



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

HELENA SUZETE DE ANDRADE BONILLA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CELULOSE BACTERIANA COMO
ALTERNATIVA DE PLÁSTICOS NÃO BIO-DEGRADÁVEIS**

Recife

2023

HELENA SUZETE DE ANDRADE BONILLA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CELULOSE BACTERIANA COMO
ALTERNATIVA DE PLÁSTICOS NÃO BIO-DEGRADÁVEIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Graduação em
Engenharia Química da Universidade Federal
de Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador (a): Felipe Pedro da Costa Gomes

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Bonilla, Helena Suzete de .

Avaliação do ciclo de vida de celulose bacteriana como alternativa de
plásticos não bio-degradáveis / Helena Suzete de Bonilla. - Recife, 2023.
45 p. : il., tab.

Orientador(a): Felipe Pedro da Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química -
Bacharelado, 2023.

1. Celulose bacteriana. 2. Papel. 3. ACV. 4. Impacto ambiental. I. Gomes,
Felipe Pedro da. (Orientação). II. -, -. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

HELENA SUZETE DE ANDRADE BONILLA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CELULOSE BACTERIANA COMO
ALTERNATIVA DE PLÁSTICOS NÃO BIO-DEGRADÁVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia química.

Aprovado em: 27/09/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Yêda Medeiros Bastos de Almeida (1º Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Dra. Karina Carvalho de Souza (2º Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ricardo e Tamara Bonilla, por todo apoio, amor e incentivo para seguir meus sonhos e nunca desistir, independente das adversidades.

A minha irmã, Maria Bonilla, e meu namorado, Eduardo Ferreira, por serem meus maiores apoios e amigos em todos os momentos, desde os mais alegres até os difíceis.

As minhas amigas do Veneza, por serem mulheres incríveis e inspiradoras, sempre me incentivando e apoiando em todos os momentos que mais precisei.

Aos meus avós, Luis e Esther Bonilla e Eliana Andrade, por serem inspiração para minha vida e proporcionarem os melhores momentos da minha infância.

As amigas que desenvolvi durante minha vida acadêmica, que fizeram parte do meu dia a dia e permitiram ter uma vivência da faculdade mais alegre e motivada, em especial Beatriz, Sávio, Antônio, as primeiras amigas que tive na faculdade e se mantiveram até o fim.

Ao laboratório CHICO – DQF, em especial a minha co-orientadora de pesquisa, Yolice Moreno, e minha dupla Camilla Borba, por terem aberto as portas da pesquisa e mostrar que amigas conseguem deixar divertido 12 horas de síntese e 4 horas dentro de uma estufa cheia de cana-de-açúcar.

A UFPE, por me proporcionar mais do que um título de bacharel, mas experiências como ENACTUS, empresa júnior e iniciação científica, que me transformaram na pessoa que sou atualmente.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Química, por todo conhecimento que me foi passado e dedicação.

Ao meu orientador, Felipe Pedro da Costa Gomes, por toda paciência e cuidado para me ajudar a desenvolver esse trabalho.

Por fim, a Deus, por ter me dado força e persistência em todos os momentos que pensei que não iria conseguir.

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.”
(Paulo Freire).

RESUMO

Um dos materiais que mais vêm gerando impacto ambiental negativo são os plásticos não biodegradáveis, materiais que em sua maioria são derivados de petroquímicos e demoram um longo tempo para se decompor ao ser descartado em aterros sanitários. Dessa forma, surge como alternativa para esse tipo de plástico materiais a base de celulose bacteriana (CB), um polissacarídeo que possui características chamativas como sua alta capacidade de absorção de água, alto grau de cristalinidade, alto grau de pureza entre outras características, além de ser biodegradável. Entretanto, apesar de ser um produto em busca de competir com outros materiais tradicionais, é importante avaliar quais os impactos ambientais da produção desse tipo de material. Assim, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) pode ser utilizada para avaliar diferentes etapas da produção do berço ao túmulo com objetivo de otimizar processos e reduzir impactos ambientais. O projeto desenvolvido teve como objetivo comparar a produção de sacolas de papel e sacolas de polietileno (PE), além de avaliar a substituição do papel kraft produzido a partir da celulose vegetal pelo papel produzido a partir da CB. Para realizar a ACV, o programa OpenLCA com a base de dados da *Environmental Footprints* e dados de produção em escala laboratorial do papel a partir da CB. Os resultados obtidos apresentam um menor impacto ambiental na produção de sacolas de papel a partir da celulose vegetal. Entretanto, a produção de papel kraft apresentou resultados consideravelmente inferiores que a produção da celulose bacteriana. Com a análise de sensibilidade, pode-se perceber que o rendimento da produção de papel a partir da membrana de CB causa uma maior influência nos resultados de impacto ambiental encontrados. Por conta dos resultados obtidos, chegou-se a conclusão que a produção de papel a partir da celulose bacteriana estudada ainda necessita uma maior otimização em relação ao consumo energético e rendimento para que seus impactos ambientais sejam reduzidos e sua produção possa se tornar uma opção viável de produção industrial em escala.

Palavras-chave: Celulose bacteriana; Papel; ACV; Impacto ambiental.

ABSTRACT

One of the materials that has been generating a negative environmental impact is non-biodegradable plastics, which are mostly derived from petrochemicals and take a long time to decompose when disposed of in landfills. As an alternative to this type of plastic, materials based on bacterial cellulose (BC) have emerged. Bacterial cellulose is a polysaccharide that possesses attractive characteristics such as its high water absorption capacity, high degree of crystallinity, high purity, among other features, and it is also biodegradable. However, despite being a product aimed at competing with traditional materials, it is important to assess the environmental impacts of the production of this type of material. Therefore, Life Cycle Assessment (LCA) can be used to evaluate different stages of production from cradle to grave with the aim of optimizing processes and reducing environmental impacts. The project developed aimed to compare the production of paper bags and polyethylene (PE) bags, as well as evaluating the substitution of kraft paper produced from plant cellulose with paper produced from BC. To perform the LCA, the OpenLCA program was used along with Environmental Footprints database and laboratory-scale production data for BC-based paper. The results obtained show a lower environmental impact in the production of paper bags from plant cellulose. However, the production of kraft paper showed considerably lower results than the production of bacterial cellulose. Sensitivity analysis revealed that the yield of paper production from BC membrane has a greater influence on the environmental impact results. Based on the results obtained, it can be concluded that the production of paper from the studied bacterial cellulose still requires further optimization in terms of energy consumption and yield in order to reduce its environmental impacts and become a viable option for industrial-scale production.

Keywords: Bacterial cellulose; Paper; LCA; Environmental impact.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Estrutura da ACV	21
Figura 2	Etapas de uma análise de inventário	24
Figura 3	Fase de interpretação para cada etapa da ACV	26
Figura 4	Processo de produção para sacolas de polietileno	28
Figura 5	Processo de produção de sacolas de papel	28
Figura 6	Informações do processo escolhido para comparação da produção de papel através da CB	28
Figura 7	Informações sobre a sacola de polietileno	29
Figura 8	Produção da embalagem de celulose bacteriana	30
Figura 9	Inputs e outputs para a produção de celulose bacteriana	31
Figura 10	Informações sobre consumo energético pela estufa	31
Figura 11	Processo de produção do papel através de celulose bacteriana	32
Figura 12	Consumo de água da produção de sacolas de plástico versus de papel	35
Figura 13	Utilização de recurso fóssil da produção de sacolas de plástico versus de papel	35
Figura 14	Mudança climática da produção de sacolas de plástico versus de papel	36
Figura 15	Principais processos responsáveis pelo consumo de água	36
Figura 16	Principais processos responsáveis pela utilização de recursos fósseis	37
Figura 17	Principais processos responsáveis pela mudança climática	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Definição de diferentes tipos de plástico.	15
Tabela 2	Classificação de plásticos.	16
Tabela 3	Valores de referência para cada simulação.	29
Tabela 4	Comparativo dos resultados de impacto obtidos para a produção de sacolas de polietileno e sacolas de papel.	33
Tabela 5	Valores de emissão de gases do efeito estufa em kg CO ₂ eq.	34
Tabela 6	Valores de referência para análise de sensibilidade de consumo energético.	38
Tabela 7	Diferença após a redução de 25% e 50% do consumo energético.	38
Tabela 8	Resultados para a análise de sensibilidade para o rendimento da CB produzida.	39
Tabela 9	Resultados para a análise de sensibilidade para o rendimento do papel produzido.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de impacto do ciclo de vida
CB	Celulose Bacteriana
CV	Celulose Vegetal
ICV	Inventário do ciclo de vida
PBS/A	Poli(succinato de butileno/adipato)
PE	Polietileno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	14
2	ESTADO DA ARTE	15
2.1	CELULOSE BACTERIANA	15
2.1.1	<i>Plásticos biobaseados</i>	15
2.1.2	<i>Propriedades e aplicações</i>	17
2.1.3	<i>Produção</i>	19
2.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	19
2.1.1	<i>Fases da ACV</i>	20
2.1.1.1	Definição de objetivo e escopo	21
2.1.1.2	Análise de inventário	23
2.1.1.3	Avaliação de impacto	25
2.1.1.4	Interpretação dos resultados	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	SOFTWARE	27
3.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	27
3.2.1	<i>Definição do objetivo e escopo</i>	27
3.2.2	<i>Avaliação de inventário</i>	28
3.2.2.1	Produção de papel pela celulose bacteriana	29
3.2.2.2	Análise de sensibilidade	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	COMPARATIVO DOS IMPACTOS CAUSADOS PELA PRODUÇÃO DE SACOLAS DE POLIETILENO VERSUS PAPEL	33
4.2	PRODUÇÃO DE PAPEL KRAFT A PARTIR DE CELULOSE BACTERIANA	34
4.2.1	<i>Comparativo dos impactos causados pela produção de papel kraft a partir de celulose vegetal e celulose bacteriana</i>	34
4.2.1.1	Análise de sensibilidade do consumo energético	38
4.2.1.2	Análise de sensibilidade do rendimento do processo	39
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, pode-se observar a crescente preocupação em reduzir a quantidade de materiais que causam um maior impacto ambiental negativo. Dentre esses, destacam-se os plásticos, que possuem propriedades mecânicas específicas, como apresentarem uma grande durabilidade. Tais materiais possuem uma ampla utilização em diversas áreas, como o uso em embalagens flexíveis (Poli(tereftalato de etileno), na indústria eletrônica (Poli(cloreto de vinila) e automobilística (Polietileno de alta densidade), com sua matéria-prima derivada de petroquímicos (Piatti et al., 2005).

