

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

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE BIOCOMPÓSITOS DE BAGAÇO
EM SUBSTITUIÇÃO AO POLIESTIRENO EXPANDIDO EM
EMBALAGENS DE DELIVERY

Nathalia Oliveira Martins

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

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alice Medeiros de Lima

São Carlos – SP
2024

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 22 de janeiro de 2024 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof^a. Dr^a. Alice Medeiros de Lima, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Convidado: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Ernesto Antonio Urquieta Gonzalez, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lucia e Heraldo, que sempre me apoiaram e possibilitaram a minha vinda para São Carlos. Agradeço por todos os ensinamentos e pelo amor incondicional, eu provavelmente não seria a mulher que sou hoje sem vocês. Às minhas irmãs, Lívia e Isabela, que vibraram com todas as minhas conquistas ao longo desses anos, em especial a Isabela que me aturou nesses últimos 2 anos como colega de quarto e vivenciou comigo meus pequenos delírios e devaneios.

Às minhas amigas conterrâneas, Gabriela, Giovanna, Daniela, Kenia, Kesia e Mayara, por sempre estarem torcendo por mim e me receberem sempre de braços abertos quando eu volto para Barrinha.

Aos meus amigos da UFSCar: Diana Estanislau, Lucas Cruz, Lucas Santos, Paulo Rocha, Pedro Cavalcante e Yuri Mitsuoka. Agradeço pelos bons momentos e por toda a ajuda que recebi. Vocês se fizeram presentes na minha vida mesmo a quilômetros de distância durante uma pandemia e não há palavras que expressem quanta saudade eu sinto da convivência diária com vocês.

Às entidades do DEQ UFSCar, PET-EQ e Comissão pró-SEQ, por me possibilitarem conhecer pessoas incríveis que levarei como exemplos para o resto da vida. Agradeço pelas experiências únicas e claro, por deixar meus dias na UFSCar mais leves (mesmo isso sendo uma tarefa difícil quando se escolhe fazer engenharia química). A profissional que sou hoje só existe graças a vocês!

À minha orientadora Alice, por toda a motivação e segurança transmitida durante toda essa jornada desde maio de 2023. Agradeço por aceitar minhas ideias desde o começo e pela boa orientação.

Por fim, agradeço à UFSCar e ao Departamento de Engenharia Química (DEQ) pela qualidade do ensino e por mudarem a vida de uma menina do interior.

RESUMO

O mercado de delivery cresceu muito nos últimos anos, acelerado pelas restrições da pandemia de COVID-19 esse estilo de alimentação se tornou uma necessidade na vida de muitas pessoas. No entanto, o delivery ainda se baseia fortemente na utilização de embalagens de uso único feitas de plástico. Essas embalagens quando descartadas erroneamente podem se transformar em microplástico e acabar no organismo de animais marinhos e até mesmo de humanos. É nesse cenário que surgem estudos para encontrar embalagens mais sustentáveis, uma das várias possibilidades são as embalagens feitas de bagaço, que além de utilizarem um subproduto da indústria sucroalcooleira também são biodegradáveis. O presente trabalho visa analisar o ciclo de vida de 1kg de embalagens de delivery fabricadas a partir de dois diferentes materiais: bagaço e poliestireno expandido (EPS). Para calcular os impactos de cada cadeia foi utilizado o software OpenLCA. Para o fluxo de produção da embalagem de bagaço foi considerado que a matéria-prima viria de uma indústria sucroalcooleira, passando posteriormente por um processo de tratamento da polpa, seguindo para a indústria de termoformagem para geração das embalagens e por fim podendo ter duas possibilidades de descarte: o aterro sanitário ou a compostagem. Para as embalagens de EPS o processo se inicia na extração de petróleo, craqueamento da Nafta, polimerização e expansão do poliestireno seguindo para o processo de termoformagem e com descarte no aterro sanitário. Como resultado, o bagaço obteve um pior desempenho em 7 das 11 categorias estudadas sendo o cultivo da cana-de-açúcar o principal responsável pelos valores atingidos. Em relação ao descarte em aterro ou a compostagem, as categorias de impacto apresentaram valores muito semelhantes entre si, não deixando evidente a vantagem da embalagem biodegradável.

Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida; Bagaço; EPS; Embalagens de Delivery.

ABSTRACT

The delivery market has grown a lot in recent years, accelerated by the restrictions of the COVID-19 pandemic, this style of eating has become a necessity in many people's lives. However, delivery market is still based on the use of packaging made of plastic. These packaging, when discarded incorrectly, can turn into microplastic and end up in the organism of marine animals and even humans. It is in this scenario that studies are emerging to find more sustainable packaging, one of the many possibilities is packaging made from bagasse, which in addition to using a by-product of the sugar and alcohol industry is also biodegradable. This work aims to analyze the life cycle of 1kg of delivery packaging made from two different materials: bagasse and expanded polystyrene (EPS). To calculate the impacts of each chain, the OpenLCA software was used. For the bagasse packaging production flow, it was considered that the raw material would come from a sugar and alcohol industry, subsequently going through a pulp treatment process, heading to the thermoforming industry to generate the packaging and finally having two disposal possibilities: landfill or composting. For EPS packaging, the process begins with the removal of oil, cracking of Naphtha, polymerization and expansion of polystyrene, followed by the thermoforming process and disposal in the landfill. As a result, bagasse performed worse in 7 of the 11 categories studied, with sugarcane cultivation being the main responsible for the values achieved. In relation to disposal in landfill or composting, the impact categories had very similar values to each other, not making the advantage of biodegradable packaging evident.

Keywords: Life Cycle Assessment; Bagasse; EPS; Delivery Packaging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Média de pedidos anuais de 2021 e 2022 da França, Espanha, Mexico, Portugal, Reino Unido, Brasil, Indonésia, China Continental, Tailândia e Coréia do Sul.	2
Figura 2.2	Distribuição do valor bruto de produção de embalagens por segmento no ano de 2022	3
Figura 2.3	Esquema da produção de EPS.	4
Figura 2.4	Esquema do processo de desidrogenação catalítica do etilbenzeno	6
Figura 2.5	Esquema da reação de polimerização do estireno	7
Figura 2.6	Esquema do processo de polimerização do estireno em suspensão.	7
Figura 2.7	Estrutura de um estudo ACV	14
Figura 3.1	Tela do software openLCA.	17
Figura 3.2	Cadeia de produção da embalagem de poliestireno expandido e limites de bateria considerados no presente trabalho.	19
Figura 3.3	Cadeia de produção da embalagem de bagaço e limites de bateria considerados no presente trabalho	20
Figura 3.4	Montagem do fluxo <i>Expanded polystyrene</i> no OpenLCA	21
Figura 3.5	Rendimento em porcentagem da compostagem para cada matéria orgânica	23
Figura 4.1	Resultados comparativos relativos da Avaliação do Ciclo de Vida para as embalagens de EPS e bagaço descartadas em aterro.	26
Figura 4.2	Resultados comparativos relativos da Avaliação do Ciclo de Vida para as embalagens bagaço descartadas em aterro e enviadas para compostagem	27
Figura 4.3	Resultado da contribuição de cada etapa do ciclo de vida da embalagem de EPS para as onze categorias de impactos ambientais	29
Figura 4.4	Resultado da contribuição de cada etapa do ciclo de vida da embalagem de bagaço para as onze categorias de impactos ambientais.	29

LISTA DE QUADROS E TABELAS

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Fluxos utilizados para embalagem de EPS.	22
Quadro 3.2	Fluxos utilizados para embalagem de bagaço.	24
Quadro 3.3	Categorias de impacto do método CML-IA e seus fatores de caracterização.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Resultados de impactos dos ciclos de vida das embalagens de EPS e de bagaço.	26
Tabela 4.2	Resultados de impactos dos ciclos de vida das embalagens de bagaço com diferentes destinos de fim de vida.	28
Tabela 4.3	Valores por categoria de impacto para os quatro sistemas avaliados no estudo de Diana Ita Nagy e outros autores (dados relatados por unidade funcional: 1 kg de pellets).	33

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA.....	1
AGRADECIMENTOS	2
RESUMO.....	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	6
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 SETOR DE DELIVERY DE COMIDA NO BRASIL	2
2.2 SETOR DE EMBALAGENS NO BRASIL.....	3
2.3 EMBALAGENS DE ISOPOR.....	3
2.3.1 Petroquímicos básicos	4
2.3.2 Etilbenzeno	5
2.3.3 Estireno	5
2.3.4 Poliestireno	6
2.3.4 Poliestireno Expandido (EPS)	8
2.4 O MERCADO DE DELIVERY E A POLUIÇÃO PLÁSTICA.....	8
2.5 EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS	9
2.5.1 Embalagens Biodegradáveis	10
2.6 BAGAÇO.....	10
2.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	11
2.7.1 Definição e histórico	11
2.7.2 Método	13
2.7.2.1 Definição de objetivo e escopo	13
2.7.2.4 Interpretação	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 MATERIAIS.....	16
3.1.1 Software	16
3.1.2 Banco de dados	16
3.2 MÉTODOS.....	17
3.2.1 Definição do escopo e dos limites de bateria.....	17
3.2.2 Inventário das embalagens de EPS.....	19

3.2.3 Inventário das embalagens de bagaço.....	22
3.2.4 Avaliação dos impactos ambientais.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS.....	25
4.1.1 Bagaço e EPS.....	25
4.1.2 Aterro e Compostagem.....	26
4.2 ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO POR ETAPA	28
4.2 INTERPRETAÇÃO DO DADOS	29
4.2 COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS.....	31
5 CONCLUSÃO.....	33
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

A indústria alimentícia se modificou muito ao longo do tempo. Se, no passado, o ser humano dependia da terra e do clima para se alimentar hoje a tecnologia oferece uma grande variedade e quantidade de alimentos. É nessa crescente que surge o delivery, um processo que envolve produção, classificação, venda, coleta, transporte e entrega de uma forma sincronizada e rápida. O delivery se tornou uma necessidade, no entanto, é importante ressaltar que esse modelo de alimentação ainda se baseia fortemente em embalagens de plástico de uso único. Apenas em 2021 o setor de delivery consumiu cerca de 25,13 toneladas de plástico. Esse material demora cerca de 400 a 500 anos para se decompor na natureza e atualmente é uma das principais ameaças a vida marinha (OCEANA, 2022).

A sustentabilidade se tornou uma pauta de destaque no setor e fomentou a pesquisa para produção de embalagens de uso único mais ecológicas, tal como as embalagens de bagaço de cana. Visto que o Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar, o bagaço de cana seria uma matéria prima abundante que atenderia a demanda do mercado de delivery. Porém é necessário avaliar os impactos ambientais dessas novas embalagens ecológicas para entender quais seus reais benefícios em relação as embalagens tradicionais de plástico, utilizando-se ferramentas de avaliação de Ciclo de Vida. Essa ferramenta pode ser utilizada tanto por pesquisadores, que busquem ampliar a base científica sobre sistemas produtivos e suas relações com o meio ambiente, quanto pela indústria, que pode aumentar a eficiência de seus processos, reduzir custos e ainda promover o marketing verde de seus produtos. Até mesmo pelo setor governamental que pode usar resultados de estudos ACV para elaborar políticas públicas que respeitem o meio ambiente e incentivem práticas sustentáveis (IBICT).

