produção de ureia	$2,8 \times 10^{-3}$	Amônia, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio
Eutrofização (kgPO <sub>4</sub> eq/kg de emissão)	Produção do milho	$2,8 \times 10^{-2}$	Amônia, nitrato e fosfato
	Tratamento - resíduos sólidos municipais	$2,3 \times 10^{-3}$	DQO, nitrato e amônio
Ecotox. de água doce (kgp-DCBeq/kg de emissão)	Produção do milho	3,9	Simazina e Atrazina
	Tratamento de resíduos sólidos municipais	1,7	Cobre, níquel e zinco
Aquecimento global (100 anos) (kgCO <sub>2</sub> eq/kg de emissão)	Produção do milho	1,8	Óxido nítrico, dióxido de carbono
	Tratamento de resíduos de papelcartão	0,8	Metano
Toxicidade Humana (kgp-DCBeq/kg de emissão)	Produção do milho	0,6	Simazina, cádmio e chumbo
	Produção de ureia	0,3	Cromo VI, níquel e selênio
Ecotox. Marinha (kgp-DCBeq/kg de emissão)	Produção do papel	1151,4	Berílio, fluoreto de hidrogênio e níquel
	Tratamento de resíduos sólidos municipais	841,5	Cobre, fluoreto de hidrogênio e níquel
Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11eq/kg de emissão)	Produção de ureia	$9,5 \times 10^{-8}$	Halon 1301, Halon 1211, CFC-114
	Produção do papel	$3,4 \times 10^{-8}$	Halon 1301, Halon 1211, CFC-114
Oxidação fotoquímica (kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/kg de emissão)	Tratamento - resíduos de papelcartão	$1,7 \times 10^{-4}$	Metano, dióxido de enxofre
	Produção do papel	$1,3 \times 10^{-4}$	Monóxido de carbono, dióxido de enxofre e eteno
Ecotox. terrestre (kgp-DCBeq/kg de emissão)	Produção do milho	$5,7 \times 10^{-2}$	Simazina, Atrazina e níquel
	Produção do papel	$2,3 \times 10^{-3}$	Cipermetrina, mercúrio e cromo VI

**Fonte:** Elaborado pela autora.

**Tabela 5: Processos de maior impacto em cada categoria (Absorvente PE)**

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Principais processos envolvidos</b>	<b>Resultado</b>	<b>Principais recursos extraídos ou emissões liberadas</b>
ADP (kgSbeq/kg de minerais extraídos)	Produção de PE	$1,2 \times 10^{-6}$	Zinco, enxofre e chumbo
	Produção de papel	$1,0 \times 10^{-6}$	Cádmio, chumbo e ouro
PCI (MJ/kg de combustível fóssil consumido)	Produção de PE	367,9	Óleo cru, gás natural e carvão
	Produção de papel	6,2	Gás natural, óleo cru e carvão
PA (kgSO <sub>2</sub> eq/kg de emissão)	Produção de PE	$4,5 \times 10^{-2}$	Dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio
	Produção de papel	$2,4 \times 10^{-3}$	Dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e amônia
PEu (kgPO <sub>4</sub> eq/kg de emissão)	Tratamento de resíduos de PE	$7,3 \times 10^{-3}$	Amônia, nitrato e fosfato
	Produção de PE	$3,7 \times 10^{-3}$	DQO, nitrato e íon de amônia
Ecotox. de água doce (kgp-DCBeq/kg de emissão)	Tratamento de resíduos de PE	8,5	Vanádio
	Tratamento de resíduos sólidos municipais	1,7	Cobre, níquel e zinco
PAG <sub>100</sub> (kgCO <sub>2</sub> eq/kg de emissão)	Produção de PE	12,3	Dióxido de carbono e metano
	Tratamento de resíduos de papelcartão	0,8	Metano
Toxicidade Humana (kgp-DCBeq/kg de emissão)	Tratamento de resíduos de PE	3,3	Vanádio, bário e tálio
	Produção de PE	0,6	Antimônio, selênio e fluoreto de hidrogênio
Ecotox. Marinha (kgp-DCBeq/kg de emissão)	Tratamento de resíduos de PE	8497,4	Vanádio, berílio e bário
	Produção de PE	1779,6	Berílio, fluoreto de hidrogênio e vanádio
PDO (kg CFC-11eq/kg de emissão)	Produção de papel	$4,5 \times 10^{-8}$	Halon 1301, Halon 1211, CFC-114
	Tratamento de resíduos de PE	$3,6 \times 10^{-9}$	Halon 1301, CFC-114
OF (kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/kg de emissão)	Produção de PE	$2,4 \times 10^{-3}$	Dióxido de enxofre, metano e monóxido de carbono
	Produção de papel	$1,8 \times 10^{-4}$	Monóxido de carbono, dióxido de enxofre e eteno
Ecotox. Terrestre (kgp-DCBeq/kg de emissão)	Produção de papel	$3,1 \times 10^{-3}$	Cipermetrina, mercúrio e cromo VI
	Tratamento de resíduos sólidos municipais	$1,3 \times 10^{-3}$	Mercúrio e cromo VI