Entretanto, apesar de toda versatilidade, a cadeia produtiva da reciclagem de plásticos possui um ciclo muito complexo, principalmente por ser necessária uma separação bastante criteriosa para os plásticos pós-consumo. De acordo com Zanin et al. (2015), as etapas para essa cadeia de reciclagem são: surgimento do plástico, descarte seletivo, coleta seletiva, triagem e acondicionamento, reciclagem, industrialização, comercialização e consumo, reiniciando sua cadeia de reciclagem. Uma etapa muito difícil de aplicar nessa cadeia é a triagem, pois muitos plásticos são difíceis de reciclar devido às diferenças em suas composições químicas e à falta de infraestrutura adequada. Isso resulta em baixas taxas de reciclagem e em um grande volume de plásticos descartados em aterros sanitários ou no meio ambiente.

Apesar da grande durabilidade, alguns materiais possuem um tempo de consumo muito pequeno, como uma garrafa de água, que é consumida em questão de segundos, precisando ser descartada em seguida. Caso o destino dessa garrafa seja um aterro sanitário, é possível concluir que a garrafa continuará intacta no mesmo local mesmo após décadas, resultando em um grave problema ecológico. O impacto dos plásticos no ambiente marinho também tem tido um grande destaque, com maior ênfase no aumento da presença de microplásticos, materiais poliméricos sintéticos com tamanho menor que 5 mm e que podem afetar organismos aquáticos em níveis mais baixos da cadeia alimentar até, potencialmente, alcançar a humana (Olivatto et al., 2018). Kakadellis et al (2020) afirma que, independentemente de como seja administrado o resíduo plástico, o mesmo continuará produzindo um impacto ambiental.

Dessa maneira, tem-se a necessidade de desenvolver novas tecnologias para a produção de materiais que causem um menor impacto ambiental negativo, substituindo os plásticos à base de petróleo. Picollo et al (2017) apresenta uma alternativa com o uso da pele de tilápia como curativo biológico temporário em queimaduras de segundo grau superficiais e profundas com testes inicialmente em ratos. Da mesma forma, Anaya et al. (2013) também relatou o uso do filme de quitosana como bandagem para finalidades semelhantes, além de apresentar as propriedades antissépticas do biopolímero. Dentre esses materiais, a celulose vegetal é o

polímero não tóxico de maior abundância na terra, proveniente de planta e madeira que pode ser utilizada para a produção de monômeros através de processos catalíticos que, por sua vez, podem ser transformados em biopolímeros com numerosas aplicações (Amorim et al., 2020).

Entretanto, a produção de nanocelulose apresenta algumas adversidades, como um grande investimento financeiro, uso de vários químicos e métodos mecânicos com grande gasto energético. Uma possível alternativa para a celulose vegetal, a celulose bacteriana surge em 1886, descoberta por A. J. Brown a partir da fermentação do vinagre (Rajwade et al., 2015). A celulose bacteriana pode ser produzida a partir de diversas espécies de bactérias, como as bactérias gram-negativas *Acetobacter*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium* e a bactéria gram-positiva *Sarcina ventriculi*, entre outras. Em comparação com a celulose vegetal, a celulose bacteriana possui uma maior capacidade de absorção de água, maior cristalinidade, porosidade, área superficial entre outras características (Wang et al., 2019). A celulose bacteriana possui diversas aplicações, destacando-se, entre elas, o uso em cosméticos, fármacos e produtos medicinais, além de embalagens, aditivos para tintas, revestimentos, diafragmas para transdutores eletromagnéticos e reforço para papéis de alta qualidade (Costa et al., 2018). Entretanto, apesar de suas excelentes características, a produção da celulose bacteriana também apresenta alguns gargalos em larga escala, como o baixo rendimento obtido nos sistemas de cultivo (Silva, 2019).

Por conta da necessidade de desenvolver produtos mais sustentáveis, não basta ter um processo produtivo mais verde, mas também se faz necessária uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do produto como um todo. A ACV é uma ferramenta essencial para analisar e compreender os impactos ambientais de um produto ao longo de todas as etapas de seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o seu descarte final. Com o aumento da preocupação global com a sustentabilidade e a necessidade de minimizar os impactos negativos no meio ambiente, a ACV se tornou uma abordagem crucial para a avaliação do desempenho ambiental de produtos e para a identificação de oportunidades de melhoria (Silva, 2019).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação de ciclo de vida da celulose bacteriana com o objetivo de sugerir uma fonte alternativa para a utilização de plásticos obtidos a partir de petroquímicos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o ciclo de vida da celulose bacteriana como alternativa para produção de papel kraft.

1.1.1 *Objetivo específico*

- Realizar um comparativo entre as Avaliação do Ciclo de vida da produção de sacolas de polietileno e da produção de sacolas de papel;
- Propor um fluxograma do processo produtivo de papel a partir da celulose bacteriana;
- Realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida da celulose bacteriana a partir do fluxograma definido previamente;
- Avaliar a possibilidade de utilização da celulose bacteriana como substituto de plásticos a base de petroquímicos.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 CELULOSE BACTERIANA

2.1.1 Plásticos biobaseados

Os plásticos biobaseados surgem como uma oportunidade de diminuir a dependência de recursos não renováveis e explorar o uso de recursos renováveis, como biomassa, além de poder diminuir o impacto ambiental se comparado com os plásticos convencionais. De início, faz-se necessário explicar a diferença entre alguns termos. Na Tabela 1, pode-se observar as definições da União Internacional de Química Pura e Aplicada (*International Union of Pure and Applied Chemistry* - IUPAC para plásticos, bioplásticos, plásticos biobaseados, além das definições de plásticos degradáveis, biodegradáveis e compostáveis (Lambert et al., 2017).

Tabela 1. Definição de diferentes tipos de plástico.

Termo	Definição
Plástico	Material que contém substâncias orgânicas poliméricas que podem ser moldados durante a fabricação ou processamento
Bioplástico	Derivado de biomassa ou de monômeros derivados de biomassa
Plástico Biobaseado	Contém carbono orgânico derivado de fontes naturais, como vegetais, fungos entre outros
Plástico degradável	Plástico projetado para ter alterações em sua estrutura química em determinados ambientes, perdendo algumas propriedades
Plástico biodegradável	Suscetíveis à degradação por atividade biológica, como através de bactérias, fungos ou algas
Plástico compostável	É degradado na compostagem, produzindo CO ₂ , água, biomassa, sem deixar resíduos tóxicos, a uma taxa consistente.

Fonte: Autora, 2023.

Dentre essas terminações, a IUPAC recomenda o uso do termo polímeros verdes em vez de bioplástico, pois pode dar uma falsa percepção que todo bioplástico é biodegradável. Vale ressaltar que existem alguns materiais plásticos derivados de petróleo que são biodegradáveis, como o poli(succinato de butileno/adipato) (PBS/A), porém apenas por certas enzimas presentes em microrganismos. Em paralelo, também existem plásticos biobaseados com alto grau de substituição que não são considerados biodegradáveis (Iwata, 2015). Na Tabela 2, é

possível observar alguns exemplos de plásticos de matéria-prima renovável ou petroquímica que são biodegradáveis ou não.

Tabela 2. Classificação de plásticos.

	Plásticos biobaseados (fontes renováveis)	Plásticos a base de petroquímicos (fonte fóssil)
Plásticos		
biodegradáveis	Poli(ácido láctico) (PLA) Poli(hidroxialcanoato) (PHA) Derivados de polissacarídeos (baixo DS) Poli(ácido âmico)	Poli(ε-caprolactona) (PCL) Poli(succinato de butileno/adipato) (PBS/A) Poli(buteno com aditivo de tereftalato) (PBA/T)
Plásticos não		
biodegradáveis	Derivados de polissacarídeos (alto DS) Poli(ol-Poliuretano) Bio-Polietileno Bio-Poli(tereftalato de etileno) (bio-PET)	Polietileno (PE) Polipropileno (PP) Poliestireno (PS) Poli(tereftalato de etileno) (PET)

Fonte: Autora, adaptado de Iwata, 2015.

Dessa forma, é preciso entender que a troca de um plástico de base petroquímica por um biobaseado não necessariamente garantirá que o mesmo seja biodegradável. Kakadellis et al. (2020) também apresenta a ressalva da necessidade de assegurar que a utilização de plásticos biobaseados e biodegradável realmente traga benefícios ao meio ambiente em comparação com os plásticos já utilizados, pois o fator de ser biobaseado e biodegradável não devem ser as únicas variáveis a serem consideradas.

Dentre esses termos, a celulose bacteriana (CB) pode ser definida como um plástico biobaseado biodegradável, sendo um polímero produzido por certas bactérias através do processo fermentativo que, ao ser composta principalmente por celulose, pode ser decomposta por microrganismo presentes no meio ambiente. A celulose bacteriana foi descoberta em 1886 por Adrian J. Brown, químico britânico, a partir de um estudo de fermentação acética em que o mesmo observou o crescimento de uma película gelatinosa de estrutura química equivalente à da celulose vegetal (Esa et al., 2014).

2.1.2 Propriedades e aplicações

A celulose ($C_6H_{10}O_5$)_n é um polissacarídeo composta por monômeros de D-glicose conectadas por ligações glicosídicas. As principais características da CB é o alto grau de pureza, transparência, alto grau de cristalinidade e alta capacidade de absorção de água, graças a estrutura da sua microfibrilas formadas por uma fina rede tridimensional nanofibrilar. Ainda por conta da sua estrutura, a CB é insolúvel em água e solventes orgânicos comuns, além de ser resistente à hidrólise enzimática e química (Amorim et al., 2020).

Apesar de ambas serem celulosas naturais, há diferenças entre as características físico-químicas e morfológicas da celulose vegetal (CV) e bacteriana. Algumas dessas diferenças, de acordo com (Wang et al., 2019), são:

- Propriedades mecânicas: a celulose bacteriana possui alta resistência mecânica, elasticidade e flexibilidade, com seu módulo de Young para a fibra de CB igual a 78 GPa contra 0,170 – 2,5 MPa da CV, podendo ser esticada sem quebrar;
- Pureza: O grau de pureza da CB é maior por ser produzido a partir de bactérias, enquanto a celulose vegetal é obtida de plantas, que está associada a outros componentes, como lignina e hemicelulose;
- Porosidade: A CB possui um percentual de porosidade maior que 85%, enquanto que a CV é maior que 75%, apresentando maiores capacidades adsorptivas;
- Tamanho das fibras: As fibras de CB podem chegar a tamanho nanométricos entre 20 e 100 nm, enquanto que as fibras de CV possuem escala micrométrica.

É importante ressaltar que as propriedades da celulose bacteriana podem variar dependendo das condições de cultivo das bactérias, do processo de produção e das técnicas de modificação utilizadas. A utilização de diferentes bactérias pode gerar diferentes morfologias, estruturas e propriedades (Wang et al., 2019).

A celulose bacteriana apresenta uma vasta gama de aplicações, graças às suas excelentes propriedades mecânicas e físico-químicas, podendo ser utilizada em áreas como indústria farmacêutica e de cosméticos, para aparelhos eletrônicos e aplicações médicas (Amorim et al., 2020).