O presente trabalho visa comparar os impactos associados ao uso de embalagens de delivery fabricadas a partir de bagaço de cana-de-açúcar e de poliestireno expandido, através da Avaliação do Ciclo de Vida.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

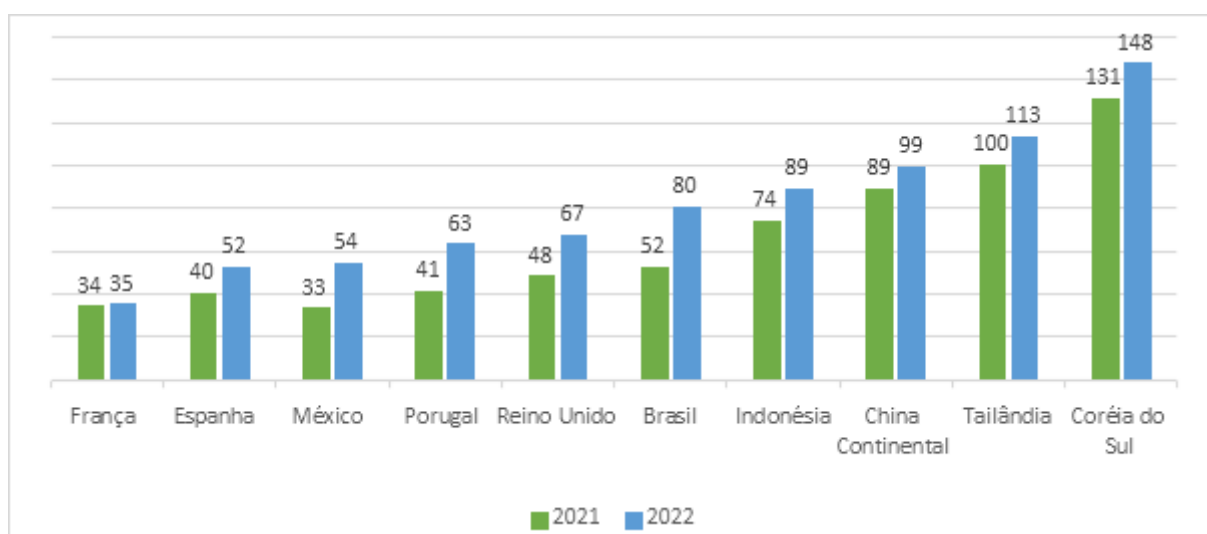
2.1 SETOR DE DELIVERY DE COMIDA NO BRASIL

O mercado de delivery no Brasil teve um crescimento expressivo nos últimos anos, impulsionado pela pandemia. De acordo com dados da Confederação Nacional de Dirigentes Lojistas (CNDL) e do Serviço de Proteção ao Crédito (SPC Brasil) em 2019, apenas 30,4% dos internautas brasileiros utilizavam serviços de entrega de refeições. Entretanto, entre 2020 e 2021, esse número aumentou para 54,8% (ABRASEL, 2023).

O crescimento do delivery brasileiro também se destaca em comparação aos números com outros países da América Latina. De acordo com dados da Statista, empresa especializada em dados de mercado e consumidores, 48,77% de todos os pedidos feitos na região são provenientes do Brasil, superando México (27,07%) e Argentina (11,85%)(ABRASEL, 2023).

Um estudo realizado pela Kantar chamado “Dining out’ at home!” reuniu dados de 10 países (Brasil, China, Coreia do Sul, Espanha, França, Indonésia, México, Portugal, Reino Unido e Tailândia) e concluiu que o Brasil ocupou o 5º lugar do ranking de média de pedidos de delivery anuais por pessoa como mostrado no gráfico ilustrado na Figura 2.1 (KANTAR, 2022).

Figura 2.1: Média de pedidos anuais de 2021 e 2022 da França, Espanha, México, Portugal, Reino Unido, Brasil, Indonésia, China Continental, Tailândia e Coréia do Sul.

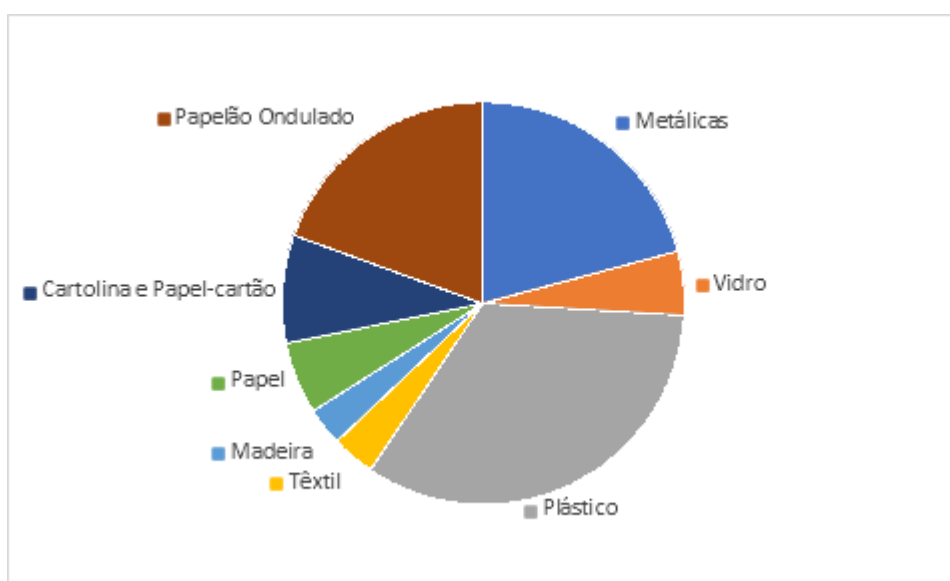


Fonte: Adaptado KANTAR, 2022.

2.2 SETOR DE EMBALAGENS NO BRASIL

Um estudo macroeconômico da ABRE (Associação Brasileira de Embalagens) realizado pela FGV (Fundação Getúlio Vargas) demonstrou que o valor bruto da produção física de embalagens de 2022 foi R\$123,2 bilhões, o que representou um crescimento de 3,9% em relação a 2021. O segmento de embalagens plásticas representou 33,6% desse total em 2022, como mostra a Figura 2.2 (ABRE, 2023).

Figura 2.2: Distribuição do valor bruto de produção de embalagens por segmento no ano de 2022.



Fonte: Adaptado ABRE 2023.

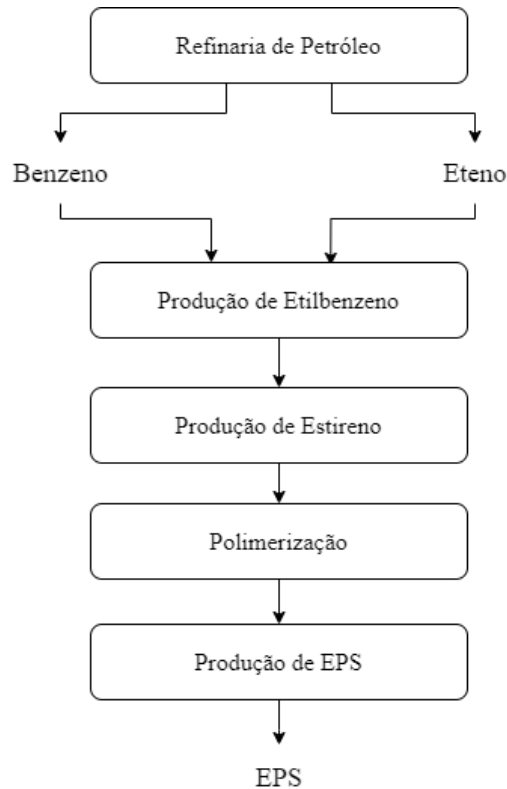
Segundo a ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria de Plástico) as principais resinas consumidas no Brasil em 2022 foram: PEBDL (Polietileno linear de baixa densidade) com 16,1%, PEBD (Polietileno de baixa densidade) 9,7%, PEAD (Polietileno de alta densidade) 13,8%, PVC (Policloreto de vinila) 12,9%, Plástico reciclado 13,2% , PET (Polietileno tereftalato) 5,8%, PP (Polipropileno) 20,3%, PS (Poliestireno) 6,2% e EPS (Poliestireno expandido, também conhecido como Isopor) 2% (ABIPLAST, 2023).

2.3 EMBALAGENS DE ISOPOR

As embalagens de isopor ou poliestireno expandido, são fabricadas a partir da expansão da resina de poliestireno que é formada a partir da polimerização do estireno. O estireno, por sua vez, é um monômero produzido através da reação catalítica do etilbenzeno,

que é obtido a partir de dois petroquímicos básicos: o eteno e o benzeno. O processo pode ser mais bem ilustrado no esquema da Figura 2.3.

Figura 2.3: Esquema da produção de EPS.



Fonte: Elaborado pela autora.

2.3.1 Petroquímicos básicos

O eteno é produzido pelo craqueamento térmico, que consiste na quebra de grandes moléculas de hidrocarboneto em moléculas menores através de altas temperaturas e pressão. Correntes de nafta (fração leve do petróleo) e gás natural são craqueadas em fornos de pirólise com temperaturas entre 815 e 900°C e pressão de 2 atm (CRUZ, 2015).

Já o benzeno é obtido através da reforma catalítica da nafta. Nesse processo, ocorre a desidrogenação de naftênicos em aromáticos através de três etapas: pré-tratamento, transformação e estabilização. No pré-tratamento, a nafta é misturada com um gás rico em hidrogênio na presença de catalisadores e em seguida aquecida entre 260 °C e 340 °C para a remoção de impurezas, como gases sulfurados, hidrogenados e oxigenados e metais. Na etapa de transformação, uma nova carga de gás rico em hidrogênio é inserida no processo e aquecida entre 470 °C e 530 °C para desencadear reações de aromatização. Na estabilização, o

reformado obtido é fracionado em uma torre de estabilização para a formação de benzeno, isoparafínicos, GLP, gás combustível, hidrogênio e coque (CRUZ, 2015).

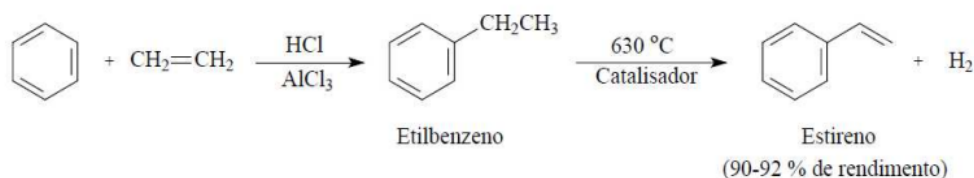
2.3.2 Etilbenzeno

O etilbenzeno é um líquido incolor, inflamável e com odor semelhante ao da gasolina (CETESB, 2012). Atualmente no Brasil a rota mais utilizada para a sua produção é a alquilação de benzeno com eteno. Nesse processo, correntes de eteno e benzeno são aquecidas e inseridas em reatores a temperaturas entre 85 °C e 95 °C e pressão atmosférica, com a adição de catalisadores. O benzeno é adicionado em excesso, para garantir a conversão completa do eteno. Após sair dos reatores as correntes seguem para torres de destilação para separação dos compostos produzidos (CRUZ, 2015).

2.3.3 Estireno

O estireno (insumo básico do PS) é um dos monômeros mais importantes na produção de polímeros e copolímeros, e atinge grandes volumes de produção em todo o globo, dada à imensa variedade de derivados. A sua fórmula molecular é C_8H_8 e pode ser obtido a partir do etilbenzeno pela rota petroquímica ou também através do processo para produção do óxido de propeno (PO/SM), no qual o estireno é um subproduto, obtido neste caso a menor custo do que por via petroquímica (CRUZ, 2015).

A principal via comercial de obtenção do estireno é a desidrogenação catalítica do etilbenzeno em presença de vapor d'água (rota petroquímica), através da Equação 2.1.

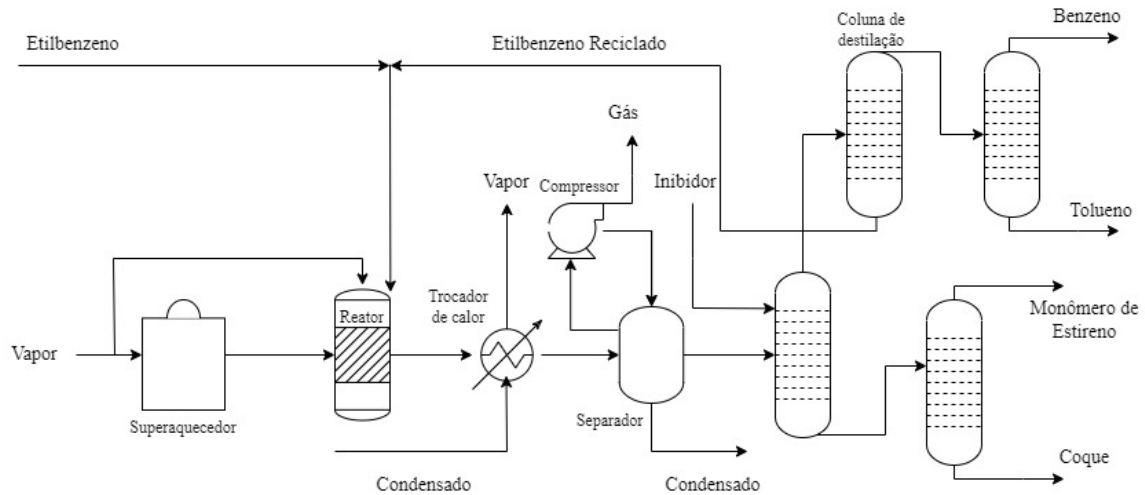


(2.1)

Na Figura 2.4, temos a representação do processo via rota petroquímica. A reação 2.1 é endotérmica e possui baixas taxas de conversão, geralmente menor que 50%. Todo o etilbenzeno não convertido é purificado e retorna ao processo. A razão vapor d'água/etilbenzeno varia entre 4:1 e 20:1 e a temperatura do processo varia de 540°C e

650°C. O estireno é resfriado e misturado a inibidores que evitarão sua polimerização em condições ambientes (CRUZ,2015).