**Fonte:** Elaborado pela autora.

## 4.2. Interpretação

É possível observar pelos resultados obtidos que o absorvente com PE em sua composição possui mais impactos negativos ao meio ambiente, segundo o método CML-IA. Entretanto, é importante analisar cada categoria de impacto isoladamente inicialmente para uma resposta mais detalhada, visto que o absorvente com PLA também apresentou resultados de impactos significativos.

A depleção abiótica está relacionada ao impacto da escassez de recursos, sendo assim, um impacto ligado à extração de materiais. Aqui consegue-se observar a influência da substituição da matéria-prima na produção do absorvente. Avaliando os valores de ADP, observa-se que o sistema de produto do absorvente de PLA atinge  $8,8 \times 10^{-6}$  kgSb<sub>eq</sub>, valor cerca de quatro vezes o ADP do absorvente de PE. Isso se dá devido à necessidade de fertilizantes para a produção do milho, fonte do amido, em especial o superfosfato triplo (TSP) e a ureia, e ambos necessitam de extrações de minerais, como o cádmio. Já ao avaliar os valores de PCI, que expressam a depleção abiótica de combustíveis fósseis, a situação é inversa, e já esperada: o PCI do absorvente de PE é de 374,9 MJ, quase 18 vezes o PCI do absorvente de PLA. Tal resultado é impacto da extração de petróleo, gás natural, e em menor escala, carvão.

Os impactos de acidificação e eutrofização são maiores no sistema de produto do absorvente de PLA, e ambos são resultados da alta emissão de amônia no processo de produção do grão de milho, o que novamente está relacionado à presença dos fertilizantes já mencionados no processo.

Analisando as quatro categorias de impacto relacionadas à toxicidade (toxicidade humana, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade aquática de água doce e ecotoxicidade terrestre), é possível observar algumas semelhanças. Em relação às três primeiras, observam-se valores de potenciais de toxicidade superiores para o sistema do absorvente com PE, e todos eles com maior influência maior do descarte do polietileno em aterro sanitário: o metal vanádio é emitido para o solo e água subterrânea, tendo um impacto de longo prazo. Importante ressaltar que esse processo não existe no sistema do absorvente de PLA, visto que o resíduo do biopolímero foi tratado com digestão anaeróbia. Entretanto, se faz necessária a reflexão sobre o descarte correto do biopolímero, visto que sua degradabilidade não ocorreria em condições normais de um aterro sanitário, o que também poderia gerar impactos negativos semelhantes aos do polietileno. Para o sistema do absorvente de PLA, novamente a maior influência foi

referente à produção do milho: aqui foram contabilizadas as emissões relativas à agricultura, sendo a principal influência a substância simazina (utilizada em herbicidas) e o cádmio (fertilizantes). Em relação à ecotoxicidade terrestre, observa-se um impacto maior do sistema de produto do absorvente de PLA, também relativo às emissões das substâncias já citadas.

Era de se esperar resultados semelhantes entre as categorias de depleção da camada de ozônio e aquecimento global, pois muitos dos gases que destroem a camada também são GEE. Contudo, isso não é observado nos resultados da AICV. Em relação à depleção da camada de ozônio, observa-se um valor de PDO do sistema do absorvente de PLA de  $1,9 \times 10^{-7}$  kg CFC-11eq, superior ao resultado do sistema com PE. Isso ocorreu devido às emissões para o ar de bromofluorcarbonos, clorofluorcarbonos e hidroclorofluorcarbonos (BFCs, CFCs e HCFCs, respectivamente) na produção da ureia, sendo a primeira substância mais agressiva que as seguintes. Já em relação ao aquecimento global, a produção do PE para o outro sistema possui maior influência, devido às emissões de dióxido de carbono e metano no processo. O PAG<sub>100</sub> para o sistema é de 14,2 kg CO<sub>2eq</sub>, cerca de três vezes o valor para o sistema com PLA, que é de 4,5 kgCO<sub>2eq</sub>.