Para a indústria de alimentos, se destaca o uso da CB em embalagens sustentáveis, em que a mesma possui barreira a gases, sendo um material transparente com boas propriedades mecânicas, porém também pode ser utilizado na produção de alimentos como agente espessante, estabilizante e gelificante (Silva, 2019; Amorim et al., 2020). Albuquerque et al.

(2021) apresenta uma mistura estável de CB com Poli-3-hidroxibutirato (PHB) para embalagens que, ao adicionar óleo de cravo como aditivo, apresenta atividades antimicrobianas que impedem a proliferação de bactérias quando em contato com os alimentos, além de apresentar novas características térmicas e mecânicas muito boas para a fabricação de embalagens (Amorim et al., 2020).

A celulose bacteriana também pode ser amplamente empregada em aplicações médicas, sendo amplamente utilizada em curativos para tratamento de ferimentos, membranas para processos de cicatrização de feridas crônicas e queimaduras, suturas, implantes e matrizes para engenharia de tecidos (Amorim et al., 2020). Sua biocompatibilidade, capacidade de retenção de água e estrutura semelhante a tecidos naturais a tornam um material valioso no campo da medicina. Sua capacidade de ser moldada também é muito importante para essa área, em que foi estudado o uso de tubos de CB para substituição de vasos sanguíneos (Wang et al., 2019). É importante ressaltar que a celulose bacteriana não se degrada rapidamente no organismo humano por conta do seu alto grau de cristalinidade e pela falta de enzimas que quebrem as ligações presentes na celulose. Esse fato, entretanto, é favorável para algumas aplicações médicas, pois uma aplicação de CB no dorso nasal de coelhos apresentou, ao fim de seis meses, uma leve fragmentação, porém sem sinais de infecção patológica (Rajwade et al., 2015). Millon et al. (2008) também apresenta a utilização da celulose bacteriana como compósito com álcool polivinílico como enxerto vascular que não causa complicações no pós-operatório por conta da sua biocompatibilidade.

2.1.3 Produção

A CB é sintetizada a partir do processo fermentativo da bactéria *Komagataeibacter xylinus*, que, até onde consta, possui a maior eficiência dentre as demais (Souza, 2019). A produção de celulose bacteriana possui processos de *upstream* e *downstream* mais simples que a produção de celulose vegetal, visto que não há necessidade de remover impurezas, como a lignina e a hemicelulose, além não produzir efluentes tóxicos (Amorim et al., 2020).

Apesar de possuir duas rotas de produção (estática e sob agitação), a rota mais utilizada é a estática, em que a síntese resulta em películas crescendo na interface ar- líquido do sistema por um longo tempo de cultivo (em torno de nove horas). Para a rota sob agitação, ocorre a formação de pelotas, massas irregulares ou estrutura fibrilar de CB com um menor tempo de agitação (em torno de três horas), porém se tem um maior gasto energético. A produção sob agitação também forma células mutantes não produtoras de celulose em escala laboratorial,

necessitando melhorar esse ponto para avançar para escalas industriais. Vale ressaltar que, ao escolher a rota de produção, serão produzidos diferentes tipos de CB (Silva, 2019).

A produção em larga escala da celulose bacteriana ainda possui alguns empasses, como o alto custo de operação e uma baixa eficiência do processo fermentativo, além do custo de manutenção dos equipamentos, que passam por um processo corrosivo bastante agressivo. O principal meio de cultura utilizado, a Hestrin-Schramm (HS), também tem um papel importante para esse alto custo de produção, de forma que diversas pesquisas têm focado em desenvolver meios de cultura alternativos, especialmente resíduos industriais, com o objetivo de reduzir o custo de produção (Amorim et al., 2020). Uma opção de substituinte é o suco da casca de abacaxi, que, estudada por Rajwade et al. (2015), apresentou propriedades físico-químicas que semelhantes e uma produtividade superior ao do meio de cultivo HS, com um rendimento de três a quatro vezes superior. Costa et al. (2018) também apresenta um outro meio de cultura, o melaço de cana-de-açúcar, resíduo da produção de açúcar refinado. Em seus estudos, um dos meios alternativos desenvolvidos na pesquisa obteve uma conversão 74% maior em comparação com o meio HS, além de uma redução de custos em 54%.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida procura fazer um estudo sobre o impacto ambiental potencial de um produto ou serviço, considerando não apenas a fase de uso do produto, mas também as fases de fabricação, transporte, distribuição e descarte. Ela avalia as entradas de recursos naturais, energia e materiais ao longo de todo o ciclo de vida, bem como as emissões, resíduos e impactos ambientais resultantes (Coltro et al., 2007). A ACV não se limita apenas a produtos físicos, podendo ser aplicada a serviços, processos industriais, infraestruturas e até mesmo políticas públicas. Ela oferece uma base sólida para a tomada de decisões informadas, permitindo que os fabricantes identifiquem áreas problemáticas, busquem alternativas mais sustentáveis e implementem estratégias de melhoria ao longo do ciclo de vida do produto. Com o estudo do impacto ambiental, surge a possibilidade de comparação entre produtos com funcionalidades semelhantes. Um exemplo são as lâmpadas fluorescentes e incandescentes, no qual as lâmpadas fluorescentes passaram a ser mais utilizadas por consumir menos energia que as incandescentes, porém requerem mais materiais e metais pesados (Guinee et al., 2011). Dessa forma, entende-se que não basta apenas avaliar o impacto do uso do produto, como também compreender como cada etapa do ciclo de vida do produto impacta o meio ambiente.

Os primeiros estudos de Avaliação de Ciclo de Vida ocorreram a partir da década de 70, quando, após a crise do petróleo e o questionamento da finitude dos recursos naturais, surgiram

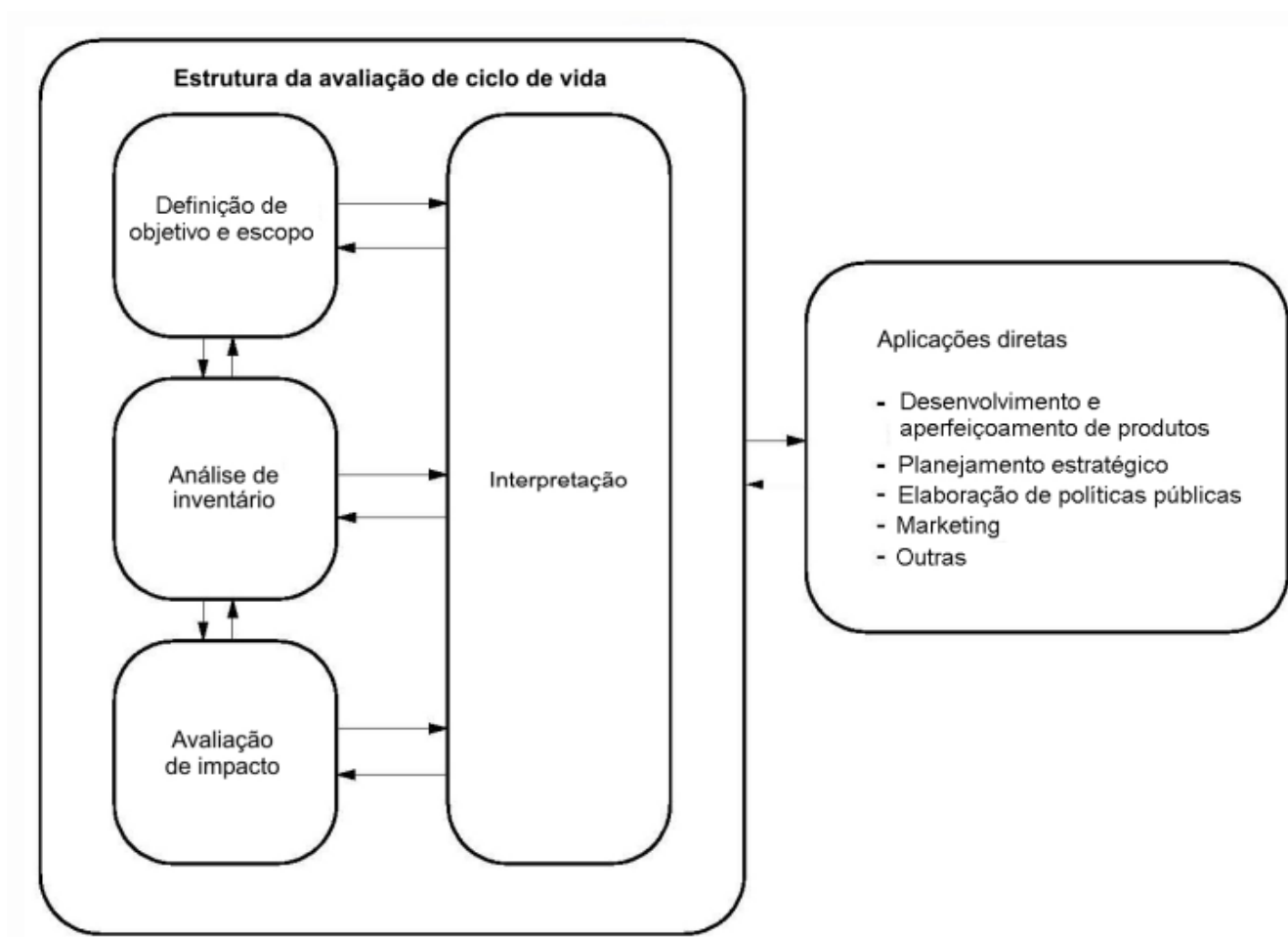
os primeiros estudos que possuíam o foco de avaliar a energia consumida nos processos, o controle da poluição gerada pelo produto e os resíduos sólidos gerados (Guinee et al., 2011). A Coca-Cola foi uma das primeiras empresas a realizar um estudo do impacto ambiental dos recipientes de bebida, procurando avaliar a quantidade de recursos utilizados na produção das garrafas, as cargas de emissão e taxas de resíduos gerados. Com o passar dos anos, outros estudos de ACV foram realizados, porém, por não possuírem uma metodologia padronizada e um *framework* teórico comum, houve discrepâncias entre os resultados obtidos para um mesmo objeto de estudo (Silva, 2019). Foi apenas a partir da década de 90 que a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry* - SETAC) liderou a procura de uma metodologia em comum para a ACV, e seu código de prática foi essencial para a padronização da metodologia pela Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization* – ISO) (Guinee et al., 2011).

No Brasil, a ACV passou a ser incorporada à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e normatizada pelas NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009, que apresentam seus princípios e estruturas, sendo útil para as primeiras etapas de desenvolvimento do produto. A depender dos resultados obtidos na ACV, pode-se avaliar os impactos ambientais e identificar oportunidades de melhoria para o projeto (Silva, 2019).