Figura 2.4: Esquema do processo de desidrogenação catalítica do etilbenzeno.

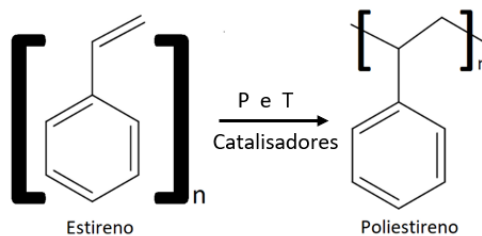


Fonte: Adaptado CRUZ, 2015.

2.3.4 Poliestireno

O poliestireno foi produzido em escala comercial, pela primeira vez, em 1938, pela Dow Chemical Compay (BNDS, 2002). Trata-se de uma resina termoplástica resultante do processo de polimerização do estireno (vinil benzeno), como mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5: Esquema da reação de polimerização do estireno.

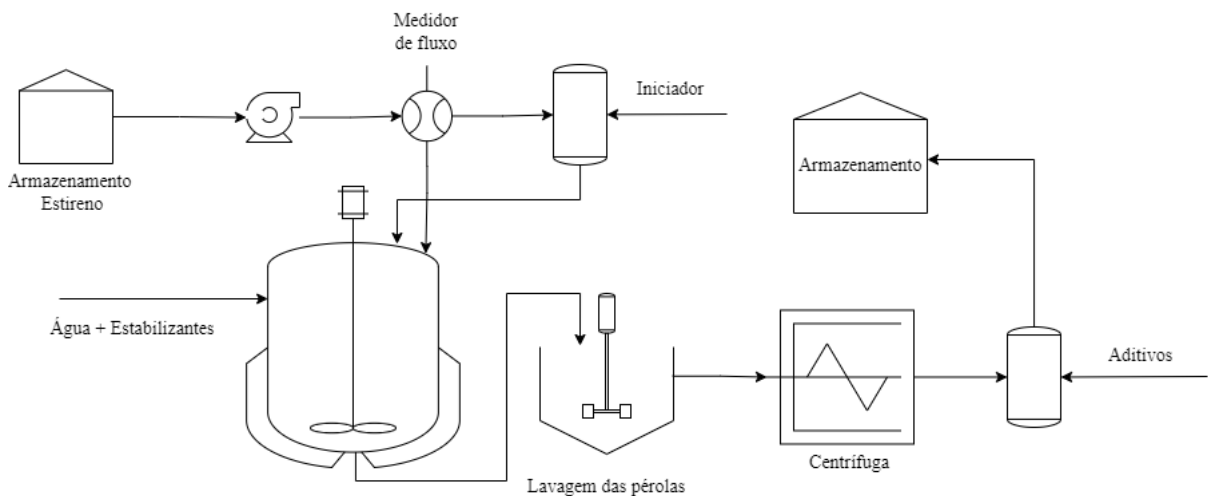


Fonte: Adaptado MUNDO EDUCAÇÃO.

O processo de polimerização industrial do estireno é realizado por um mecanismo de reação via radicais livres. Os processos mais utilizados são os de polimerização em massa (bulk), que é o mais moderno, e os de polimerização em suspensão (BNDES, 2002).

Um sistema de polimerização em suspensão, esquematizado na Figura 2.6, ocorre em batelada e consiste em um ou mais monômeros insolúveis na água, contendo um iniciador solúvel na fase orgânica. Esses compostos são dispersos na fase aquosa contínua pela combinação de forte agitação e o uso de pequenas quantidades de agentes de suspensão (estabilizantes). Os estabilizantes impedem a coalescência (junção) das gotas orgânicas suspensas na fase aquosa, estabilizando a gota de polímero (MACHADO F.et al., 2007).

Figura 2.6: Esquema do processo de polimerização do estireno em suspensão.



Fonte: Adaptado MACHADO F.et al., 2007.

Enquanto as condições de agitação mecânica são mantidas, as gotas de monômero são lentamente convertidas de um estado líquido altamente móvel, para uma dispersão viscosa (conversão entre 20 e 60%) e então para partículas sólidas de polímero. (MACHADO F.et al., 2007).

A polimerização em massa, também envolve um monômero e um iniciador como componentes principais, no entanto o processo ocorre na ausência de um solvente. Atualmente é o processo mais utilizado pelos grandes fabricantes, visto que fornece altas vazões e produto com alto grau de pureza e baixa carga de efluentes. O rendimento deste processo não difere muito entre os líderes desse setor. (BNDES, 2002)

Graças às suas propriedades especiais, o PS pode ser utilizado numa vasta gama de aplicações, e comercialmente é vendido de três maneiras:

- Cristal ou Standard – Tem como características principais a transparência, o alto brilho e a fácil coloração (pela adição de agentes corantes). Também pode ser denominado

como poliestireno normal e estireno homopolímero. Entre suas aplicações principais estão embalagens para a indústria alimentícia e copos descartáveis (BNDES).

- Poliestireno Expandido (EPS) – É uma espuma rígida obtida por meio da expansão da resina PS. O EPS mais conhecido no Brasil é o da marca comercial da Basf-Isopor®. As principais aplicações do EPS são na proteção de embalagens e no isolamento térmico (BNDES).

- Poliestireno de Alto Impacto (HIPS) – É um poliestireno modificado com elastômeros de polibutadieno. Esta resina é obtida pela polimerização de uma solução de estireno-butadieno. Forma-se um sistema de duas fases devido à imiscibilidade do poliestireno e do polibutadieno. O poliestireno forma a fase contínua e o polibutadieno, a fase dispersa (BNDES).

2.3.4 Poliestireno Expandido (EPS)

O EPS é um plástico celular rígido obtido através da expansão das pérolas de poliestireno. No processo de transformação, essas pérolas aumentam em até 50 vezes o seu tamanho original, por meio de vapor, fundindo-se e moldando-se em formas diversas. Quando expandidas, as pérolas apresentam em seu volume até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno (EPS BRASIL).

O processo produtivo do EPS não utiliza o gás CFC nem HCFC. Como resultado, os produtos confeccionados totalmente com EPS são inertes e 100% reaproveitáveis e recicláveis e podem, inclusive, voltar à condição de matéria-prima. (EPS BRASIL)

2.4 O MERCADO DE DELIVERY E A POLUIÇÃO PLÁSTICA

Em 2022, a OCEANA publicou em seu relatório, “*O mercado de delivery de refeições e a poluição plástica*”, que o consumo de plástico no setor de delivery brasileiro saltou 46% de 2019 a 2021, saindo de 17,16 mil toneladas para 25,13 mil toneladas. Ou seja, em 2021, foram consumidas 68 toneladas por dia ou 2,8 toneladas por hora (OCEANA 2022).

Atualmente o plástico é responsável por pelo menos 70% de todo resíduo encontrado na costa brasileira sendo uma das principais ameaças a vida marinha (OCEANA, 2022). Partículas de lixo marinho foram encontradas no intestino de tartarugas e pássaros marinhos no litoral do Rio Grande do Sul, dentre as quais mais de 70% e 95%, respectivamente, eram microplásticos. A questão do microplástico é uma ramificação da poluição plástica marinha,

trata-se de partículas de plástico em escala micrométrica e milimétrica. A presença de microplásticos também foi detectada em diferentes organismos, como plâncton, peixes, tartarugas, aves marinhas, mexilhões, anêmonas, peixe-boi, pinguins, tubarão baleia, cachalote, caranguejo, além de outros organismos que habitam a areia das praias (MONTAGNER, 2021)

Os seres humanos também não estão imunes, partículas de microplástico já foram detectadas no pulmão humano, na placenta de mulheres grávidas e, em março de 2022, pesquisadores da Universidade de Vrije, de Amsterdam, encontraram, pela primeira vez, partículas de microplástico na corrente sanguínea (OCEANA, 2022).

Os efeitos do ponto de vista ecológico e ambiental, somados aos danos econômicos provenientes do descarte inadequado de resíduos, têm colocado a poluição plástica como foco de ações e estudos em diversas áreas ao redor do mundo. É amplamente reconhecido que a principal destinação dos plásticos é o oceano, sendo que aproximadamente 80% desses resíduos são de origem terrestre. Como resultado, existem pelo menos cinco grandes ilhas de plástico nos oceanos, onde toneladas de detritos plásticos flutuantes se agrupam em vórtices oceânicos, gerando prejuízos incalculáveis ao ecossistema marinho, incluindo a perda significativa de vida animal, conforme indicado pelo Panorama da Biodiversidade Global da Organização das Nações Unidas (MONTAGNER, 2021).

2.5 EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS

Uma embalagem é considerada sustentável quando o seu desenvolvimento, produção e descarte minimizam os impactos negativos tanto ambientais quanto socioeconômicos. Isso exige que esses processos envolvam:

- otimizar o design para reduzir desperdício de materiais e de tempo;
- utilizar matérias-primas orgânicas, recicláveis, recicladas ou biodegradáveis;
- reduzir o consumo de energia e recursos naturais na fabricação;
- gerar menos resíduos e assegurar a destinação correta deles. (IFOOD, 2023)

Dentre os modelos sustentáveis disponíveis para o segmento alimentício uma das alternativas que se destaca são as embalagens biodegradáveis.

2.5.1 Embalagens Biodegradáveis

A biodegradação ocorre naturalmente, transformando compostos orgânicos complexos em substâncias simples, distribuídas no ambiente por meio de mecanismos bioquímicos, dentro do ciclo do carbono, nitrogênio e enxofre. Em essência, microrganismos e suas enzimas decompõem materiais como fonte de nutrientes, em condições usuais de umidade, temperatura e pressão (LANDIM, et.al; 2016).

Os plásticos convencionais, originados de polímeros derivados do petróleo, causam sérios impactos ambientais devido à sua lenta degradação, alta massa molar e natureza hidrofóbica. Isso cria desafios para a atividade de microrganismos e suas enzimas na superfície desses polímeros (LANDIM, et.al; 2016).

Embalagens biodegradáveis possuem um processo de biodegradação mais rápido. Existem dois tipos de materiais biodegradáveis:

Bioplásticos - plásticos obtidos a partir de fontes naturais como milho, celulose, batata, ou sintetizados por bactérias, ou até mesmo oriundos de fonte animal, como a quitina, a quitosana e as proteínas. O polímero sintetizado deve possuir estruturas próximas aos naturais (aqueles hidrolisáveis a gás carbônico e água ou a metano) (LANDIM, et.al; 2016).

Fibras moldadas – trata-se da utilização de matérias-primas ricas em fibras tais como a fibra de coco, bagaço de cana ou bambu. O processo produtivo em geral consiste em tratar a fibra quebrando-a em fragmentos menores utilizando soda caustica, em seguida adicionar alguns aditivos para melhor sua resistência a umidade e ao óleo e por fim prensar o material no molde desejado (SEMPLE, 2022).