Por fim, a última categoria de impacto a ser analisada do método é a oxidação fotoquímica, que assim como o aquecimento global, possui maior influência das emissões para o ar do processo de produção do PE. Nessa categoria, as emissões de gases que mais impactaram na análise foram dióxido de enxofre, metano e monóxido de carbono.

Olhando ambos os ciclos de vida de forma consolidada, observa-se o maior impacto do ciclo de vida do absorvente de PE. Isso significa que uma pessoa menstruando por um ano, usando uma média de 240 absorventes convencionais com PE como uma de suas matérias-primas, gera mais impactos nocivos ao meio ambiente, à saúde humana e aos recursos naturais do que uma pessoa que utiliza o absorvente alternativo de PLA. Tais impactos estão concentrados na fabricação do polímero e em sua disposição final, o que revela a importância de se pensar em uma alternativa de base biológica e biodegradável para a redução dos impactos. Entretanto, o absorvente de PLA também possui impactos significativos, especialmente relacionados à agricultura. O uso da terra e de fertilizantes e herbicidas na produção do milho são os principais causadores de danos. Com isso, também deve-se buscar formas de agricultura mais sustentáveis e menos tóxicas, a fim de reduzir os impactos associados.

## 5. CONCLUSÃO

Produtos com ciclos de vida sustentáveis são uma das respostas às mudanças climáticas, além de serem uma tendência de consumo. Por isso, entender como suas cadeias produtivas, distribuição, consumo e descarte impactam o meio ambiente é de extrema relevância.

A partir da metodologia de ACV apresentada, foi possível comparar os impactos ambientais da substituição de um polímero de origem fóssil (PE) por um biopolímero (PLA) em um produto descartável e altamente consumido (absorventes descartáveis), além de apresentar de forma prática a diferença dos impactos de uma cadeia de produção linear e uma cadeia circular.

Avaliando ambos os ciclos de vida, observou-se um maior impacto geral do absorvente com PE, relacionado principalmente ao uso de matéria-prima fóssil e ao fato de ser um polímero não biodegradável. Tais impactos podem ser reduzidos através da substituição do PE por um biopolímero como o PLA, como foi visto nos resultados do estudo. Entretanto, também foi observado que o uso do PLA em absorventes descartáveis possui impactos representativos, principalmente relacionados à agricultura (uso da terra e de herbicidas e fertilizantes). Sendo assim, é necessário a busca por métodos de agricultura sustentáveis para que o absorvente de PLA seja ainda mais sustentável. Formas de tornar a produção do milho menos danosa ao ambiente e de viabilizar economicamente o PLA são alguns dos caminhos que devem ser trilhados para que o uso do biopolímero seja uma alternativa ainda mais sustentável e amplamente comercializada.

Por fim, também foi possível concluir que a ACV é um método útil, visto que através de sua aplicação foi possível avaliar aspectos relacionados à sustentabilidade de dois produtos diferentes, e promissor, devido à tendência de busca por produtos sustentáveis e cadeias circulares, o que abre um precedente para uma maior aplicação do método no futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARBAULT D., RIVIÈRE M., RUGANI B., BENETTO E., BARNA L. T. **Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services**. *Science of the Total Environment* 472 (2014) 262–272. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.099.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.
- AVINC O., KHODDAMI, A. **Overview of Poly(lactic acid) (PLA) Fibre**. *Fibre Chemistry*. Vol. 41, pp. 391-401, 2009.
- BARMAN A., KATKAR P. M., ASAGEKAR S. D. **Natural and Sustainable Raw Materials for Sanitary Napkin**. *Journal of Textile Science & Engineering*, 2017, 7:3 DOI: 10.4172/2165-8064.1000308
- BORUNDA, A. **How tampons and pads became so unsustainable**. *National Geographic*, 2019. <<https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/09/how-tampons-pads-became-unsustainable-story-of-plastic/>>. Acesso em: Novembro de 2020.
- BRASKEM (2019). **Relatório Anual 2018**. <<https://www.braskem.com.br/relatorioanual2018>>. Acesso em: Outubro de 2020.
- BRUSSEAU, M. L. **Sustainable Development and Other Solutions to Pollution and Global Change**. *Environmental and Pollution Science* (3rd Edition). (pp. 595-596), 2019.
- CABRAL, K. **O que é o Acordo de Paris?** CEBDS, 2019. <[https://cebds.org/o-que-e-o-acordo-de-paris/#.X\\_XO4dhKjIV](https://cebds.org/o-que-e-o-acordo-de-paris/#.X_XO4dhKjIV)>. Acesso em: Dezembro de 2020.
- CIRCLE ECONOMY. **The Circularity Gap Report 2020**. <<https://www.circularity-gap.world/2020>> Acesso em: Novembro de 2020.
- COOPER, K. L. **The people fighting pollution with plastic-free periods**. *BBC News*, 2018. <<https://www.bbc.com/news/world-43879789>>. Acesso em: Outubro de 2020.
- CURRAN, M. A. **Life-Cycle Assessment**. BAMAC, Ltd, Rock Hill, SC, United States. (pp. 359-362), 2016.



