

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
CURSO DE QUÍMICA COM ATRIBUIÇÕES TECNOLÓGICAS

ELISA CUNHA LEAL DE ARAUJO

**REFLETINDO SOBRE O CAMINHO DA INDÚSTRIA DERMOCOSMÉTICA:  
ANÁLISE DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA DE ROTAS SINTÉTICAS PARA  
ÁCIDO GLICÓLICO VISANDO ALTERNATIVAS MAIS SUSTENTÁVEIS**

Rio de Janeiro,  
Janeiro de 2024.

ELISA CUNHA LEAL DE ARAUJO

**REFLETINDO SOBRE O CAMINHO DA INDÚSTRIA DERMOCOSMÉTICA:  
ANÁLISE DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA DE ROTAS SINTÉTICAS PARA  
ÁCIDO GLICÓLICO VISANDO ALTERNATIVAS MAIS SUSTENTÁVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Química com Atribuições Tecnológicas da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Santos Barboza.

Rio de Janeiro,  
Janeiro de 2024.

## CIP - Catalogação na Publicação

A663r Araujo, Elisa Cunha Leal de  
Refletindo sobre o caminho da indústria  
dermocosmética: análise do ciclo de vida  
simplificada de rotas sintéticas para ácido  
glicólico visando alternativas mais sustentáveis. /  
Elisa Cunha Leal de Araujo. -- Rio de Janeiro, 2024.  
53 f.

Orientador: Rodolfo Santos Barboza.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto  
de Química, Bacharel em Química, 2024.

1. Análise de Ciclo de Vida. 2. Ácido Glicólico.  
3. Sustentabilidade. 4. Química. I. Barboza, Rodolfo  
Santos, orient. II. Título.

## Folha de Aprovação

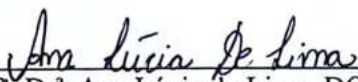
ELISA CUNHA LEAL DE ARAUJO

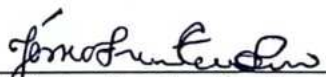
Refletindo sobre o caminho da indústria dermocosmética: análise do ciclo de vida simplificada de rotas sintéticas para ácido glicólico visando alternativas mais sustentáveis

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Química com Atribuições Tecnológicas da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

**Aprovado por:**

  
Prof. Dr. Rodolfo Santos Barboza, DQA-IQ-CCMN-UFRJ.

  
Prof. Dr. Ana Lúcia de Lima, DQA-IQ-CCMN-UFRJ.

  
Prof. Dr. Jéssica Frontino Paulino, DQA-IQ-CCMN-UFRJ.

Rio de Janeiro,  
Janeiro de 2024.

Aos meus pais, Alcio e Dilma.

“Por vocês, faria isso mil vezes.”

## **AGRADECIMENTOS**

Todo meu amor e gratidão à todas as pessoas que se fizeram presente ao longo dessa jornada, que não foi fácil, mas foi necessária. Aos meus pais, por absolutamente tudo e muito mais.

E meus sinceros agradecimentos à professora Rosane, por me permitir finalizar essa jornada. Ao professor Barroco, por me ouvir e me aconselhar. E por fim, o último desse breve agradecimento eu direciono ao professor Rodolfo: pelo zelo, paciência e disposição em me ajudar a concluir esse processo em tão pouco tempo, muito obrigada.

## RESUMO

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta crucial nas análises de sustentabilidade e é capaz de avaliar e quantificar, de forma sistemática, os impactos ambientais que um processo ou produto pode causar ao longo de todo o seu ciclo de vida. Este trabalho teve por objetivo realizar uma ACV simplificada de produção do ácido glicólico, um insumo de interesse comercial da indústria dermocosmética, em três rotas sintéticas para comparação: a rota mais tradicional de produção industrial, a partir da carbonilação catalítica do formaldeído; uma rota alternativa a partir da catalise enzimática do formaldeído com a enzima *nitrilase*; e uma segunda rota alternativa, a partir da oxidação bioquímica do etilenoglicol pela bactéria *Gluconobacter oxydans*. O estudo se deu a partir de um *software* de livre acesso, o *OpenLCA*, 2.0, e a análise foi simplificada e limitada às etapas do processo de extração da matéria-prima até a produção do insumo de interesse, sendo definida como uma análise “do berço ao portão”. Os dados utilizados foram obtidos através de adaptações da literatura e no *software* através de uma combinação de quatro diferentes bancos de dados (AGRIBALYSE 3.0.1, ENVIRONMENTAL FOOTPRINTS 3.1, NEEDS 2.0 e *OpenLCA* LCIA METHODS 2.0.5). Para a Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), três diferentes métodos de cálculo foram utilizados para comparação (CML-IA *baseline*, *Ecological Scarcity* 2013 e ReCipe 2016 *midpoint* H). As categorias de impacto foram agrupadas e avaliadas a partir de três grupos: “Impacto à Integridade Humana”, “Impacto Energético” e “Impacto Ambiental”. O estudo demonstrou que a rota de produção do ácido glicólico a partir da oxidação do etilenoglicol é a opção mais sustentável, tendo os menores impactos nas categorias dos três grupos supracitados.