2.6 BAGAÇO

O bagaço da cana-de-açúcar é o resíduo fibroso da planta, obtido após extração do caldo da cana para a produção de açúcar e/ou etanol. Atualmente grande parte das usinas de açúcar e álcool utilizam da combustão do bagaço para a produção de vapor, que é utilizado no processo e na produção de energia elétrica. Cada tonelada de cana gera cerca de 300 kg de bagaço, logo uma grande quantidade desse resíduo é gerada. (HOFSETZ et al., 2012)

Podemos resumir o processo de obtenção de açúcar e álcool em 4 etapas: extração do caldo, tratamento do caldo, fabricação do açúcar e fabricação do álcool. O processo inicia com a extração, a cana de açúcar é lavada, picada, desfiada e enviada para as moendas onde por pressão o caldo se separa do bagaço. O caldo bruto extraído segue para o tratamento

químico, onde passa pelos processos de sulfitação, calagem e decantação com o objetivo de retirar os contaminantes orgânicos e inorgânicos provenientes do campo. O caldo clarificado segue para a fábrica de açúcar onde passa por vários evaporadores em série e se torna xarope. Em seguida o xarope segue para cozedores a vácuo onde se torna açúcar cristalizado. O açúcar segue para as centrífugas onde se separa os açúcares dos méis. O açúcar úmido segue então para os secadores e em seguida para o envase. A fabricação de açúcar gera um subproduto chamado de mel final que é encaminhado para a fábrica de álcool. O mel final é misturado a uma parte do caldo clarificado e adiciona-se o fermento. A fermentação alcoólica é responsável por transformar os açúcares dessa mistura em álcool. Após a fermentação obtém-se o vinho que segue para centrífugas para separar o mosto do fermento. Em seguida o mosto segue para a destilação, onde separa-se o álcool produzido dos demais compostos que são chamados de vinhaça. Em seguida o álcool é desidratado e segue para o estoque. (SEABRA, *et al.* 2011)

Desde 2007, a cana-de-açúcar é a principal fonte de energia renovável no Brasil (SEABRA, 2008) e segundo a União da Indústria de cana (UNICA) o Brasil moeu cerca de 607 toneladas de cana na safra de 2022/2023 (UNICA, 2023).

O bagaço de cana é constituído de aproximadamente 90% de fibra e medula (fração não fibrosa da cana) e 10% de extrativos, além de conter cerca de 50% de celulose em sua composição, sendo, portanto, uma ótima e abundante fonte para a sua obtenção (ARAÚJO, 2015).

2.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

2.7.1 Definição e histórico

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica desenvolvida para medir os possíveis impactos ambientais causados como resultado da produção e utilização de determinado produto ou serviço. A abordagem sistêmica da ACV é conhecida como do “berço ao túmulo”, na qual são levantados os dados de todas as etapas de produção e uso do produto, relativas à extração das matérias-primas, passando pela produção, distribuição até o consumo e disposição final, contemplando também reciclagem e reuso quando for o caso (IBICT).

A Coca Cola foi a responsável pelo primeiro estudo que pode ser entendido como ACV, o estudo foi realizado em 1965 nos Estados Unidos e tinha como objetivo determinar

qual embalagem para refrigerante possuía as menores emissões e utilizava menos recursos na fabricação. O estudo ficou conhecido como “Resource and Environmental Profile Analysis” (REPA)(IBICIT). A metodologia REPA foi aprimorada em 1974 pelo Midwest Research Institute (MRI) durante a realização de um estudo para a agência de proteção ambiental americana – EPA (Environmental Protection Agency) e se tornou a precursora do que hoje se conhece como ACV (MOURAD, 2002).

Em 1990 a 1993 a SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) organizou cerca de 9 conferências internacionais reunindo pesquisadores líderes da área de ACV, resultando na publicação do “*SETAC Guidelines for Life Cycle Assessment: a Code of Practice*”, o primeiro documento voltado à padronização da metodologia e que posteriormente viria orientar os trabalhos de normatização internacional da ISO (International Organization of Standardization) (MOURAD, 2002).

Atualmente a ISO possui as seguintes normas vigentes sobre ACV:

- ISO 14040:2006 Environmental management -- Life cycle assessment --Principles and framework.
- ISO 14044:2006 Environmental management -- Life cycle assessment - -Requirements and guidelines.
- ISO/TR 14047:2012 Environmental management -- Life cycle assessment - -Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations.
- ISO/TS 14048:2002 Environmental management -- Life cycle assessment – Data documentation format.
- ISO/TR 14049:2012 Environmental management -- Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis.
- ISO/TS 14071:2014 Environmental management -- Life cycle assessment -- Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006.
- ISO/TS 14072:2014 Environmental management -- Life cycle assessment - -Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment.

No Brasil, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) vigentes atualmente são as seguintes:

- ABNT NBR ISO 14040:2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida -Princípios e estrutura.

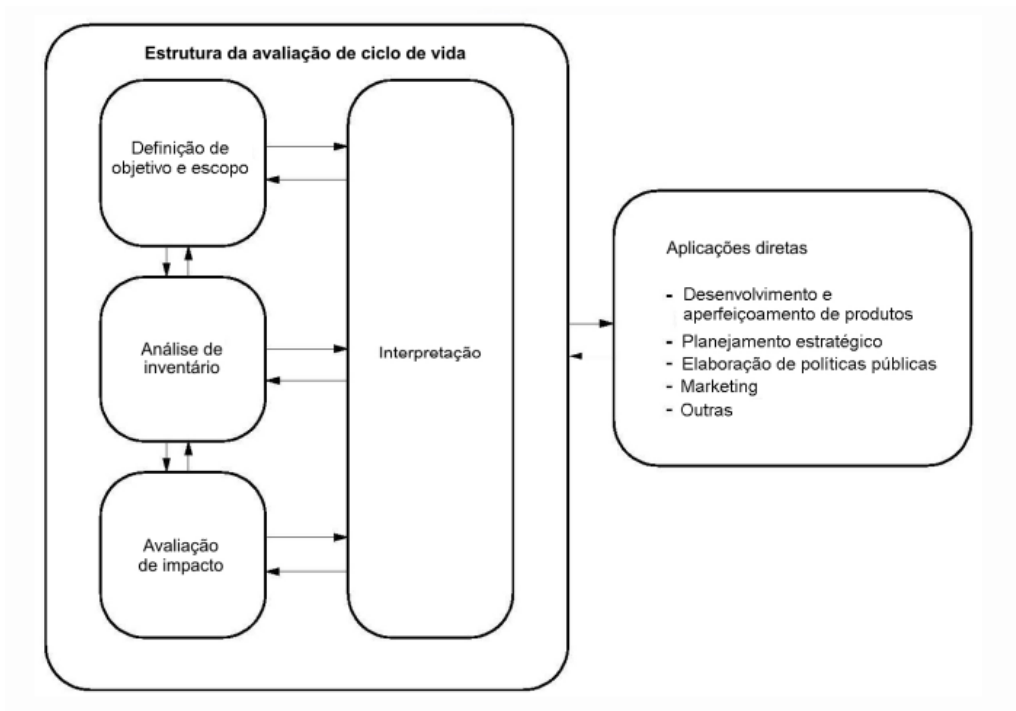
- ABNT NBR ISO 14044:2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida -Requisitos e orientações.

- ABNT ISO/TR 14049:2014 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário.

2.7.2 Método

Segundo a Norma ABNT NBR ISO 14040 um estudo ACV é dividido em quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. Conforme o esquema representado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Estrutura de um estudo ACV.



Fonte: Adaptado ABNT NBR ISO 14040, 2009.

2.7.2.1 Definição de objetivo e escopo

Trata-se da etapa onde se define as fronteiras do estudo, a quem se destinam os resultados, os critérios de qualidade, as regras de corte e quais as categorias de impacto serão utilizadas. (IBICT)

Segundo a Norma ABNT NBR ISO 14040 o escopo deve incluir:

- Função do sistema de produto: Estabelece o propósito e a utilidade do objeto ou serviço em análise.
- Sistema de Produto: Conjunto de processos fundamentais a partir dos quais a função é executada. Esses processos estão interligados por fluxos materiais e energéticos e consistem em entradas sem alterações humanas ou derivadas de outros processos fundamentais (produtos).
- Unidade Funcional: Quantifica a função do produto, representando um valor arbitrário utilizado como base para calcular as entradas e saídas do sistema.
- Fluxo de Referência: Indica a quantidade de produto necessária para atender à unidade funcional predefinida, obtida pela multiplicação da unidade funcional pelo desempenho técnico.
- Fronteiras do Sistema de Produto: Delimitam as fronteiras geográficas, temporais e de bens de capital que definem o conjunto de processos fundamentais que atendem à função. Geralmente, essas fronteiras são representadas por meio de diagramas de blocos do sistema.
- Critérios de exclusão de dados: Seleção dos aspectos ambientais a serem considerados em cada processo fundamental do sistema. Os critérios de exclusão podem ser baseados na representatividade mássica ou energética dos fluxos (abordagem quantitativa) ou em premissas de relevância ambiental (abordagem qualitativa).
- Procedimentos de alocação: Distribuição das contribuições dos fluxos (e os impactos ambientais associados) entre diferentes produtos. Os procedimentos de alocação são aplicados em três cenários: (i) quando um único processo gera vários produtos (por exemplo, refinarias); (ii) quando sistemas são compartilhados por diferentes processos (por exemplo, sistemas de tratamento de efluentes em petroquímicas); e (iii) quando materiais são reciclados em sistemas de produtos distintos (CRUZ, 2015).
- Requisitos de Qualidade: Especificação das características dos dados necessários para o estudo, alinhadas aos objetivos estabelecidos. Essas características incluem área geográfica, período de tempo, tecnologias envolvidas, fontes de dados (representatividade, precisão e incertezas) e capacidade de reprodução dos métodos utilizados.
- Metodologia para a avaliação de impacto: Definição das categorias de impacto, indicadores e modelo de avaliação de impactos ambientais a serem empregados no estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV).
- Limitações: Ausência de critérios universais de padronização dos métodos e formato de dados dos estudos ACV.

- **Análise Crítica:** Avaliação da conformidade dos requisitos adotados em relação à metodologia, dados e resultados (CRUZ, 2015).

2.7.2.2 Análise de Inventário

A análise de inventário compreende a coleta de dados e a aplicação de procedimentos de cálculo para mensurar as entradas e saídas pertinentes a um sistema de produto. Esse processo de análise é iterativo, evoluindo à medida que dados são reunidos e o entendimento sobre o sistema se aprofunda. Durante esse percurso, podem emergir novos requisitos ou limitações de dados, demandando ajustes nos métodos de coleta para assegurar a consecução dos objetivos do estudo. Em algumas situações, condições podem ser identificadas, exigindo revisões nos objetivos ou no escopo da pesquisa (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

2.7.2.3 Avaliação de Impacto

A fase de avaliação de impacto da Análise do Ciclo de Vida (ACV) tem como meta investigar a relevância dos potenciais impactos ambientais, utilizando os resultados do Inventário do Ciclo de Vida (ICV). De modo geral, esse processo engloba a associação de dados de inventário com categorias específicas de impacto e indicadores de categoria, visando compreender tais impactos. Além disso, a fase de Avaliação do Impacto da ACV fornece informações cruciais para a etapa de interpretação do ciclo de vida. Essa fase também pode envolver o processo iterativo de análise crítica dos objetivos e do escopo do estudo de ACV, com o intuito de determinar se os objetivos foram atingidos ou se é necessário ajustar o objetivo e o escopo caso a avaliação indique que não podem ser alcançados. Questões como a escolha, modelagem e avaliação de categorias de impacto podem introduzir subjetividades na fase de Avaliação do Impacto da ACV. Portanto, a transparência desempenha um papel crucial nesse processo, garantindo que os pressupostos estejam claramente descritos e reportados (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

2.7.2.4 Interpretação

A interpretação deve refletir a natureza relativa dos resultados da Avaliação do Impacto da ACV, indicando efeitos ambientais potenciais sem prever impactos reais nos pontos finais de categoria, extrapolando limites, considerando margens de segurança ou

riscos. As conclusões resultantes dessa interpretação podem se apresentar na forma de recomendações e conclusões destinadas aos decisores, em conformidade com os objetivos e o escopo do estudo. Além disso, a interpretação do ciclo de vida busca apresentar de maneira clara, completa e consistente os resultados da ACV, de acordo com a definição de objetivo e escopo do estudo. A fase de interpretação pode envolver um processo iterativo de análise crítica e revisão do escopo da ACV, bem como da natureza e qualidade dos dados coletados, em consonância com os objetivos estabelecidos. As conclusões da interpretação do ciclo de vida devem refletir os resultados da avaliação (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