2.1.1 Fases da ACV

A metodologia ACV atualmente é desenvolvida em quatro partes, com sua estrutura podendo ser observada na Figura 1. Apesar da ABNT sugerir essas etapas, não existe apenas uma metodologia para conduzir uma ACV, e seu nível de detalhamento pode variar a depender do objetivo e do escopo definidos.

Figura 1. Estrutura da ACV.



Fonte: ABNT, 2009.

2.1.1.1 Definição de objetivo e escopo

De início, é necessário realizar uma definição do objetivo e escopo que seja consistente com o que se pretende aplicar ao produto. Essa etapa é importante para o definir qual o propósito do estudo realizado e quais sua amplitude, sendo imprescindível definir as fronteiras e unidade funcional, além do que se espera avaliar com a ACV (Coltro et al., 2007). É necessário que essa etapa seja seguida de maneira coerente para garantir que o escopo final consiga fornecer informações suficientes para chegar ao objetivo final estabelecido. Entretanto, durante o estudo da ACV, pode ocorrer um reajuste e até uma revisão do objetivo e escopo, caso se tenha alguma limitação ou restrição não prevista. O objetivo do estudo não pode ser ambíguo, e precisa declarar qual a aplicação do produto ou serviço, qual o motivo do estudo e se os resultados encontrados serão utilizados para comparações futuras, além do público de interesse do estudo (ABNT, 2009b). De acordo com a ABNT 2009b, o escopo precisa ser claro, ademais de considerar os seguintes itens

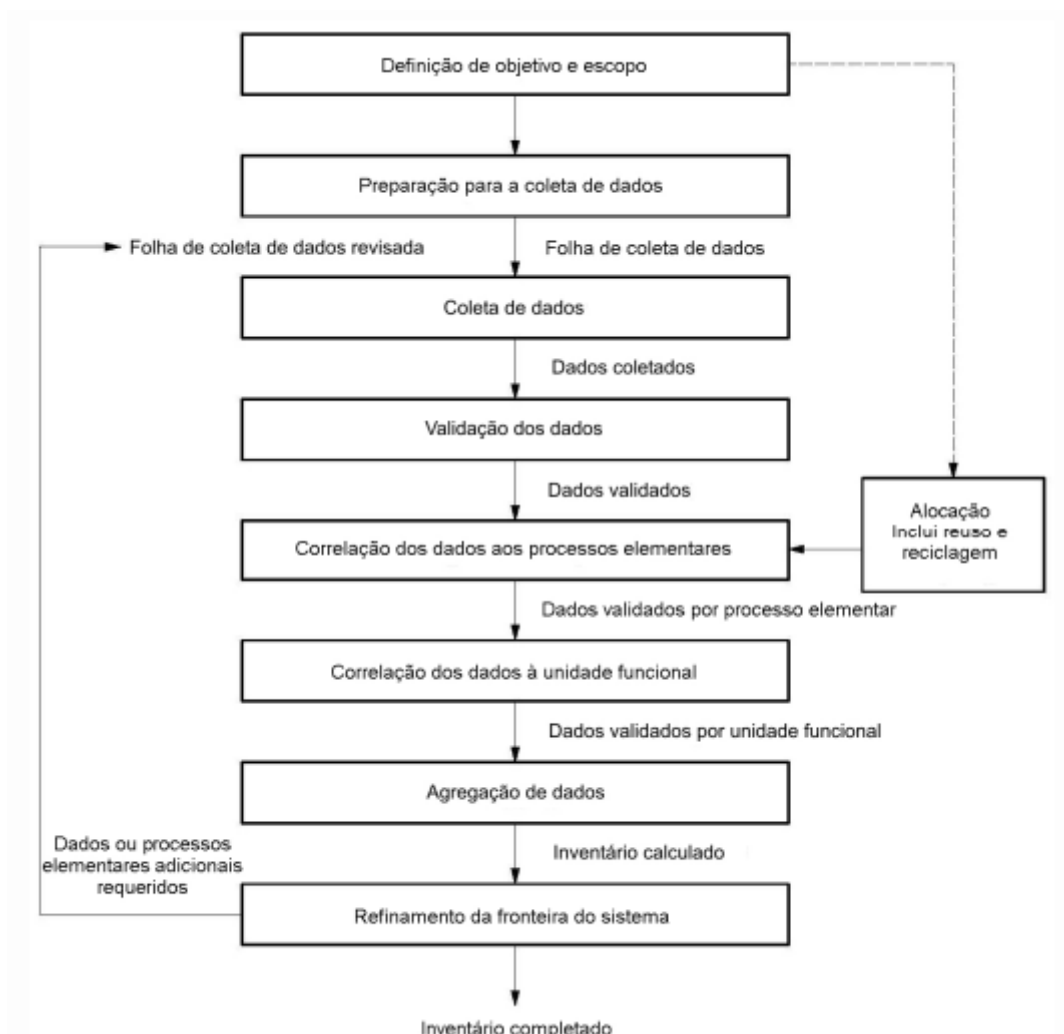
- Função e unidade funcional: A função são as características de desempenho do sistema que será estudado, enquanto que a unidade funcional se refere aos dados de entrada e saída normalizados, necessitando que os mesmos sejam mensuráveis e bem definidos. Após a definição da unidade funcional, é preciso entender quais as funções de referência, que podem ser definidas com base em dados históricos, estatísticas de mercado ou outras referências relevantes. Para realizar comparações entre sistemas, é preciso que se tenha as mesmas funções de referência para ambos;
- Fronteiras do sistema: As fronteiras do sistema determinam quais estágios do ciclo de vida do produto ou processo serão considerados na ACV. Isso inclui as fases de extração de matérias-primas, produção, distribuição, uso e descarte. É necessário que os critérios para a determinação das fronteiras sejam explicitados e explicados, sendo de extrema importância definir as mesmas para evitar que informações relevantes sejam excluídas ou que etapas sejam incluídas erroneamente. Caso se deseje ignorar algum estágio do ciclo de vida, o mesmo não pode provocar uma alteração significativa nos resultados finais do estudo. Vale ressaltar que as fronteiras do sistema podem ser amplas ou restritas, dependendo do objetivo e do contexto da ACV;
- Categorias de impacto: As categorias de impacto definem os aspectos ambientais que serão considerados na ACV, fornecendo uma estrutura para agrupar e medir os impactos ambientais ao longo de todas as etapas do ciclo de vida. Podem incluir mudanças climáticas, acidificação do solo, consumo de recursos naturais, entre outros. As categorias de impacto devem ser selecionadas com base na relevância local, nos objetivos da avaliação e nas necessidades dos usuários dos resultados;
- Tipos e fontes de dados: São elementos essenciais para coletar as informações necessárias para avaliação dos impactos ambientais. Esses dados fornecem as informações quantitativas e qualitativas sobre as entradas e saídas de materiais, energia e emissões associadas a cada etapa do ciclo de vida;
- Requisitos de qualidade dos dados: Para garantir que os dados coletados terão relevância para o objetivo do projeto, de acordo com a ABNT (2009), alguns dos principais requisitos são:
 - Cobertura temporal: a idade dos dados precisa ser atual, além do período em que os dados serão coletados;

- Cobertura geográfica: localidade em que a coleta de dados é relevante para o objetivo do estudo;
 - Cobertura tecnológica: tipos de tecnologia;
 - Precisão: variância dos valores dos dados;
 - Completeza: necessidade de ter dados abrangentes e representativos de todas as etapas relevantes do ciclo de vida do produto ou processo avaliado;
 - Representatividade: os dados devem refletir com precisão as características do produto, processo ou sistema sendo analisado, de modo a fornecer resultados confiáveis e significativos;
 - Consistência: os dados coletados devem ser compatíveis entre si e devem ser comparáveis;
 - Reprodutibilidade: os dados coletados devem, mesmo que em menor grau, garantir uma reprodutibilidade dos resultados obtidos.
- Comparação entre sistemas: como dito anteriormente, para uma comparação de sistemas, é necessário que os mesmos tenham seu escopo equivalente, utilizando a mesma unidade funcional, além de fronteiras do sistema, qualidade de dados e outros itens do escopo;
 - Considerações quanto à análise crítica: referem-se à avaliação cuidadosa e reflexiva dos resultados obtidos durante o processo de ACV

2.1.1.2 Análise de inventário

A fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV) tem como objetivo identificar e quantificar as entradas e saídas de cada etapa do ciclo de vida, onde seu plano inicial deve ser determinado com a definição do objetivo e escopo da ACV. Para auxiliar nessa etapa, pode-se elaborar um fluxograma do sistema a ser estudado, visualizando todas as atividades e processos presentes (Coltro et al., 2007). A ABNT (2009b) apresenta algumas etapas para essa fase, sendo apresentadas na Figura 2.

Figura 2. Etapas de uma análise de inventário.



Fonte: ABNT, 2009b.

Inicialmente, realiza-se uma coleta de dados a partir de uma vasta fonte de dados, desde relatórios internos, literatura científica, entrevistas, estudos entre outras fontes. Para a publicação dos dados, é necessário que todos sejam referenciados, informando a época da coleta, locais de origem entre outras informações relevantes. Algumas das principais entradas e saídas são consumo de recursos naturais, produtos, co-produtos e resíduos entre outros aspectos ambientais (ABNT, 2009b). Os dados coletados, em seguida, passam por uma caracterização, sendo classificados e caracterizados de acordo com seu processo elementar e sua unidade funcional. Todos os procedimentos de cálculos dessa etapa precisam ser explicitados e documentados, aplicando-os de maneira consistente em todo o estudo, como cálculos de fluxo de materiais (Coltro et al., 2007).