DAVIDSON, A. **Narratives of Menstrual Product Consumption: Convenience, Culture, or Commoditization?** Bulletin of Science, Technology & Society 32 (1), 2012. pp. 56–70. DOI: 10.1177/0270467612444579

DEPARTAMENTO DE SAÚDE E SERVIÇOS HUMANOS DOS ESTADOS UNIDOS. **Your Menstrual Cycle** (2018) <<https://www.womenshealth.gov/menstrual-cycle/your-menstrual-cycle#3>>. Acesso em: Outubro de 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Completing the Picture: How the circular economy tackles climate change.** <[https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/EMF\\_COMPLETING\\_THE\\_PICTURE\\_V1.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/EMF_COMPLETING_THE_PICTURE_V1.pdf)>. 2019. Acesso em: Novembro de 2020

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **The New Plastics Economy: Rethinking The Future Of Plastics.** <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics-catalysing-action>>. 2019. Acesso em: Novembro de 2020.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **The Product, Functional Unit and Reference Flows in LCA.** Environmental News, 70, 2004.

ESPOSITO, M., TSE, T., SOUFANI, K. **Introducing a Circular Economy: New Thinking with New Managerial and Policy Implications.** California Management Review. (pp. 1-2), 2018.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics market data** <<https://www.european-bioplastics.org/market/>>. Acesso em Novembro de 2020.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **What are bioplastics?** <<https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>>. Acesso em Novembro de 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **Top Marine Beach Litter Items in Europe** (2017). <[https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC108181/technical\\_report\\_top\\_marine\\_litter\\_items\\_eur\\_29249\\_en\\_pdf.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC108181/technical_report_top_marine_litter_items_eur_29249_en_pdf.pdf)>. Acesso em: Outubro de 2020.

GAD, S. E. **Polymers.** Gad Consulting Services, Cary, NC, USA, Elsevier, 2014.

GUINÉE, J. B. et al. **Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future.** Environmental Science & Technology, Washington, v. 45, n. 1, (pp. 90-96), 2011. DOI: 10.1021/es101316v.

HAGEN, R. **PLA (Polylactic Acid)**. Uhde Inventa-Fischer GmbH, Berlin. Elsevier, 2016.

HAIT A., POWERS, S. E. **The value of reusable feminine hygiene products evaluated by comparative environmental life cycle assessment**. Resources, Conservation & Recycling 150 (2019) 104422. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104422

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Curso de curta duração: Introdução à metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV** (2015). < <https://acv.ibict.br/comunicacao/noticias/575-curso-de-introducao-a-metodologia-de-avaliacao-do-ciclo-de-vida/>>. Acesso em: Setembro de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: Desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil**. Brasília, 2015. ISBN: 978-85-7013-105-8.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Histórico da ACV**. <<https://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>>. Acesso em: Setembro de 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC Updates Methodology for Greenhouse Gas Inventories**. <[https://www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/IPCC 2019](https://www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/IPCC%2019)>. Acesso em: Dezembro de 2020.

JEM, K. J., BOWEN, T. **The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid)**. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. Vol. 3, 2020, pp. 60-70.

JONKER G., HARMSSEN, J. **Creating Design Solutions**. Engineering for Sustainability: A Practical Guide for Sustainable Design. The Netherlands, Elsevier, 2012. DOI: 10.1016/C2010-0-66643-0, pp. 61-81.

KEULENAER H. D., WACHTER B. D., HERRMANN C. **The big 6 environmental impact categories Minute Lectures The foundation for a Life Cycle Assessment (LCA)**. 2015 < [https://www.researchgate.net/publication/333039870\\_The\\_big\\_6\\_environmental\\_impact\\_categories\\_Minute\\_Lectures\\_The\\_foundation\\_for\\_a\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_LCA](https://www.researchgate.net/publication/333039870_The_big_6_environmental_impact_categories_Minute_Lectures_The_foundation_for_a_Life_Cycle_Assessment_LCA)>. Acesso em Dezembro/20.