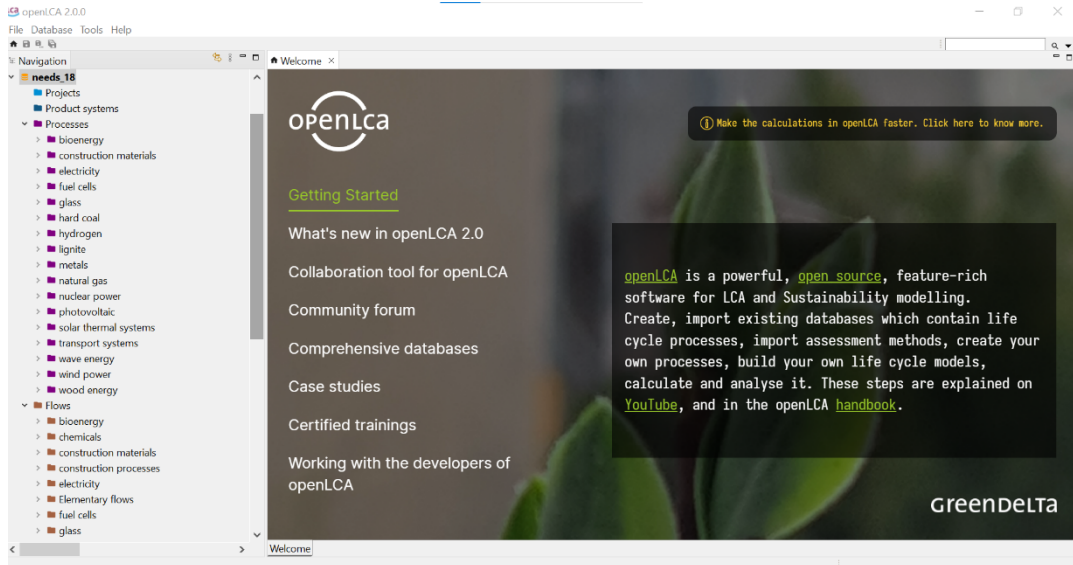
3.1.1 Software

Para realizar a análise utilizou-se o software OpenLCA, em sua versão 2.0.0. Trata-se de software gratuito e profissional de avaliação do ciclo de vida criado pela GreenDelta. O aplicativo possui uma ampla gama de funções e bancos de dados disponíveis gratuitamente que podem ser alterados por qualquer pessoa além de funcionar sem acesso à internet. Atualmente o software também permite modelos econômicos de avaliação de ciclo de vida (OPENLCA).

3.1.2 Banco de dados

Os bancos de dados são disponibilizados por algumas fontes e devem ser inseridos no aplicativo após a sua instalação. As bases podem conter fluxos (Flows) e/ou processos (Processes) como mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Tela do software openLCA.



Fonte: Acervo pessoal.

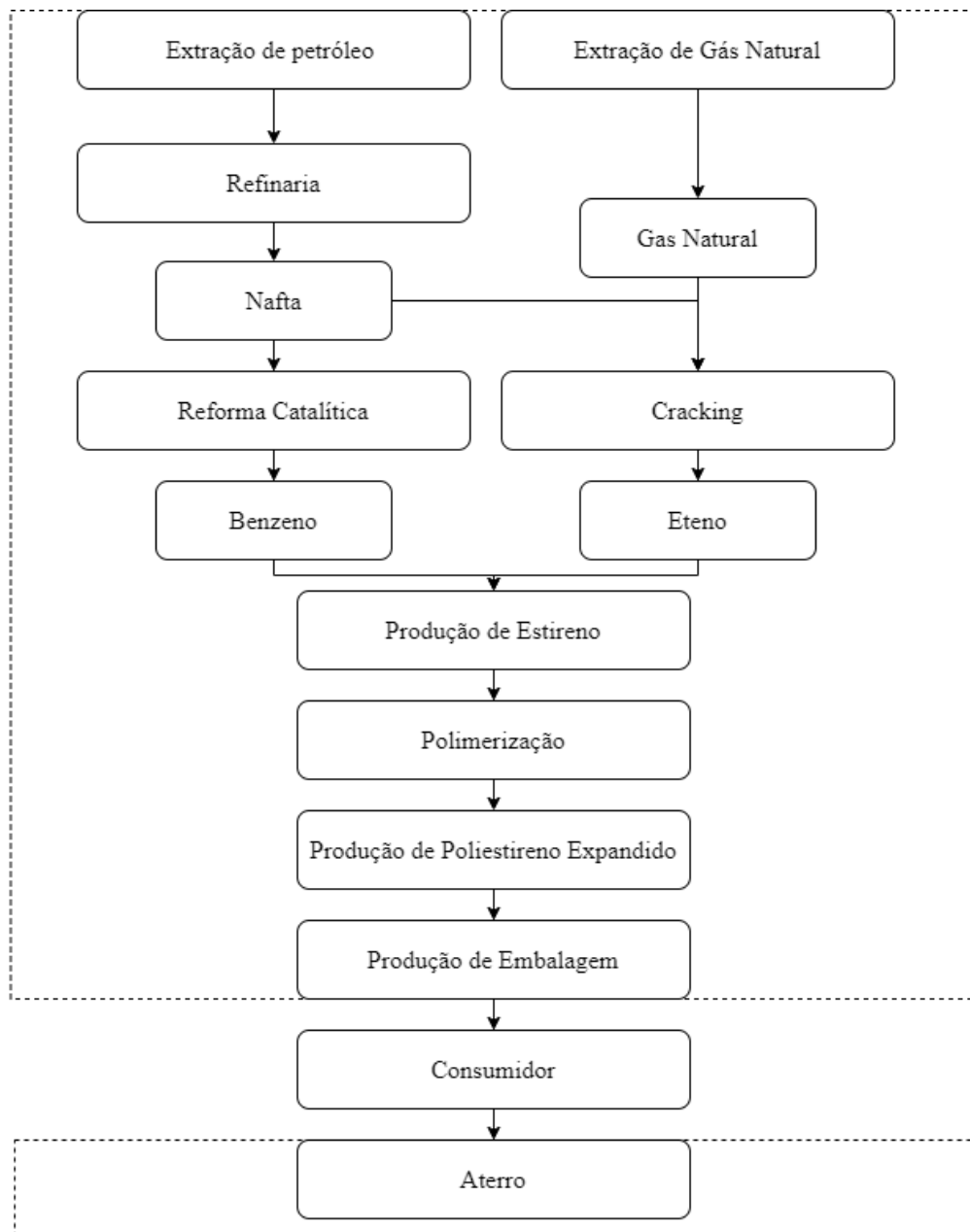
Para este trabalho utilizou-se as bases Agribalyse v3.0.1 (agribalyse_v301_27052021) e The Environmental Footprint (ef_secondarydata_202202).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Definição do escopo e dos limites de bateria

O presente trabalho visa avaliar os impactos ambientais do ciclo de vida do bagaço de cana de açúcar e do poliestireno expandido (EPS) empregados em embalagens de delivery de uso único. A unidade de análise é de 1 kg de embalagens produzidas e para o caso do bagaço foram consideradas duas opções para disposição final: aterro sanitário e compostagem. Também é válido ressaltar que para ambos os casos foram desconsideradas a fase de uso do cliente. Os limites do sistema dos dois tipos de embalagens são mostrados na Figura 3.2 e Figura 3.3.

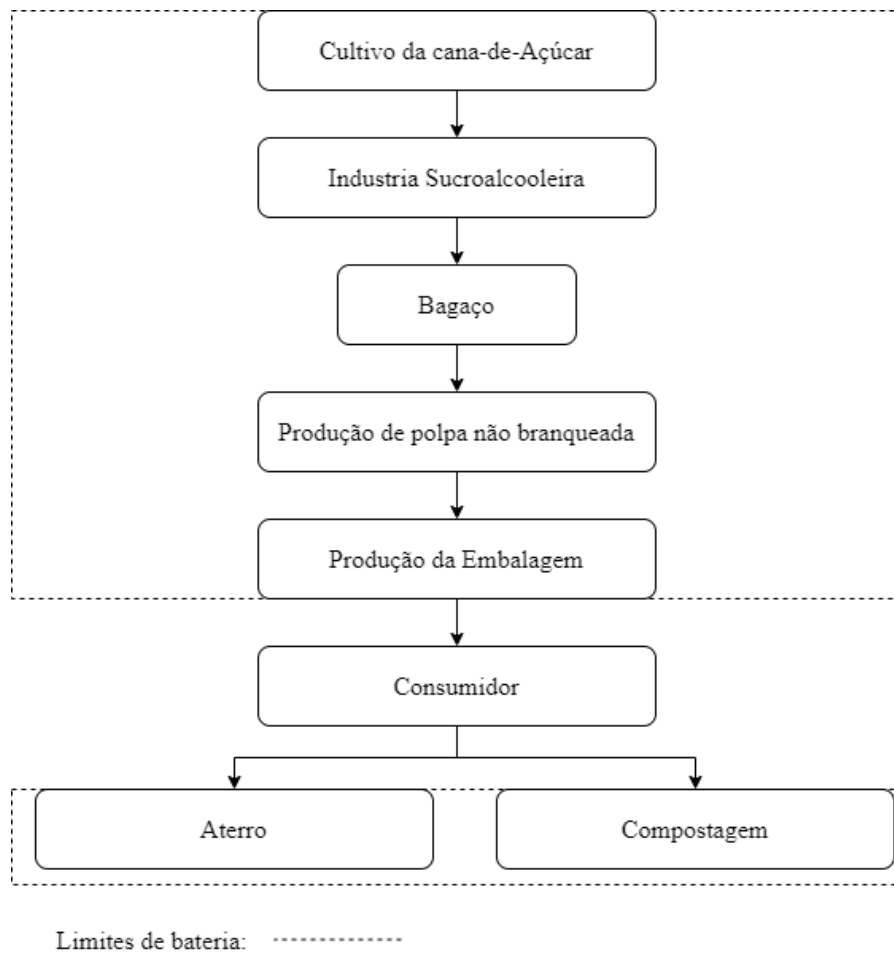
Figura 3.2: Cadeia de produção da embalagem de poliestireno expandido e limites de bateria considerados no presente trabalho.



Limites de Bateria -----

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3.3: Cadeia de produção da embalagem de bagaço e limites de bateria considerados no presente trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.2 Inventário das embalagens de EPS

Para a modelagem do fluxo da embalagem de EPS foram utilizados alguns processos já existentes no banco de dados e um confeccionado a partir de informações disponíveis na literatura.

Para o processo de extração das matérias primas (óleo cru e gás natural) até a entrega do poliestireno expansível na fábrica utilizou-se o fluxo *Polystyrene production* disponível na base Agrybalyse.

Seguindo para os processos de expansão e produção da embalagem considerou-se que ambos os processos são realizados na mesma fábrica. Para o processo de expansão foi necessário utilizar dados da literatura. Segundo a tese de Tatiane Cruz, o consumo específico de energia para essa etapa é de 41,63 MJ/Kg de EPS (CRUZ, 2015). Para o consumo de água,

Dolor R. Enarevba e Karl R. Haapalaa afirmam em seu artigo que o processo consome 174 kg/kg de matéria-prima (ENAREVBA; HAAPALAA, 2023). Para o rendimento do processo não foram encontrados valores consistentes, portanto considerou-se que o processo possui um rendimento de 90%. Os valores foram colocados no fluxo como mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Montagem do fluxo *Expanded polystyrene* no OpenLCA.

The screenshot displays the OpenLCA interface for the 'Expanded Polystyrene' flow assembly. It is divided into two main sections: 'Inputs' and 'Outputs'.

Inputs Table:

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/R...	Uncertai...	Avoide...	Provider	Data qu
Electricity, high voltage (BR) electricity produ...	Others/Ecoinvent ...	41.63000	MJ		none		electr...	
Polystyrene, expandable (RER) production ...	Others/Ecoinvent ...	1.11111	kg		none		polys...	
Water, cooling, unspecified natural origin/kg	Resource/in water	174.00...	kg		none			

Outputs Table:

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/R...	Uncertai...	Avoide...	Provider	Data qu...	Location	Descrip...
Poliestireno Ex...		1.00000	kg		none					

At the bottom of the interface, there is a navigation bar with tabs for: General information, **Inputs/Outputs**, Administrative information, Modeling and validation, Parameters, Allocation, Social aspects, and Impact analysis.