2.1.1.3 Avaliação de impacto

A avaliação de impacto é uma fase de grande importância para a ACV, se tratando de uma interpretação crítica dos dados obtidos na fase anterior (ICV) e quais são seus impactos ambientais. De acordo com a ABNT (2009b), essa fase possui três elementos obrigatórios:

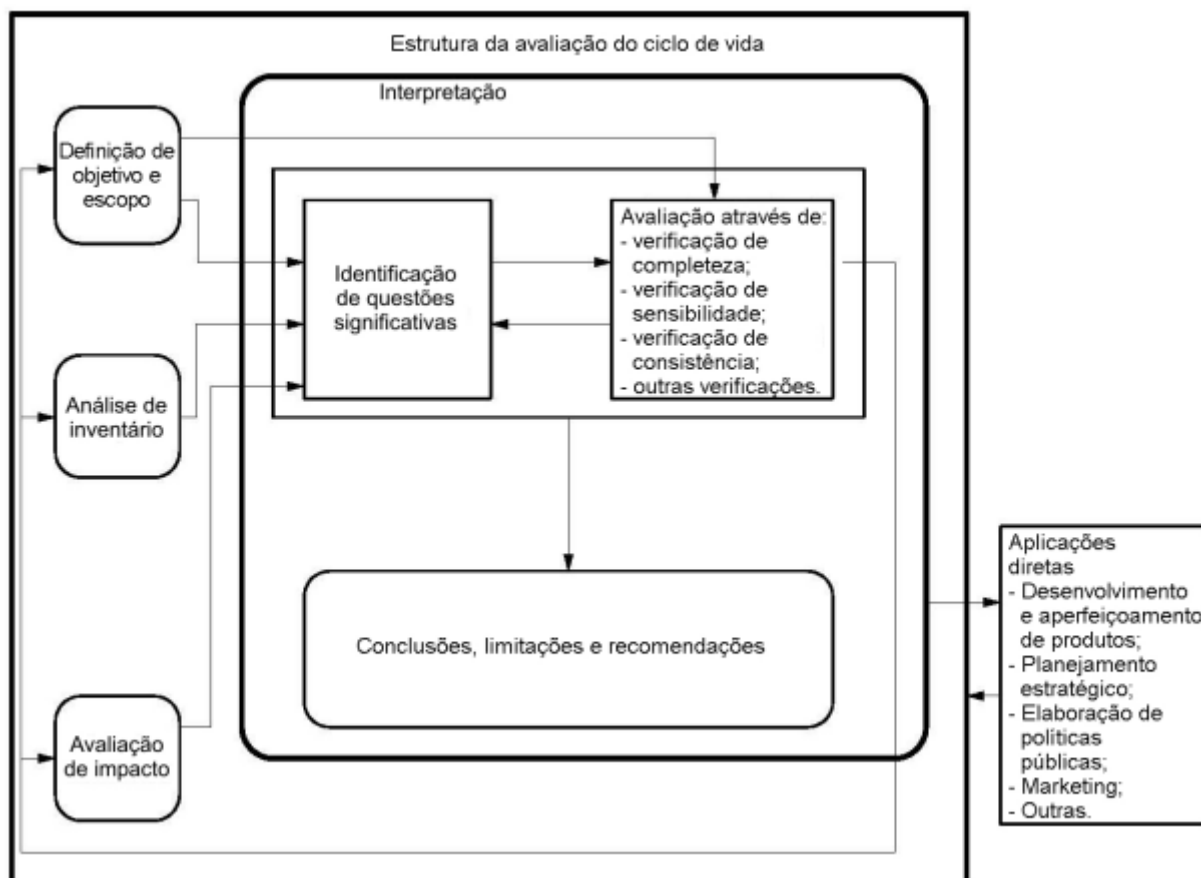
- Seleção de categoria de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização: a seleção de categoria de impacto deve relacionar os fluxos do processo com suas devidas categorias de impacto e, quando associados os dados com o modelo de caracterização e o mecanismo ambiental, permitem relacionar os mesmos com os indicadores de categoria;
- Classificação: Durante essa etapa, os dados do inventário são convertidos em indicadores de impacto ambiental por meio da multiplicação dos fatores de caracterização pelos fluxos de inventário, garantindo que os dados possuam unidades comuns;
- Caracterização: Por fim, são calculados os resultados dos indicadores e os mesmos são agregados em uma mesma categoria de impacto.

A ABNT (2009b) também ressalta que os indicadores de categoria precisam ter validade científica e técnica, além de possuírem ligação clara com as categorias de impacto definidas previamente. A AICV pode possuir outras etapas não obrigatórias, como a normalização, que serve, entre outros motivos, para verificar inconsistências; o agrupamento, onde pode ser realizado um agrupamento (em base nominal) ou hierarquização das categorias de impacto; e a ponderação, que, de acordo com a ABNT (2009b), “é o processo de conversão dos resultados de indicadores de diferentes categorias de impacto pela utilização de fatores numéricos baseados em escolha de valores”.

2.1.1.4 Interpretação dos resultados

A fase de interpretação é uma etapa não obrigatória, porém de grande importância para a ACV. Nessa etapa, os resultados obtidos durante as fases anteriores (inventário e avaliação de impacto) são analisados, compreendidos e interpretados, com o objetivo de trazer conclusões ou recomendações. Na Figura 3, a ABNT (2009b) apresenta formas de realizar essa interpretação em cada etapa da ACV. É necessário que a interpretação dos resultados seja realizada tomando como base o objetivo e escopo do estudo, respondendo questões significativas e que tragam conclusões satisfatórias para o estudo.

Figura 3. Fase de interpretação para cada etapa da ACV.



Fonte: ABNT, 2009.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SOFTWARE

O software a ser utilizado para a elaboração da ACV da celulose bacteriana será o OpenLCA, desenvolvido em 2006 pela GreenDelta, empresa de consultoria alemã com foco em sustentabilidade. Com a ideia de ser um software disponível gratuito e de fácil manuseio para realizar análises de Avaliação de Ciclo de Vida, o programa atende as normas regentes para esse tipo de análise no Brasil, a NBR ISO 14040.

O software não possui base de dados própria, sendo necessário buscar as informações em outras fontes de dados como a OpenLCA Nexus e a Ecoinvent. Para o projeto, foi utilizado a base de dados *Environmental Footprints*, desenvolvida pela Comissão Europeia que apresenta bases de dados desde mais simples, como fluxos elementares, até processos completos para produção de um material

Para as informações obtidas de produção de celulose bacteriana e produção de papel a partir da CB, foram utilizados como referência a metodologia do trabalho de Souza (2023).

3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

3.2.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo da avaliação de ciclo de vida é fazer um comparativo entre os impactos ambientais gerados pela produção de sacolas de plástico e sacolas de papel produzidas por celulose vegetal e celulose bacteriana. Serão avaliadas as principais categorias de impacto para cada cenário, além da comparação entre as categorias de impacto em comum aos três processos. Para os três cenários, foi avaliado apenas o processo de produção, sem considerar a obtenção dos materiais ou descarte do material pela falta de dados dos materiais utilizados para a produção da celulose bacteriana.

O plástico escolhido foi o polietileno por ser o mais utilizado para a produção de sacolas no Brasil (Avallone, 2012), onde as sacolas foram produzidas a partir do processo de extrusão e sopro, como apresentado na Figura 4.

Figura 4. Processo de produção para sacolas de polietileno.



Fonte: Autora, adaptado de Muthu, 2009.

Para o processo de produção da sacola, há a preparação da polpa de papel, que será seca, impressa e, por fim, a sacola será produzida. Esse processo pode ser observado na Figura 5.

Figura 5. Processo de produção de sacolas de papel.



Fonte: Autora, adaptado de Muthu, 2009

Para comparação dos resultados obtidos com o papel produzido a partir da celulose bacteriana, foi escolhido comparar com a produção de papel kraft através do processamento da polpa de papel, prensagem e secagem da polpa para obtenção de um papel com gramatura inferior a 120 g/m² (informações apresentadas na Figura 6), por ser o processo mais semelhante ao realizado com a membrana de CB e o material utilizado para a produção de sacolas de papel.

Figura 6. Informações do processo escolhido para comparação da produção de papel através da CB.

▼ General information	
Name	Kraft paper, uncoated, production mix, at plant, Kraft Pulping Process, pulp pressing and drying, <120 g/m2
Category	Materials production/Paper and cardboards

Fonte: Autora, 2023.

3.2.2 Avaliação de inventário

Foi realizada uma análise de inventário a partir da base de dados do *Environmental Footprints* e dos experimentos realizados no Laboratório de Microbiologia. Dessa forma, para os processos de produção de sacola de polietileno e de papel foram obtidos pela base de dados, em que foi criado um sistema para o processo e fornecido a quantidade de material. Para os três casos, foi avaliado o impacto da produção de 1 tonelada de material.

Em relação à produção das sacolas de polietileno, a produção é medida em metro quadrado, de forma que é necessário converter para quilograma. Pelo programa, a gramatura da sacola de plástico é 0,0283 kg/m² (informações do produto apresentada na Figura 7), sendo utilizada a Equação 1 para encontrar quantos m² de sacola equivalem a 1 tonelada.

$$Volume = \frac{1000 \text{ kg} * 1m^2}{0,0283 \text{ g/m}^2} = 35 \ 335,70 \text{ m}^2 \quad (1)$$

Figura 7. Informações sobre a sacola de polietileno.

General information	
Name	Plastic bag, PE, production mix, at plant, raw material production, plastic extrusion, thickness: 0.03mm, grammage: 0.0283 kg/m ²
Category	Systems/Packaging

Fonte: Autora, 2023.

Assim, a Tabela 3 apresenta os valores de referência para a simulação de 1 tonelada de sacolas de polietileno e papel.

Tabela 3. Valores de referência para cada simulação.

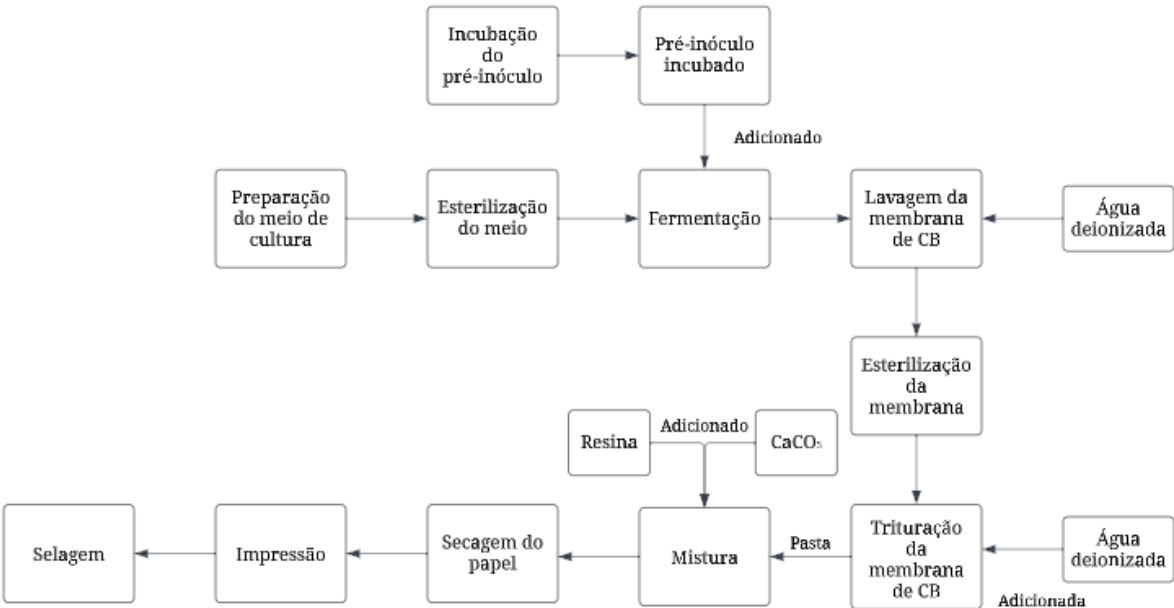
	Valor de <i>input</i>	Unidade
Sacolas de polietileno	1000	kg
Sacolas de papel	35 335,70	m ²

Fonte: Autora, 2023.