KOTLER, J. **A short history of modern menstrual products** (2018) < <https://hellocue.com/articles/culture/a-short-history-of-modern-menstrual-products>>. Acesso em Novembro de 2020.

LACA, A., HERRERO, M., DIAZ, M. **Life Cycle Assessment in Biotechnology**. University of Oviedo, Oviedo, Spain. Elsevier, 2011. DOI: 10.1016/B978-0-08-088504-9.00140-9

MILLER, S. A. **Sustainable polymers: replacing polymers derived from fossil fuels**. Polymer Chemistry, 2014, 5, 3117. DOI: 10.1039/c4py90017k

NAMPOOTHIRI, K. M., NAIR, N. R., JOHN, R. P. **An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research**. Bioresource Technology, Vol. 101, Ed. 22, 2010 (pp. 8493-8501), ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.092>.

NIEUWLAAR, E. (2013). **Life Cycle Assessment and Energy Systems**. 10.1016/B978-0-12-409548-9.01334-8.

NOVA-INSTITUT. **Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2019 – 2024** < <http://bio-based.eu/downloads/bio-based-building-blocks-and-polymers-global-capacities-production-and-trends-2019-2024/>>. Acesso em Setembro de 2020.

NOVA-INSTITUT. **Biodegradable Polymers in Various Environments**. < <http://bio-based.eu/downloads/biodegradable-polymers-in-various-environments/>>. Acesso em Setembro de 2020.

ONU. **Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability** (2018). <[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic\\_sustainability.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic_sustainability.pdf)>. Acesso em Outubro de 2020.

ONU. **The Climate Crisis – A Race We Can Win**. <<https://www.un.org/en/un75/climate-crisis-race-we-can-win>>. Acesso em Novembro de 2020.

PERKINS, J. H. **Energy Transitions: Linking Energy and Climate Change**. Em W. L. Filho, & S. L. Hemstock, Climate Change and the Role of Education, (pp. 90-92). Hamburg, Springer, 2019.

RAMIREZ, P. K. R. **Análise de Métodos de Alocação Utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida**. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

REDE EMPRESARIAL BRASILEIRA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (REDE ACV). **Relatório de Atividades 2019**. <<https://redeacv.org.br/pdfs/rede-acv-relatorio-atividades-2019.pdf>>. Acesso em: Novembro de 2020.

SARIATLI, F. **Linear Economy versus Circular Economy: A comparative and analyzer study for Optimization of Economy for Sustainability**. Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development, p. 32, 2017.

SØRENSEN, P. B. **From the Linear Economy to the Circular Economy: A Basic Model**. FinanzArchiv/Public Finance Analysis vol. 74 no. 1, 2017.

UNIDO. **Circular Economy**. <<https://www.unido.org/our-focus-cross-cutting-services/circular-economy>> Acesso em: Novembro de 2020.

VINK E.T., RÁBAGO K.R., GLASSNER D., GRUBER P.R. **Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production**. Polymer Degradation and Stability (2003). 2003;80:403–419. DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00372-5.

WANG, M., GUO, L., SUN, H. **Manufacturing Technologies for Biomaterials The University of Hong Kong**, Pokfulam, Hong Kong. Elsevier, 2018.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais**. Produção (São Paulo. Impresso), Vol. 23, nº3, pp. 436-447, 2013. ISSN 0103-6513. <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-65132013000200016&lng=pt&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132013000200016&lng=pt&nrm=iso&tlng=en)> Acesso em: Outubro de 2020.

WOELLER, K. E., HOCHWALT, A. E. **Safety assessment of sanitary pads with a polymeric foam absorbent core**. Regulatory Toxicology and Pharmacology 73 (2015) pp. 419-424. DOI: 10.1016/j.yrtph.2015.07.028

ZERO WASTE EUROPE. **The Environmental & Economic Costs Of Single-Use Menstrual Products, Baby Nappies & Wet Wipes: Investigating The Impact Of These Single-Use Items Across Europe**. 2019. <[https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2019/12/bffp\\_single\\_use\\_menstrual\\_products\\_baby\\_nappies\\_and\\_wet\\_wipes.pdf](https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2019/12/bffp_single_use_menstrual_products_baby_nappies_and_wet_wipes.pdf)>. Acesso em Outubro de 2020.

ZIMEK, M., SCHOBBER, A., MAIR, C., BAUMGARTNER, R. J., STERN, T. FÜLLSACK, M. **The Third Wave of LCA as the "Decade of Consolidation"**. Sustainability 11 (12), 3283, 2019.