Fonte: Acervo pessoal.

No processo de expansão do poliestireno considerou-se que a energia utilizada viria de hidrelétricas, uma vez que a matriz elétrica brasileira ainda é composta majoritariamente por fontes hidráulicas. Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), em 2022, 61,9% da matriz elétrica brasileira veio de fontes hidráulicas. (EPE, 2024)

No processo de produção das embalagens por termoformagem utilizou-se outro fluxo já existente da base Agrobalyse referente a extrusão em linha e termoformagem de pellets plásticos para indústria alimentícia com um rendimento de 94% (dado retirado da descrição do fluxo).

Para o descarte da embalagem considerou-se que 100% do material iria para o aterro e empregou-se um fluxo já existente na base de dados. Para facilitar o entendimento, todos os fluxos utilizados foram colocados no Quadro 3.1 com seus respectivos comentários, fontes e local de modelagem.

Quadro 3.1: Fluxos utilizados para embalagem de EPS.

Fluxo	Database	Nome	Localidade	Fonte
Produção de Poliestirenos expansível	Agrobalys e v3.0.1	Polystyrene production, expandable	Europa	Os dados são derivados dos Ecoperfis da indústria europeia de plásticos (PlasticsEurope).
Produção de poliestirenos expandido	-	-	-	Elaborado pela autora
Produção de energia elétrica via hidroelétricas	Agrobalys e v3.0.1	Electricity, high voltage {BR} electricity production, hydro, reservoir, tropical region Cut-off, S - Copied from Ecoinvent	Brasil	Calculado com base em amostras de 55 reservatórios em regiões tropicais.
Produção da embalagem	Agrobalys e v3.0.1	Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline	França	Elaborado e apresentado pela Quantis, financiado, apoiado e acompanhado pela Eco-Emballages e Elipso
Descarte no Aterro	Agrobalys e v3.0.1	Treatment of waste polystyrene, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm)	Global	Não informado

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3 Inventário das embalagens de bagaço

No caso da embalagem de bagaço foi empregado um fluxo de produção de etanol, açúcar e eletricidade da base de dados da Agrobalyse, que incluía desde o cultivo da cana até a saída dos produtos da indústria. O inventário do fluxo se refere a produção de 1 kg de açúcar, 1 kg de etanol (95% p/p base seca, ou seja, 1,05 kg de etanol hidratado 95% base úmida), 1 kg de bagaço excedente, 1 kWh de energia elétrica e 1 kg de vinhaça.

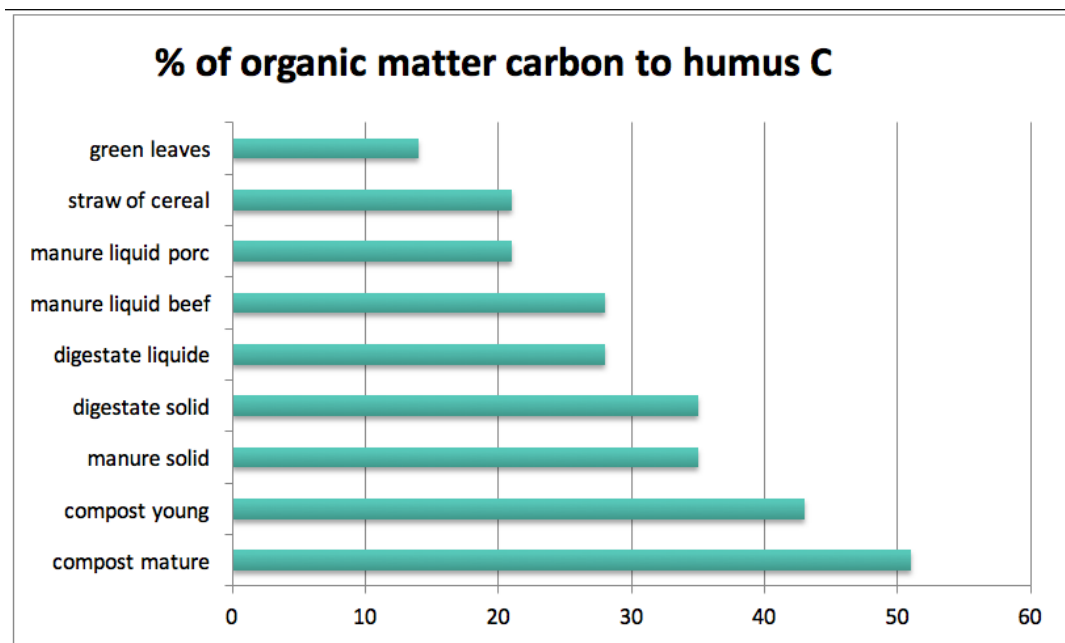
Para o tratamento da polpa considerou-se que o mesmo se assemelharia ao processo de produção de celulose kraft crua a partir da madeira, logo foi utilizado um fluxo já existente do processo disponível na base Environmental Footprint. Segundo o estudo de Magnos et al. o rendimento bruto do processo de polpação kraft do bagaço (em escala de bancada) é de 57,2% (relação entre peso seco de polpa e peso seco de bagaço). Considerando que o bagaço que sai da indústria de açúcar e álcool possui uma umidade de 50%, calculou-se que aproximadamente 3,49 kg de bagaço úmido gerariam 1 kg de polpa. Esses valores foram atualizados no fluxo já existente para melhor representar o processo.

Em seguida, a polpa seguiu para o processo de termoformagem das embalagens considerando o mesmo fluxo e rendimento do caso das embalagens de EPS.

Por último o processo teve duas possibilidades de fim de vida: o descarte no aterro e a compostagem. Na primeira opção foi utilizado um fluxo já existente referente a descarte de papelão em aterro, visto a similaridade entre o papelão e a embalagem de bagaço no que diz respeito a matéria prima, ambas são produzidas a partir de polpas celulósicas.

Para a compostagem empregou-se um fluxo da database Agrobalyse referente a compostagem industrial de resíduos biológicos. Considerou-se que o rendimento das embalagens de bagaço seria semelhante ao da palha de cereais, ou seja 21%. Na Figura 3.5 pode-se ver os rendimentos de cada material que foram informados pela própria descrição do fluxo.

Figura 3.5: Rendimento em porcentagem da compostagem para cada matéria orgânica.



Fonte: Software OpenLCA.

Novamente, todos os fluxos utilizados foram colocados no quadro 3.2 com seus respectivos comentários, fontes e local de modelagem a fim de facilitar o entendimento.

Quadro 3.2: Fluxos utilizados para embalagem de bagaço.

Fluxo	Database	Nome	Localidade	Fonte
Produção de Bagaço	Agrobalyse v3.0.1	Ethanol, 95% in H2O, from sugarcane molasses, at sugar refinery/BR U modif INRA	Brazil	Os dados são de vários produtores de açúcar e etanol no Brasil
Tratamento da polpa	Enviromental Footprint	Unbleached sulphite pulp, hardwood, at plant, production mix, per kg pulp	Europa	Não informado
Produção da embalagem	Agrobalyse v3.0.1	Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline	França	Elaborado e apresentado pela Quantis, financiado, apoiado e acompanhado pela Eco-Emballages e Elipso

Descarte no Aterro	Agrobalyse v3.0.1	Treatment of waste paperboard, inert material landfill	Suíça	Não informado
Compostagem	Agrobalyse v3.0.1	Treatment of biowaste, industrial composting Biowaste	Suíça	Não informado

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.4 Avaliação dos impactos ambientais

Para o presente trabalho utilizou-se o método CML-IA *baseline 2000*, este método foi criado em 2001 pela Universidade de Leiden na Holanda e se trata de um banco de dados que contém fatores de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida. O quadro 3.3 mostra as categorias de avaliação do método escolhido e seus respectivos fatores.

Quadro 3.3: Categorias de impacto do método CML-IA e seus fatores de caracterização.

Categoria	Fator de caracterização
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 100 anos (PAG ₁₀₀)
Depleção da camada de ozônio	Potencial de destruição de 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).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS

4.1.1 Bagaço e EPS

A figura 4.1 apresenta os resultados comparativos relativos das 11 categorias de impacto do ciclo de vida para 1 kg de embalagens de EPS e 1 kg de embalagens de bagaço, ambas tendo o aterro como destino de fim de vida. Utilizou-se o modelo de gráfico radar por ser uma representação comum em estudo de ACV, onde o impacto da cadeia de produto com o maior valor é representado como 100% e o impacto da outra cadeia é dado relativamente à primeira.

Figura 4.1: Resultados comparativos relativos da Avaliação do Ciclo de Vida para as embalagens de EPS e bagaço descartadas em aterro.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores obtidos de cada embalagem para cada categoria estão dispostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados de impactos dos ciclos de vida das embalagens de EPS e de bagaço.

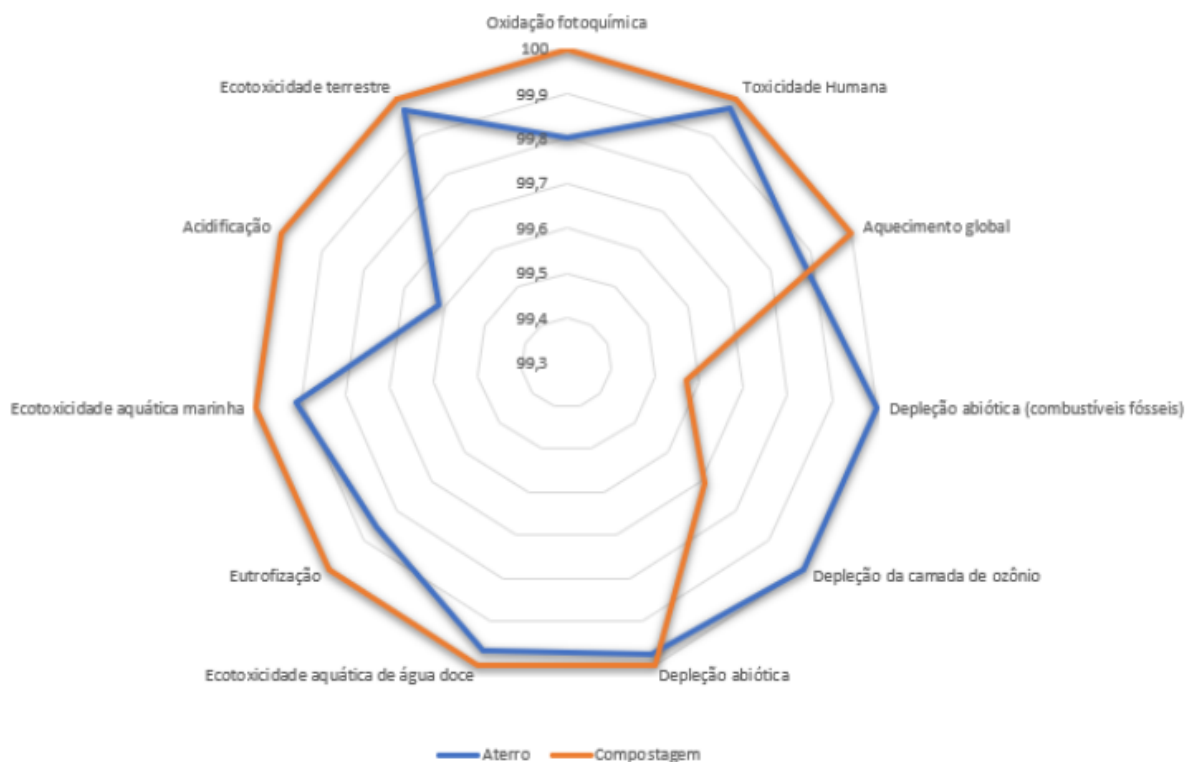
Categoria	Unidade	Embal. Bagaço	Embal. EPS
Depleção abiótica	kg Sb eq/ kg de minerais extraídos	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-6}$
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	MJ/kg de combustíveis fósseis consumidos	20,86	91,51
Aquecimento global	kg de CO ₂ eq/kg de emissão	4,95	5,40
Depleção da camada de ozônio	kg p/ CFC-11 eq/kg de emissão	$3,45 \cdot 10^{-7}$	$2,24 \cdot 10^{-7}$
Toxicidade humana	kg p/ DCB eq/Kg de emissão	2,83	1,32
Ecotox. aquática de água doce	kg p/ DCB eq/kg de emissão	2,34	2,10
Ecotox. aquática marinha	kg p/ DCB eq/kg de emissão	1999,26	5736,86
Ecotox. terrestre	kg p/ DCB eq/kg de emissão	$4,76 \cdot 10^{-2}$	$3,50 \cdot 10^{-3}$
Oxidação fotoquímica	kg de C ₂ H ₄ eq/kg de emissão	$4,44 \cdot 10^{-4}$	$9,75 \cdot 10^{-4}$
Acidificação	kg de SO ₂ eq/kg de emissão	$5,57 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$
Eutrofização	kg de PO ₄ eq/kg de emissão	$3,68 \cdot 10^{-2}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$

Fonte: Elaborado pela autora

4.1.2 Aterro e Compostagem

Como citado na metodologia a embalagem de bagaço tem como possibilidade de fim de vida a compostagem visto que se trata de um material biodegradável. A Figura 4.2 apresenta os resultados comparativos relativos das 11 categorias de impacto do ciclo de vida para 1 kg de embalagens de bagaço que seguiram para o aterro ou para a compostagem.