3.2.2.1 Produção de papel pela celulose bacteriana

Para a produção de celulose bacteriana, foi considerado o fluxograma apresentado na Figura 8 para avaliação.

Figura 8. Produção da embalagem de celulose bacteriana.



Fonte: Autora, 2023.

No programa, essa produção foi dividida em três blocos: Produção do meio de cultura, Produção da celulose bacteriana e Produção do papel pela membrana de CB. Para cada um desses blocos, foi calculado o consumo energético, de água e adicionado os fluxos elementares de materiais utilizados. Os *inputs* e *outputs* para o bloco de Produção de celulose bacteriana podem ser observados na Figura 9.

Figura 9. Inputs e outputs para a produção de celulose bacteriana.

Inputs										
Flow	Category	Amount	Unit	s/Revenues	Uncertainty	Avoided w:	Provider	Data qual:	Location	Descriptor
De-ionised water	Organic chemicals/n...	50.00000	g		none					
Electricity	Energy carriers and t...	0.33300	kWh		none					
Meio de cultura C...		400.00000	g		none					
Outputs										
Flow	Category	Amount	Unit	s/Revenues	Uncertainty	Avoided pr	Provider	Data qual:	Location	Descriptor
Celulose bacteriana		2.28800	g		none					

Fonte: Autora, 2023.

Para o consumo energético, foi levado em consideração a potência do equipamento e o tempo de utilização. Para a estufa utilizada no processo de secagem, por exemplo, o tempo de utilização foi de 48 horas. Assim, seu consumo em quilowatt-hora (considerando sua potência de 1000 w, como apresentada na Figura 10) seria de 48 kwh. Entretanto, como seria possível secar 48 placas petri de 14 cm de diâmetro (local onde o papel foi seco) ao mesmo tempo, esse consumo energético é reduzido para 1 kwh.

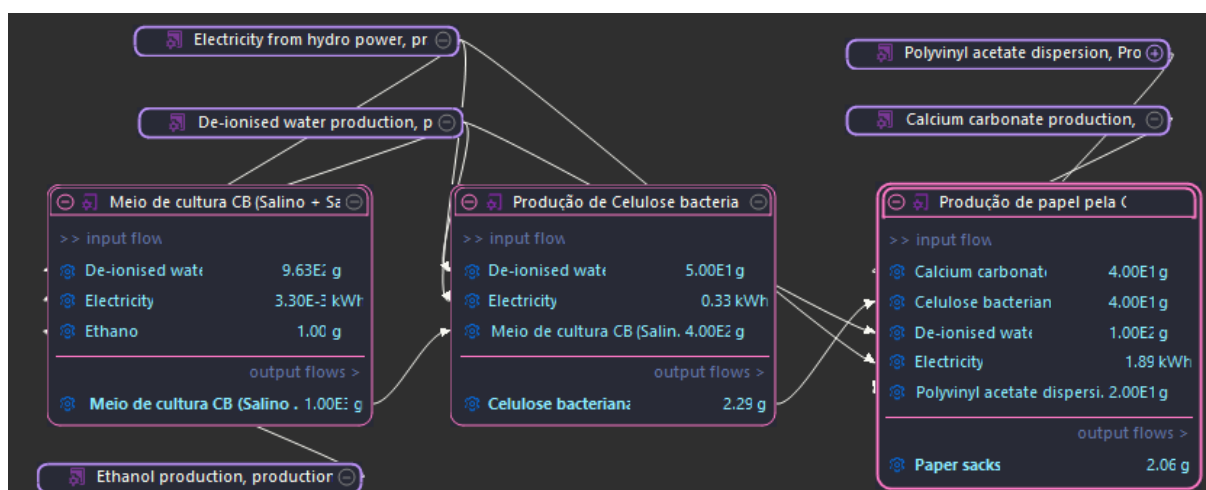
Figura 10. Informações sobre consumo energético pela estufa.



Fonte: Autora, 2023.

Após realizar os cálculos necessários, foi possível agregar os blocos e montar o projeto para a produção do papel pela membrana de celulose bacteriana, apresentado na Figura 11.

Figura 11. Processo de produção do papel através de celulose bacteriana.



Fonte: Autora, 2023.

3.2.2.1 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada com o objetivo de entender o impacto de três parâmetros: o consumo energético do processo de produção do papel (onde há maior consumo

de energia no processo), além do rendimento da produção de celulose bacteriana e da produção de papel. Essa etapa do projeto tem como objetivo sugerir melhorias e entender como essas melhorias irão impactar nos resultados finais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O programa disponibiliza diversas categorias de impacto para avaliação, como eutrofização marinha e terrestre, toxicidade humana, uso de terra entre outros. Para efeito comparativo, decidiu-se avaliar os seguintes impactos ambientais para o processo produtivo de cada componente: Consumo de água, avaliado em m³ consumido, utilização de recursos fósseis avaliado em MJ e mudança climática, avaliada em kg de CO₂ equivalente, sendo uma métrica utilizada para comparar o efeito vários gases de efeito estufa e seu potencial de aquecimento global utilizado o gás carbônico como base (Buberger, 2022). Foi decidido priorizar essas categorias de impacto por possuírem uma grande relevância e serem as categorias que apresentaram maiores valores de impacto, além de suas causas serem mais facilmente identificadas no processo produtivo avaliado, de forma que a análise de sensibilidade pôde ser realizado com base nos dados de *input* e *output* inseridos.

4.1 COMPARATIVO DOS IMPACTOS CAUSADOS PELA PRODUÇÃO DE SACOLAS DE POLIETILENO VERSUS PAPEL

Após a simulação no software, os resultados obtidos para as três categorias de impacto definidas são agrupados e apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Comparativo dos resultados de impacto obtidos para a produção de sacolas de polietileno e sacolas de papel.

	Consumo de água (m³ de água)	Utilização de recurso fóssil (MJ x 10⁴)	Mudança climática kg CO₂ eq
Sacolas de polietileno	1002	8,17	2495
Sacolas de papel	448	1,64	861
Variação percentual	55%	80%	65%

Fonte: Autora, 2023

Analisando os resultados obtidos, o impacto ambiental que apresentou maior diferença foi o consumo de recursos fósseis. Ao avaliar o consumo de água para ambas as produções, grande parte desse consumo advém da água utilizada para a produção das sacolas em ambos os casos. Dessa forma, pode-se concluir diretamente que a produção de sacolas de papel consome uma menor quantidade de água que a produção de sacolas de polietileno. Para a mudança climática, uma comparação a se fazer são os tipos de gases emitidos no processo, apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de emissão de gases do efeito estufa em kg CO₂ eq.

	Dióxido de carbono (fóssil)	Metano (fóssil)	Óxido nitroso
Sacolas de polietileno	2145	326	-
Sacolas de papel	757	80	15
Variação percentual	65%	75%	

Fonte: Autora, 2023.

Vale entender que, mesmo que a produção das sacolas de plástico emitir óxido nitroso que, em termos de quilos de carbono equivalente é equivalente a 298 quilos (OpenLCA, 2023), a emissão total se manteve 45% mais baixa.

De forma geral, a partir dos resultados avaliados, pode-se concluir que a produção de sacolas de papel causa um menor impacto ambiental que a produção das sacolas de polietileno. Vale ressaltar que foi avaliado apenas o processo produtivo, sem levar em consideração a obtenção do material para produção ou o descarte e reaproveitamento das sacolas após utilização. Assim, pode-se validar a hipótese de a produção das sacolas de papel causarem um menor impacto ambiental que a produção das sacolas de polietileno.

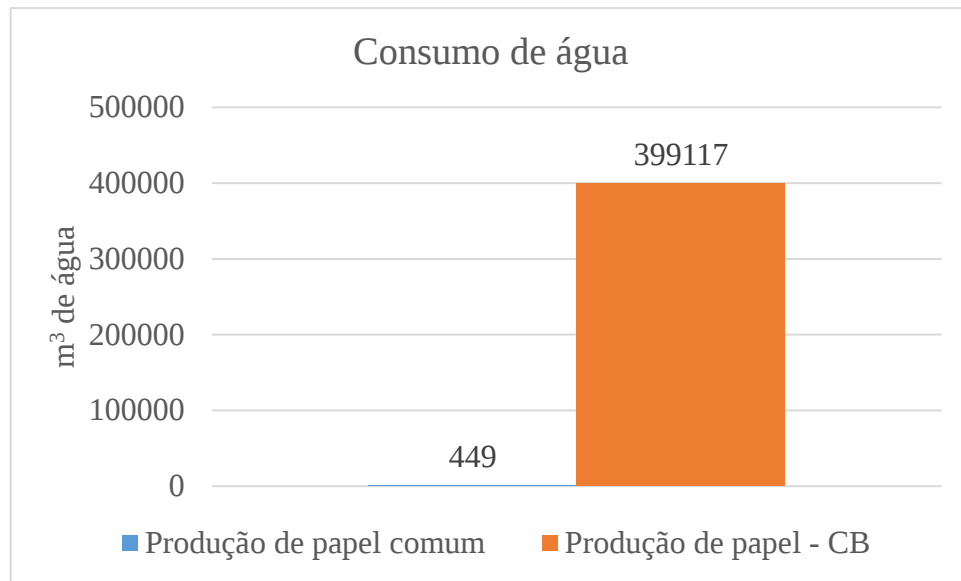
4.2 PRODUÇÃO DE PAPEL KRAFT A PARTIR DE CELULOSE BACTERIANA

Para a produção do papel kraft a partir da membrana de celulose bacteriana, pode-se observar resultados extremamente altos para os três indicadores de impacto escolhidos. Esses valores devem-se ao programa que, para calcular o impacto da produção de uma tonelada, irá escalonar os valores de *input* para atingir a quantidade desejada, realizando basicamente balanços de massa e de energia no sistema. Mais adiante, esses resultados serão apresentados e discutidos.