Figura 4.2: Resultados comparativos relativos da Avaliação do Ciclo de Vida para as embalagens bagaço descartadas em aterro e enviadas para compostagem.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores obtidos de cada sistema para cada categoria estão dispostos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados de impactos dos ciclos de vida das embalagens de bagaço com diferentes destinos de fim de vida.

Categoria	Unidade	Aterro	Compostagem
Depleção abiótica	Kg Sb eq/ kg de minerais extraídos	$1,67.10^{-5}$	$1,67.10^{-5}$
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	MJ/kg de combustíveis fósseis consumidos	20,86	20,77
Aquecimento global	Kg de CO ₂ eq/kg de emissão	4,95	4,95
Depleção da camada de ozônio	Kg p/ CFC-11 eq/kg de emissão	$3,45.10^{-7}$	$3,44.10^{-7}$
Toxicidade humana	Kg p/ DCB eq/Kg de emissão	2,83	2,83
Ecotox. aquática de água doce	Kg p/ DCB eq/kg de emissão	2,34	2,34
Ecotox. aquática marinha	Kg p/ DCB eq/kg de emissão	1999,26	2001,07
Ecotox. terrestre	Kg p/ DCB eq/kg de emissão	$4,76.10^{-2}$	$4,76.10^{-2}$

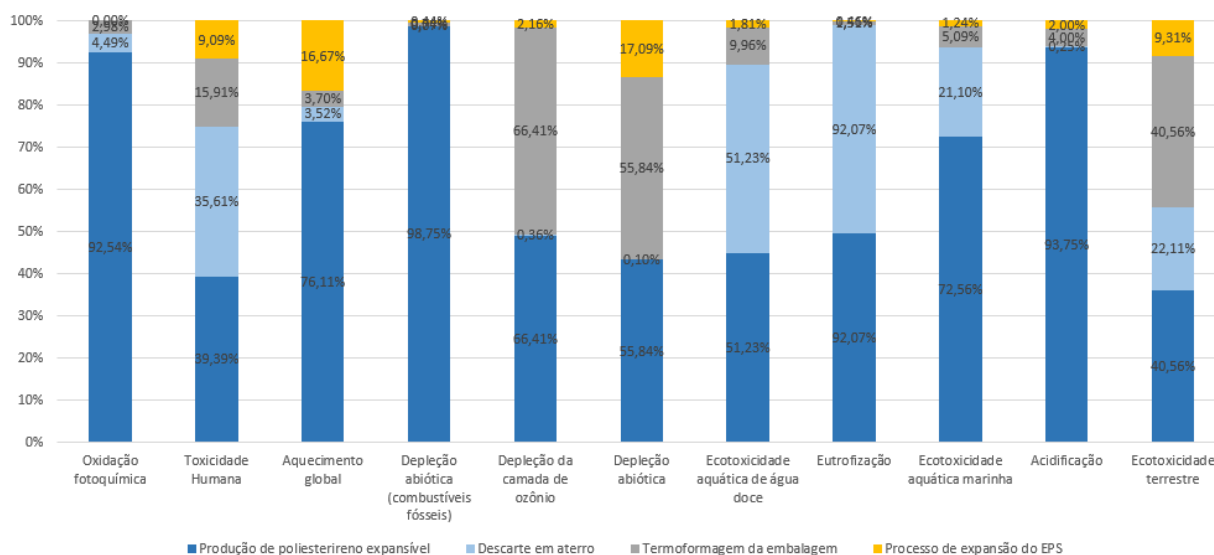
Oxidação fotoquímica	Kg de C ₂ H ₄ eq/kg de emissão	4,44.10 ⁻⁴	4,45.10 ⁻⁴
Acidificação	Kg de SO ₂ eq/kg de emissão	5,57.10 ⁻²	5,60.10 ⁻²
Eutrofização	Kg de PO ₄ eq/kg de emissão	3,68.10 ⁻²	3,69.10 ⁻²

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO POR ETAPA

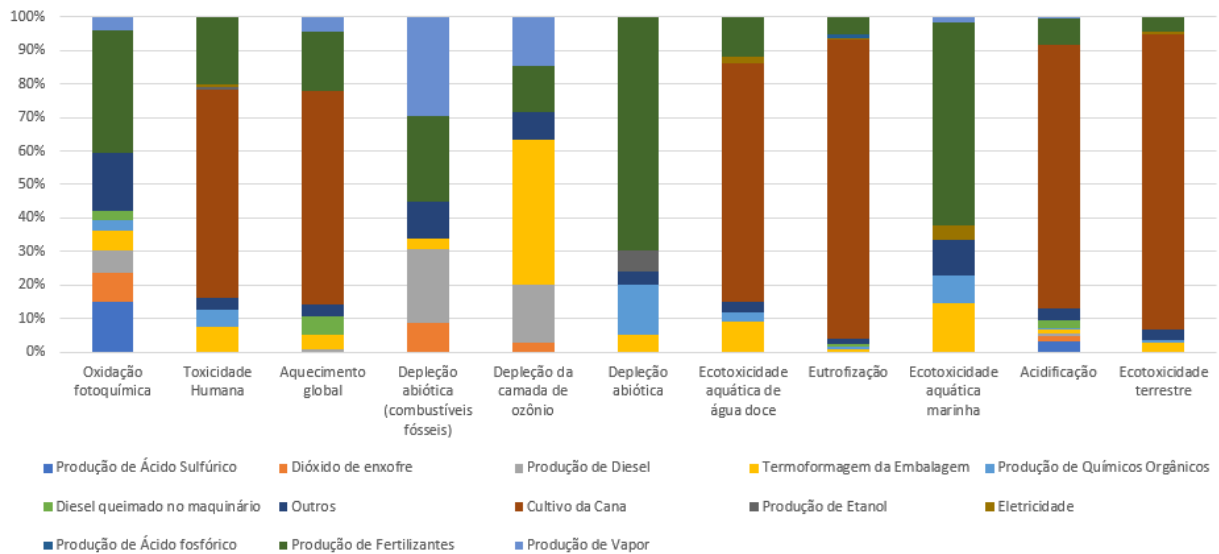
A ferramenta OpenLCA disponibiliza para seus usuários os valores que cada fluxo/processo acrescenta no valor final do ACV para cada categoria. Isso possibilita que o processo seja mapeado de uma forma mais direcionada, a fim de se conseguir enxergar melhorias no processo. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os fluxos dos processos das embalagens de EPS e das embalagens de bagaço descartadas em aterro divididos entre as 11 categorias de impacto.

Figura 4.3: Resultado da contribuição de cada etapa do ciclo de vida da embalagem de EPS para as onze categorias de impactos ambientais.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.4: Resultado da contribuição de cada etapa do ciclo de vida da embalagem de bagaço para as onze categorias de impactos ambientais.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 INTERPRETAÇÃO DO DADOS

É possível observar pelos resultados obtidos que as embalagens de bagaço obtiveram maiores impactos negativos ao meio ambiente, segundo o método CML-IA. No entanto, é importante analisar cada categoria isoladamente para conseguir uma resposta mais detalhada.

A categoria de depleção abiótica está relacionada ao impacto da escassez de recursos, sendo assim, um impacto ligado à extração de materiais. Como pode-se observar as embalagens de bagaço apresentaram um valor de ADP de $1,67 \cdot 10^{-5}$ kgSbeq que é aproximadamente 13 vezes maior que o valor atingido pelas embalagens de EPS que foi de $1,27 \cdot 10^{-6}$ kgSbeq. Como mostrada na Figura 4.4 a etapa com maior impacto nessa categoria para as embalagens de bagaço foi a produção de fertilizantes utilizados no cultivo da cana, principalmente os fosfatados e os nitrogenados que necessitam da extração de minerais para serem produzidos. Para a depleção abiótica de combustíveis fósseis, neste caso relacionado a escassez de recursos fósseis, os valores de PCI demonstraram um cenário oposto. As embalagens de EPS obtiveram um PCI de 91,51 MJ, que é aproximadamente 4 vezes maior que o das embalagens de bagaço que foi de 20,86 MJ. Esse resultado já era esperado uma vez que a base das embalagens de EPS são os petroquímicos básicos obtidos através da extração de petróleo e gás natural e isso também pode ser observado na Figura 4.3 onde a produção do poliestireno expansível representa 98,75% do valor total da categoria.

As embalagens de EPS também apresentaram um pior desempenho na categoria de oxidação fotoquímica. Os valores de OF das embalagens de EPS representam aproximadamente o dobro do valor das embalagens de bagaço. Nessa categoria a produção de poliestireno expansível representa quase 93% do valor, como mostra a Figura 4.3. Mostrando que o processo libera duas vezes mais compostos orgânicos voláteis que podem ser oxidados.

Nas 4 categorias de toxicidade (toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade aquática de água doce e marinha) as embalagens de bagaço demonstraram um pior desempenho na terrestre, na aquática de água doce e na humana. Em relação a ecotoxicidade em água doce os processos apresentaram valores similares, com uma diferença relativa de aproximadamente 13%. No entanto, na categoria terrestre as embalagens de bagaço atingiram um valor de $4,76 \cdot 10^{-2}$ Kgp/DCBeq que é 13 vezes maior que os $3,50 \cdot 10^{-3}$ Kgp/DCBeq resultantes das embalagens de EPS. Nessa categoria o cultivo da cana foi o processo que mais impactou no valor apresentado e esse efeito negativo ocorre devido ao uso de defensivos agrícolas (agrotóxicos) no plantio. O mesmo também ocorre na categoria de toxicidade humana, no qual os valores de HTP são 54% maiores para as embalagens de bagaço em relação as de EPS. Já na categoria de ecotoxicidade marinha, as embalagens de EPS demonstraram um impacto quase 3 vezes maior que as embalagens de bagaço, sendo a produção de poliestireno expansível responsável por 73% desse resultado.

Na categoria de acidificação as embalagens de bagaço indicaram um pior resultado em relação as embalagens de EPS, obtendo um resultado 4 vezes maior. Neste caso o cultivo da cana é o fator predominante, visto que o uso de fertilizantes nitrogenados e a decomposição da matéria orgânica fornecem amônio ao solo. O amônio (amônia em termos de substrato) passa pelo processo de nitrificação, que consiste na oxidação do amônio realizado por microrganismos gerando nitrito, água e prótons (H^+). Esse processo acidifica o solo e é por esse motivo que agricultores realizam a calagem com frequência. A calagem é a prática de se aplicar calcário no solo a fim de se corrigir o pH (EMBRAPA, 2022).

As embalagens de bagaço também apresentaram um pior desempenho na categoria de eutrofização, sendo cerca de 38% maior que o EPS. Novamente, o cultivo da cana é o fator predominante, como representado na Figura 4.4, visto que os fertilizantes fosforados e nitrogenados utilizados no plantio são posteriormente arrastados pelas águas da chuva para o leito dos rios (processo conhecido como lixiviação) ou se infiltram no solo, seguindo para lençóis freáticos.