4.2.1 Comparativo dos impactos causados pela produção de papel kraft a partir de celulose vegetal e celulose bacteriana

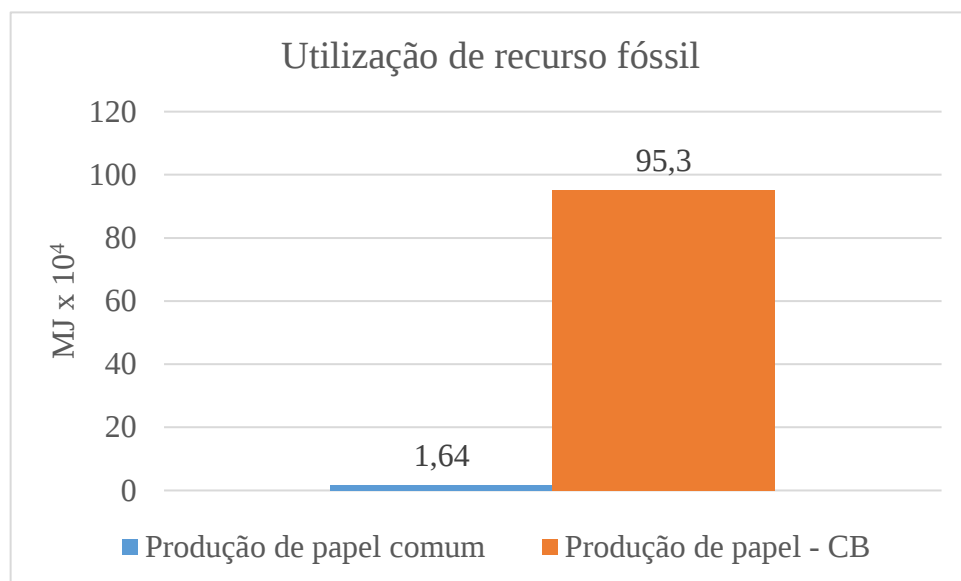
A partir dos resultados obtidos para a produção de papel a partir da CB e com o processo tradicional, os resultados obtidos para as três categorias de impacto escolhidas foram comparados nas Figura 12, Figura 13 e Figura 14.

Figura 12. Consumo de água da produção de papel a partir da CB versus tradicional.



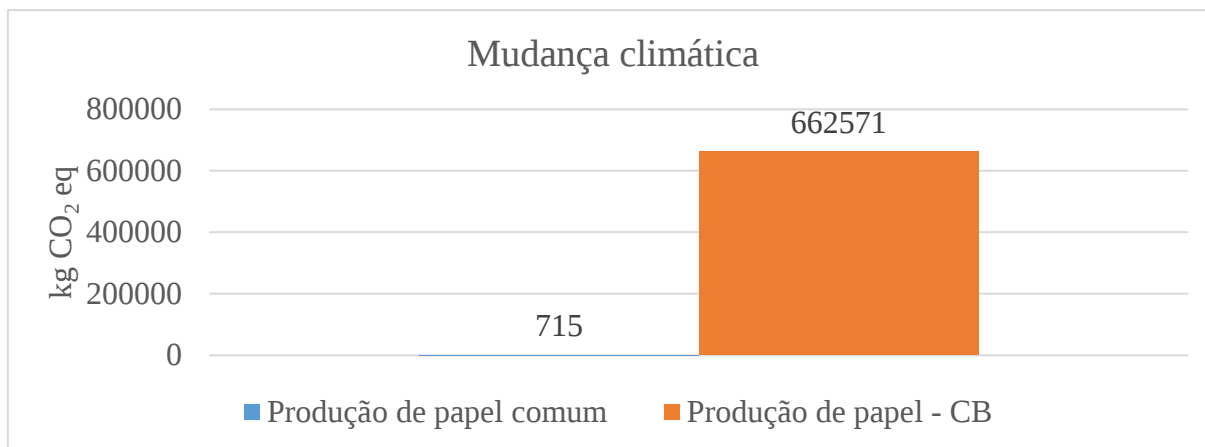
Fonte: Autora, 2023.

Figura 13. Utilização de recurso fóssil da produção de papel produzido a partir da CB versus tradicional.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 14. Mudança climática da produção de papel a partir da CB versus tradicional.

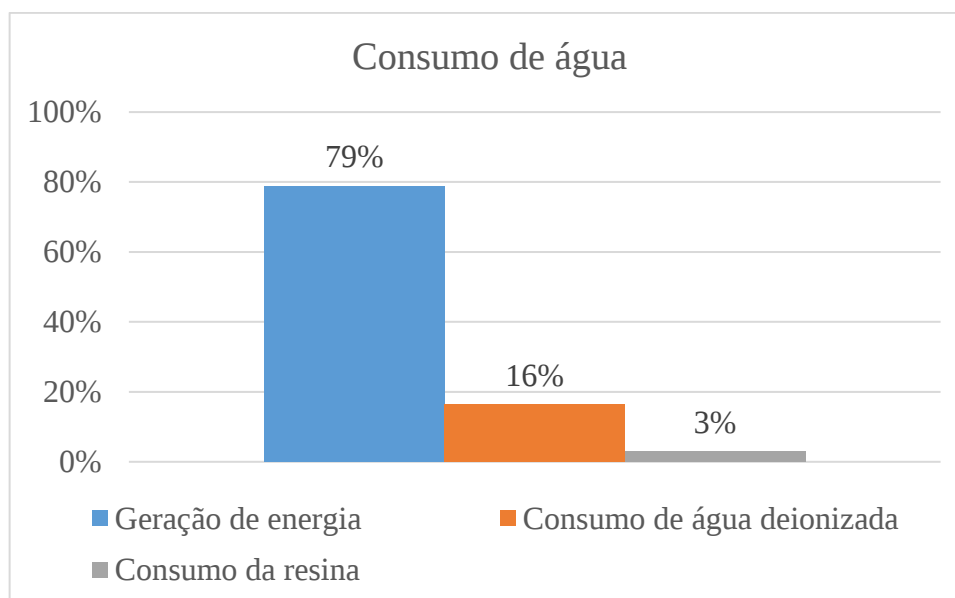


Fonte: Autora, 2023.

Ao avaliar os resultados obtidos, pode-se observar uma disparidade entre a produção de papel comum e a produção do papel a partir da celulose bacteriana para todos os resultados. Uma avaliação que pode ser feita é a diferença de gramatura do papel, em que o papel produzido a partir da celulose bacteriana possui uma gramatura de aproximadamente 140 g/m², enquanto que o papel kraft avaliado possuía gramatura entre 70 e 120 g/m².

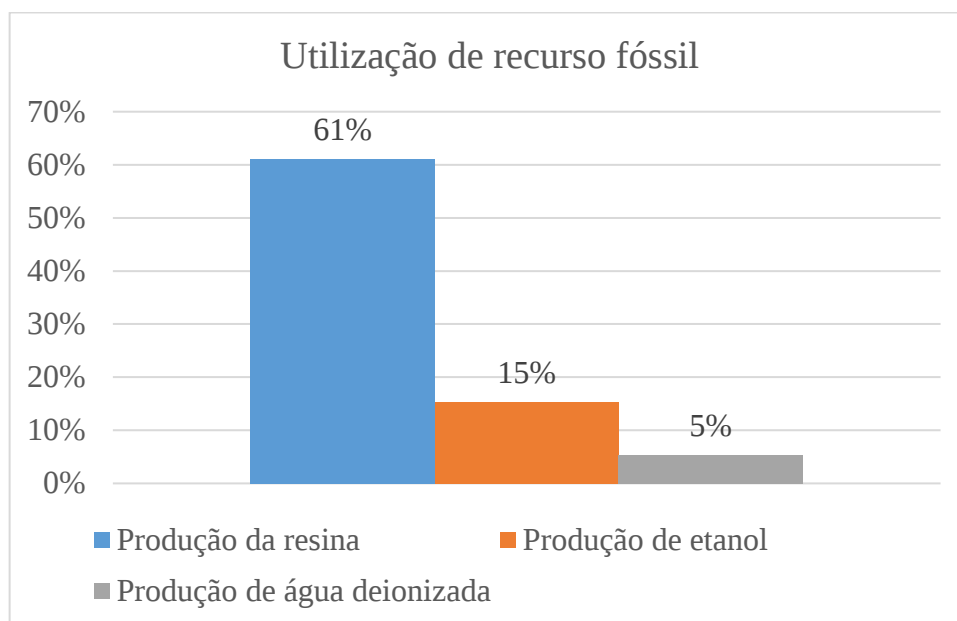
Adentrando os resultados obtidos, nas Figura 15, Figura 16 e Figura 17, pode-se observar os três processos que mais influenciaram em cada um dos resultados de impacto.

Figura 15. Principais processos responsáveis pelo consumo de água.



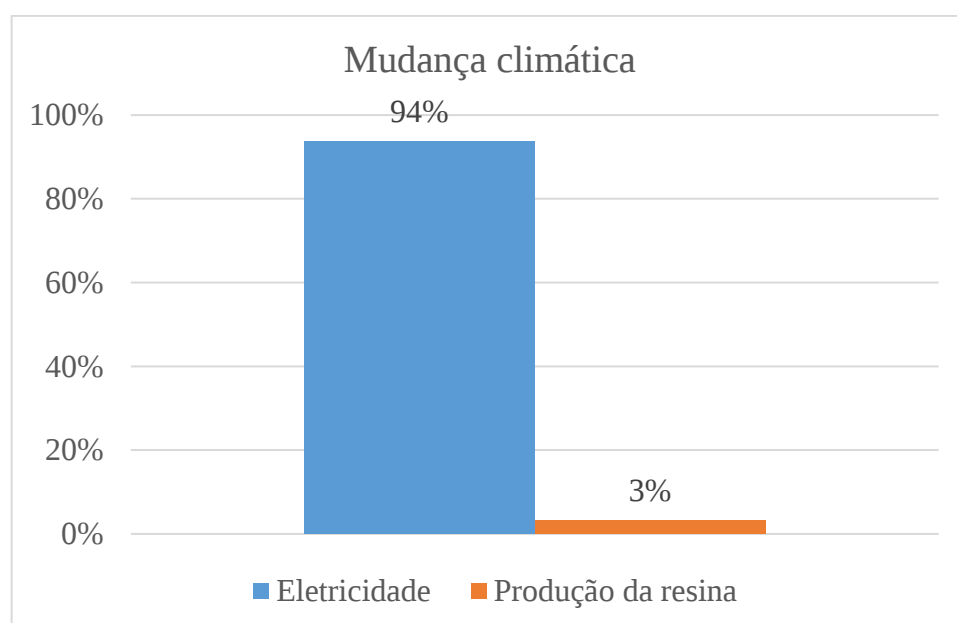
Fonte: Autora, 2023.

Figura 16. Principais processos responsáveis pela utilização de recursos fósseis.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 17. Principais processos responsáveis pela mudança climática.



Fonte: Autora, 2023.

Dessa forma, consegue-se entender que os principais fatores que influenciam nas categorias de impacto foram o consumo energético e o consumo de reagentes. A partir dessa conclusão, é possível realizar uma análise de sensibilidade para determinar o efeito da variação do consumo energético e do rendimento do processo.

4.2.1.1 Análise de sensibilidade do consumo energético

Para avaliação, foi considerado uma redução de 25% e 50% do consumo energético para a etapa da produção do papel, por representar aproximadamente 85% do consumo energético de todo o processo. Essas reduções podem ser realizadas a partir de otimizações no processo produtivo, como, por exemplo, agrupar as etapas de trituração da membrana de CB com a mistura da pasta com a resina e o carbonato de cálcio, ou realizar a secagem em formatos mais eficientes e que diminuam o tempo de secagem do papel. As variações de consumo energético consideradas para avaliação dos cenários são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de referência para análise de sensibilidade de consumo energético.

Cenário	Consumo energético (kwh)	Redução
Original	1,89	-
Redução de 25%	1,42	25%
Redução de 50%	0,92	50%

Fonte: Autora, 2023.

Para simular as reduções propostas, foi alterado apenas o *input* do consumo energético, mantendo todos os outros dados fornecidos anteriormente. Após realizar as simulações dos processos após as reduções do consumo energético, foi possível obter os resultados apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Diferença após a redução de 25% e 50% do consumo energético.

Cenário	Consumo de água (m ³ de água)	Utilização de recurso fóssil (MJ)	Mudança climática (kg CO ₂ eq)
Original	100%	100%	100%
Redução de 25%	95%	100%	94%
Redução de 50%	90%	99%	89%

Fonte: Autora, 2023.

Apesar de haver uma redução para as categorias de impacto em que o consumo energético tinha maior importância (consumo de água e mudança climática), ainda não se chega em um resultado que apresente uma redução considerável para a utilização de recurso fóssil. Dessa forma, é necessário avaliar se a análise de sensibilidade para os rendimentos das produções irá resultar em uma redução maior para as categorias avaliadas.

4.2.1.2 Análise de sensibilidade do rendimento do processo

Para realizar a análise, foi considerado um aumento no rendimento de 10% e 20% para a produção de celulose bacteriana e a produção de papel. Dessa forma, calculou-se qual seriam os *outputs* para cada rendimento e foram realizadas novas simulações para cada situação. Na Tabela 8 é possível observar os resultados obtidos para a simulação realizada com a alteração no rendimento da produção da celulose bacteriana.

Tabela 8. Resultados para a análise de sensibilidade para o rendimento da CB produzida.

Cenário	Consumo de água (m³ de água)	Utilização de recurso fóssil (MJ)	Mudança climática kg CO₂ eq
Original	100%	100%	100%
Aumento de 10%	93%	98%	93%
Aumento de 20%	87%	96%	88%

Fonte: Autora, 2023.

A Tabela 9 também apresenta os resultados para as simulações realizadas com a alteração dos rendimentos da produção de papel.

Tabela 9. Resultados para a análise de sensibilidade para o rendimento do papel produzido.

Cenário	Consumo de água (m³ de água)	Utilização de recurso fóssil (MJ)	Mudança climática kg CO₂ eq
Original	100%	100%	100%
Aumento de 10%	91%	91%	91%
Aumento de 20%	83%	83%	83%

Fonte: Autora, 2023.

Pode-se observar uma maior redução nos valores de impacto ao comparar a alteração do rendimento da produção da CB com a diminuição do consumo energético. Entretanto, avaliando as alterações de rendimento da produção de papel e produção de CB, conclui-se que o rendimento do papel tem maior impacto nos resultados que o rendimento da celulose bacteriana. Esse resultado faz sentido ao entender que a etapa da produção do papel requer um maior consumo energético e, como avaliado anteriormente, o consumo energético é, na maioria dos casos, o principal parâmetro que causa impacto ambiental.

Vale salientar que, mesmo com a redução, a comparação das duas formas de produção de papel aponta uma via mais sustentável quando se trata da produção tradicional. Entretanto, deve-se levar em consideração que foi avaliado um método laboratorial e um método industrial, e que, ao realizar a produção em uma indústria com maquinários que aumentem a eficiência do processo e garantam a esterilização, o rendimento e o consumo energético irão aumentar e, conseqüentemente, haverá uma redução dos impactos ambientais.

.

5 CONCLUSÃO

A Avaliação de Ciclo de vida foi aplicada com o objetivo de entender os impactos ambientais de uma produção de celulose bacteriana realizada no Laboratório de Microbiologia e compará-la com a produção de papel através de celulose vegetal. Além disso, também foi comparado a produção de sacolas de PE com sacolas de plástico, para entendimento de quais seriam seus impactos ambientais.

Em relação aos resultados para o comparativo entre as produções de sacolas de PE e papel, foi possível observar uma diferença de 55% do consumo de água, 80% da utilização de recurso fóssil e 65% de menor emissão de gases de efeito estufa, de forma que a produção de papel apresentou melhores resultados em todos os parâmetros avaliados. Dessa forma, validou-se que a produção de sacolas de papel causa um menor impacto ambiental se comparadas com a produção de sacolas de PE.

Pelas características do papel obtido a partir da celulose bacteriana, foi decidido utilizar uma produção de papel kraft como comparativo. Os resultados da comparação de produção de papel kraft apresentam uma considerável diferença de resultados, em que a produção de papel a partir da celulose bacteriana apresentou maiores impactos. Ao avaliar os processos, entende-se que a maior influência vem do consumo energético no processo de produção do papel e o rendimento da CB e do papel.

Assim, a análise de sensibilidade apontou que a variação do rendimento de produção da produção de CB e de papel tem um maior impacto nos resultados da ACV. Já, ao simular novos resultados alterando os rendimentos da produção de CB e da produção de papel, entende-se que esse segundo processo é que gera uma maior variação nos resultados.

Em suma, a celulose bacteriana apresenta diversos benefícios e se mostra um bom substituto para produtos a base de plásticos não bio-degradáveis. Entretanto, o processo produtivo avaliado não apresentou resultados que justifiquem a substituição de papel kraft produzido a partir da celulose vegetal pelo papel de CB, sendo necessário que haja uma otimização no processo que aumente o rendimento e possibilite uma maior produção de CB e papel.

REFERÊNCIAS

Legislação

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009b.

Autores

- ALBUQUERQUE, R. M., H. M. MEIRA, I. D. SILVA, C. J. G. SILVA, F. C. G. ALMEIDA, J. D. AMORIM, G. M. VINHAS, A. F. S. COSTA E L. A. SARUBBO (2021). **"Production of a bacterial cellulose/poly (3-hydroxybutyrate) blend activated with clove essential oil for food packaging."** Polymers and Polymer Composites 29(4): 259-270.
- ANAYA, P., G. CÁRDENAS, V. LAVAYEN, A. GARCÍA e C. O'DWYER (2013). **"Chitosan gel film bandages: Correlating structure, composition, and antimicrobial properties."** Journal of applied polymer science 128(6): 3939-3948.
- AVALONE, I. V.; GIRALDI, J. D. M. E.; OLIVEIRA, S. V. W. B. DE. **Conscious Consumption: a Study on Plastic Bags' Consumers in Brazil.** International Journal of Psychological Studies, v. 4, n. 1, 29 fev. 2012.
- BUBERGER, J. et al. **Total CO2-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 159, n. 1364-0321, p. 112158, 1 maio 2022.
- COLTRO, L., A. MOURAD, E. GARCIA, G. QUEIROZ, J. GATTI e S. JAIME (2007). **"Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão."** Campinas: Cetec/Ital 1.
- COSTA, A., V. NASCIMENTO, J. de AMORIM, E. GOMES, L. ARAUJO e L. SARUBBO (2018). **"Residue from the production of sugar cane: an alternative nutrient used in biocellulose production by Gluconacetobacter hansenii."** Chemical Engineering Transactions 64: 7-12.
- DAUNDKAR, M. M.; SAVANT, B. N. **Low cost automation solution for paper bag production using commodity hardware.** 2016 IEEE International Conference

on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), v., n., maio 2016.

- de AMORIM, J. D. P., K. C. de SOUZA, C. R. DUARTE, I. da SILVA DUARTE, F. A. S. RIBEIRO, G. S. SILVA, P. M. A. de FARIAS, A. STINGL, A. F. S. COSTA e G. M. VINHAS (2020). **"Plant and bacterial nanocellulose: Production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. A review."** Environmental Chemistry Letters 18: 851-869.
- ESA, F., S. M. TASIRIN e N. ABD RAHMAN (2014). **"Overview of bacterial cellulose production and application."** Agriculture and Agricultural Science Procedia 2: 113-119.
- GUINEE, J. B., R. HEIJUNGS, G. HUPPES, A. ZAMAGNI, P. MASONI, R. BUONAMICI, T. EKYALL e T. RYDBERG (2011). **Life cycle assessment: past, present, and future, ACS Publications.**
- IWATA, T. (2015). **"Biodegradable and bio-based polymers: future prospects of eco-friendly plastics."** Angewandte Chemie International Edition 54(11): 3210-3215.
- KAKADELLIS, S. e Z. M. HARRIS (2020). **"Don't scrap the waste: The need for broader system boundaries in bioplastic food packaging life-cycle assessment—A critical review."** Journal of Cleaner Production 274: 122831.
- LAMBERT, S. e M. WAGNER (2017). **"Environmental performance of bio-based and biodegradable plastics: the road ahead."** Chemical Society Reviews 46(22): 6855-6871.
- LIMA-JÚNIOR, E. M., N. S. PICOLLO, M. J. B. d. MIRANDA, W. L. C. RIBEIRO, A. P. N. N. ALVES, G. E. FERREIRA, E. A. PARENTE e M. O. d. MORAES FILHO (2017). **"Uso da pele de tilápia (*Oreochromis niloticus*), como curativo biológico oclusivo, no tratamento de queimaduras."**
- MILLON, L. E., G. GUHADOS e W. WAN (2008). **"Anisotropic polyvinyl alcohol—Bacterial cellulose nanocomposite for biomedical applications."** Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials 86(2): 444-452.
- MUTHU, S. S.; HU, J.-Y.; MOK, P.-Y. **An Exploratory Comparative Study on Eco-Impact of Paper and Plastic Bags.** Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, v. 1, n. 4, p. 307–320, jun. 2009.

- OLIVATTO, G. P., R. CARRIERA, V. L. TORNISIELO and C. C. MONTAGNER (2018). "**Microplásticos: Contaminantes de preocupação global no Antropoceno.**" Revista Virtual de Química 10(6): 1968-1989.
- PIATTI, T. M. e R. A. F. RODRIGUES (2005). "**Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais.**" Maceió: Edufal: 51.
- RAJWADE, J., K. PAKNIKAR e J. KUMBHAR (2015). "**Applications of bacterial cellulose and its composites in biomedicine.**" Applied microbiology and biotechnology 99: 2491-2511.
- SILVA, R. (2019). "**Avaliação do ciclo de vida da produção de celulose bacteriana em diferentes meios de cultivo.**"
- SOUZA, J. P. B. d. (2019). "**Produção e caracterização de celulose bacteriana em cultivo estático e agitado.**"
- SOUZA, K. C. **Produção e avaliação de celulose bacteriana em meios de cultura de baixo custo para aplicação em embalagens sustentáveis.** 2023. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência de Materiais) - Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2023.
- WANG, J., J. TAVAKOLI e Y. TANG (2019). "**Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods—A review.**" Carbohydrate polymers 219: 63-76.