Em relação a depleção da camada de Ozônio as embalagens de bagaço apontaram um valor 35% maior que as embalagens de EPS. Porém em ambas as embalagens, o processo de

termoformagem apresentou um valor elevado, representando quase 67% do valor nas embalagens de EPS (empatando com a produção de poliestireno expansível) e cerca de 43% do valor nas embalagens de bagaço (sendo o maior valor da categoria, segundo a Figura 4.4).

A última categoria a ser analisada é a de aquecimento global. Era esperado que nessa categoria o bagaço apresentaria resultados muito mais favoráveis do que o EPS, visto que se trata de um processo com matéria prima renovável (cana-de-açúcar). No entanto, isso não foi observado nos dados. As embalagens de bagaço apresentaram um PAG_{100} de 4,95 $kgCO_2eq$ que é aproximadamente 9,1% menor que o resultado atingido pelo EPS que foi de 5,40 $kgCO_2eq$. Nesta categoria o cultivo da cana e a fabricação de poliestireno expansível se mostraram como os maiores responsáveis pelo valor final de cada fluxo.

Em relação as embalagens de bagaço enviadas para a compostagem pode-se notar que não houve variações significantes nos impactos estudados o que era de se esperar uma vez que na Figura 4.4, a disposição final não apareceu como um dos processos relevantes.

Por fim, é importante mencionar que o atual estudo não considerou valores de captura e a utilização de fluxos originários de diferentes países pode ter afetado na qualidade dos valores obtidos.

4.2 COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS

Um estudo ACV do açúcar e do etanol derivados da cana-de-açúcar, realizado por Joaquim E. A. Seabra, Isaias C. Macedo, Helena L. Chum, Carlos E. Faroni e Celso A. Sarto em 2011, mostrou que a agricultura é responsável por cerca de 266 gCO_2eq/kg de açúcar dos 315 gCO_2eq/kg de açúcar do processo todo, ou seja, quase 84% (SEABRA, *et al.* 2011). O que faz relação com o resultado obtido no presente trabalho onde o cultivo da cana foi responsável por mais da metade das emissões na categoria de aquecimento global, atingindo cerca de 63,59% do valor. Xinyu Liu, Hoyoung Kwon, Michael Wang, e Don O'Connor também realizaram um estudo para determinar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) do etanol da cana de açúcar brasileira, e concluíram que o cultivo da cana contribui em 69,8% das emissões de gases do efeito estufa considerando um processo que se inicia na cana e termina na queima do motor do carro. Segundo o estudo a fonte dessas emissões são:

- Emissões de N_2O no campo provenientes de fertilizantes de Nitrogênio e resíduos de biomassa da cana: 24,3%;
- Uso de energia agrícola: 24,2%;
- Fabricação de fertilizantes de nitrogênio sintéticos: 6,8%;

- Emissões de CO₂ em campo proveniente da aplicação de ureia e calcário: 5,6%;
- Queima de palha de cana-de-açúcar a céu aberto: 5,1%;
- Fabricação de outros produtos químicos, incluindo fertilizantes P₂O₅, fertilizantes K₂O, calcários, pesticidas e gesso: 3,8%; (LIU, X. *et al.* 2023)

O estudo foi publicado em 2023 e segundo ele a redução de emissões de GEE durante o cultivo da cana pode ocorrer uma vez que os produtores substituam os combustíveis das máquinas agrícolas por combustíveis mais verdes, como por exemplo o diesel com um nível mais elevado de mistura de biodiesel ou etanol. Além de que se o Brasil eliminar com sucesso a queima a céu aberto em 2030, alcançará um potencial adicional de redução de GEE de 5,4% (LIU, X. *et al.* 2023).

Outro estudo ACV, desta vez realizado por Diana Ita Nagy e outros autores comparou 1 kg de polietileno, com a mesma quantidade de biopolietileno e 2 biocompósitos. O biopolietileno é um polímero obtido a partir do etanol da cana de açúcar, e para obter os compósitos foram utilizados 76% de biopolietileno, 20% de fibras de bagaço de cana (que receberam 2 tratamentos diferentes para quebrar as fibras gerando 2 amostras de biocompósitos) e 4% de MAPE (Polietileno anidro maleico, um aditivo químico utilizado para melhorar a resistência a tração do produto final) (NAGY, *et al.* 2020). Os resultados obtidos pelo estudo mostraram que o biopolietileno e os biocompósitos apresentaram valores de formação de ozônio, acidificação terrestre e eutrofização de água doce maiores que o polietileno como mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores por categoria de impacto para os quatro sistemas avaliados no estudo de Diana Ita Nagy e outros autores (dados relatados por unidade funcional: 1 kg de pellets).

Categoria de impacto	de Unidade	Polietileno	Biopolietileno	Biocompósito A	Biocompósito B
Aquecimento Global, sem captura de CO₂	kgCO ₂ eq	2,01	1,38	1,22	1,20
Aquecimento Global, com captura de CO₂	kgCO ₂ eq	2,01	-1,76	-1,79	-1,81
Formação de ozônio	kgNO _x eq	4,52.10 ⁻³	8,40.10 ⁻³	7,44.10 ⁻³	7,17.10 ⁻³

Acidificação terrestre	kgSO ₂ eq	5,27.10 ⁻³	2,17.10 ⁻²	1,91.10 ⁻²	1,84.10 ⁻²
Eutrofização de água doce	kgP _{eq}	2,79.10 ⁻⁵	4,80.10 ⁻⁴	4,13.10 ⁻⁴	3,99.10 ⁻⁴
Escassez de recursos fósseis	kg Óleo eq	1,57	0,41	0,41	0,40

Fonte: Adaptado de NAGY, et al. 2020.

A Tabela 4.3 também aponta que o biopolietileno e os biocompósitos obtiveram valores de aquecimento global inferiores ao do polietileno, e quase 40% desse resultado está relacionado com o cultivo e colheita da cana-de-açúcar. O cultivo da cana também foi o maior responsável pelos valores das categorias de acidificação terrestre, eutrofização da água doce e escassez de recursos fósseis para o biopolietileno e os 2 biocompósitos.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou o ACV para embalagens de bagaço de cana e poliestireno expandido, utilizando a metodologia CML-IA baseline 2000, cuja unidade de análise era de 1 kg. Das 11 categorias de impacto analisadas o bagaço apresentou um pior desempenho em 7 sendo elas ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade aquática de água doce, eutrofização, depleção abiótica, depleção da camada de ozônio, acidificação e toxicidade humana.

Nessas 7 categorias o cultivo da cana apareceu em 5 sendo a principal responsável pelos valores atingidos, foram elas: toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, eutrofização, acidificação e ecotoxicidade terrestre. A influência do cultivo da cana nos valores de emissões de GEE e potencial de aquecimento global também foram identificados nos estudos de NAGY D.I *et al.*, SEABRA, E.A.J *et al.* e LIU,X. *et al.*

O destino das embalagens de bagaço pouco impactou nos valores finais das 11 categorias. Mesmo sendo uma embalagem biodegradável essa vantagem não ficou evidente nos valores obtidos, uma vez que não houve grandes variações em nenhuma categoria ao se comparar as embalagens de bagaço com descarte em aterro e as embalagens de bagaço destinadas a compostagem.

Por fim é importante salientar que o presente estudo não contabilizou valores de captura de carbono e possuía algumas limitações no que diz respeito a utilização de fluxos de diferentes databases e de diferentes países. No entanto, concluiu-se as embalagens de bagaço não são uma alternativa mais sustentável que o poliestireno expandido e para os próximos trabalhos sugere-se a contabilização de carbono capturado e a utilização de fluxos que utilizam como base valores nacionais a fim de se ter uma análise mais precisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. L. *et al.* **Extração de celulose do bagaço de cana-de-açúcar para obtenção de celulose microcristalina.** Trabalho apresentado no IV Congresso Estadual de Iniciação Científica do IF Goiano, setembro de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). **Perfil 2022.** São Paulo, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BARES E RESTAURANTES (ABRASEL). **Delivery: tendências para este mercado em crescimento no Brasil.** Julho de 2023. <<https://abrase.com.br/revista/mercado/delivery-tendencias-para-este-mercado-em-crescimento-no-brasil/>>. Acesso em: outubro de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS (ABRE). **Estudo ABRE macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo Apresentação março de 2023: retrospecto de 2022.** Março de 2023. <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2022-2/>>. Acesso em: novembro de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro, 2009

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Aspectos gerais do poliestireno.** Rio de Janeiro, n. 16, p. 123-136, setembro de 2002.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Ficha de Informação Toxicológica – FIT**. Janeiro de 2012. Disponível em:<<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/etilbenzeno.pdf>>. Acesso em: novembro de 2023.

CRUZ, T. T. **Uso da avaliação do ciclo de vida para a determinação da redução de emissões de gases do efeito estufa e do consumo de energia associados à reciclagem de EPS**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2015.

EMBRAPA. **Calagem**. Fevereiro de 2022. < <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao/diagnose-das-necessidades-nutricionais/recomendacao-de-correcao-e-adubacao/calagem>>. Acesso em: dezembro de 2022.

ENAREVBA, D. R.; HAAPALAA, K.R. **A Comparative Life Cycle Assessment of Expanded Polystyrene and Mycelium Packaging Box Inserts**. Procedia CIRP, vol. 116, Pages 654-659, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. < <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em janeiro de 2024.

EPS BRASIL. **O que é EPS**. < <https://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>>. Acesso em: outubro de 2023.

HOFSETZ, K. ; SILVA, M. A. **Brazilian sugarcane bagasse: energy and non-energy consumption**. Biomass And Bioenergy, v. 46, p. 564-573, nov. 2012.

IFOOD. **Embalagens sustentáveis: quais são as vantagens para o meu negócio**. Abril de 2023. < <https://blog-parceiros.ifood.com.br/embalagens-sustentaveis/>>. Acesso em: dezembro de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **O que é Avaliação do Ciclo de Vida**. <<https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>>. Acesso em: setembro de 2023.

KANTAR. **Restaurants rebound while food delivery becomes a post-pandemic norm**. Novembro de 2022. <<https://www.kantar.com/company-news/restaurants-rebound-while-food-delivery-becomes-a-post-pandem>>. Acesso em: outubro de 2023.

LANDIM, A. P. M. *et.al.* **Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil**. Janeiro de 2016. <<https://www.scielo.br/j/po/a/Mnh695j5cVys99xsSSx54WM/?lang=pt#>>. Acesso em: dezembro de 2023.

LIU, X. *et al.* **Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Brazilian Sugar Cane Ethanol Evaluated with the GREET Model Using Data Submitted to RenovaBio**. Environmental Science & Technology, vol. 57, p. 11814–11822, 2023.

MACHADO, F. *et al.* **Uma Revisão Sobre os Processos de Polimerização em Suspensão**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 2, p. 166-179, março de 2007.

MONTAGNER, C. C. *et al.* **Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos**. Junho de 2021. <<https://www.scielo.br/j/qn/a/VJ58TBjHVqDZsvWLckcFbTQ#>>. Acesso em: dezembro de 2023.

MOURAD, A. L. *et al.* **Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações**. CETEA/CEMPRE, Campinas, 2002. 92p.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Poliestireno**. <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/poliestireno.htm#:~:text=A%20polimeriza%C3%A7%C3%A3o%20do%20estireno%20em,e%20esculpidas%20na%20forma%20desejada.>>. Acesso em: dezembro de 2023.

NAGY, D. I. *et al.* **Life cycle assessment of bagasse fiber reinforced biocomposites**. Elsevier B.V. 2020. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137586>>. Acesso em: dezembro de 2023.

OCEANA. **O mercado de delivery de refeições e a poluição plástica.** Brasília, 2022.

OPENLCA. < <https://www.openlca.org/>>. Acesso em: outubro de 2023.

SEABRA, J. E. A. *et al.* **Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use.** Biofpr: Biofuels, Bioprod. Bioref. Vol. 5, p. 519–532, 2011.

SEMPLE, K. E. *et al.* **Moulded pulp fibers for disposable food packaging: A state-of-the-art review.** Food Packaging and Shelf Life, vol. 33, setembro de 2022.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (ÚNICA). **Unicadata.** <<https://unicadata.com.br/>>. Acesso em: dezembro de 2023.