**Palavras-chave:** Análise de Ciclo de Vida; Ácido Glicólico; Sustentabilidade; Síntese.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estrutura do ácido glicólico .....	14
Figura 2	– Reação de síntese da rota tradicional .....	16
Figura 3	– Reação de síntese da rota alternativa I .....	17
Figura 4	– Reação de síntese da rota alternativa III .....	17
Figura 5	– Esquema de uma economia circular .....	19
Figura 6	– Fases de uma ACV .....	22
Figura 7	– Aba de criação de novo processo no <i>software OpenLCA</i> .....	30
Figura 8	– Aba de criação de novo sistema de produto no <i>software OpenLCA</i> .....	30
Figura 9	– Aba de propriedades de cálculo no <i>software OpenLCA</i> .....	31
Figura 10	– Modelo gráfico da Rota Tradicional .....	31
Figura 11	– Modelo gráfico da Rota Alternativa I .....	32
Figura 12	– Modelo gráfico da Rota Alternativa II .....	32

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Comparação dos resultados entre as rotas para o método CML-IA .....	34
Gráfico 2	– Comparação dos resultados entre as rotas para o método ES .....	36
Gráfico 3	– Comparação dos resultados entre as rotas para o método RCMH .....	37
Gráfico 4	– Categorias de Impacto à Integridade Humana .....	41
Gráfico 5	– Categorias de Impacto Energético .....	41
Gráfico 6	– Categorias de Impacto Ambiental (Aquecimento Global) .....	42
Gráfico 7	– Categorias de Impacto Ambiental (Depleção da Camada de Ozônio) ....	43
Gráfico 8	– Categorias de Impacto Ambiental (Acidificação) .....	44
Gráfico 9	– Categorias de Impacto Ambiental (Ecotoxicidade) .....	44
Gráfico 10	– Categorias de Impacto Ambiental (Recursos Minerais) .....	45
Gráfico 11	– Categorias de Impacto Ambiental (Material Particulado) .....	46
Gráfico 12	– Categorias de Impacto Ambiental (Recursos Hídricos) .....	46
Gráfico 13	– Categorias de Impacto Ambiental (Uso da Terra) .....	47
Gráfico 14	– Categorias de Impacto Ambiental (Eutrofização) .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Categorias de impacto e unidades para o método CML-IA .....	28
Tabela 2	–	Categorias de impacto e unidades para o método ES .....	28
Tabela 3	–	Categorias de impacto e unidades para o método RCMH .....	29
Tabela 4	–	Resultados para o método de cálculo CML-IA .....	33
Tabela 5	–	Resultados para o método de cálculo ES .....	35
Tabela 6	–	Resultados para o método de cálculo RCMH .....	37

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Propriedades físico-químicas do ácido glicólico .....	14
Quadro 2	– Contribuições dos processos para as categorias de impacto mais significativas em cada método .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
CML-IA	Método CML-IA <i>baseline</i>
ES	Método <i>Ecological Scarcity</i> 2013
ICV	Análise de Inventários de Ciclo de Vida
ISO	Organização Internacional de Normalização
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i> – Avaliação do Ciclo de Vida
MP	Material particulado
POP	Poluentes orgânicos persistentes
RA-I	Rota Alternativa I (síntese a partir da catálise enzimática do Formaldeído)
RA-II	Rota Alternativa II (síntese a partir da oxidação do Etilenoglicol)
RCMH	Método ReCipe 2016 <i>midpoint</i> H
RT	Rota Tradicional (síntese a partir da carbonilação do Formaldeído)
UBP	<i>Umweltbelastungspunkte</i> – Pontos de poluição ambiental

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1</b>	<b>Ácido Glicólico</b> .....	14
1.1.1	Propriedades Gerais e Aplicações .....	14
1.1.2	Principais Meios de Produção do Ácido Glicólico .....	15
1.1.2.1	Rota química a partir do formaldeído (rota tradicional) .....	15
1.1.2.2	Rotas alternativas (biotecnológicas) .....	17
<b>1.2</b>	<b>Economia Circular e Sustentabilidade</b> .....	18
<b>1.3</b>	<b>Avaliação de Ciclo de Vida</b> .....	20
1.3.1	Histórico .....	20
1.3.2	Método .....	21
1.3.2.1	Definição de objetivos e escopo .....	22
1.3.2.2	Análise de inventário .....	23
1.3.2.3	Avaliação de impacto .....	23
1.3.2.4	Interpretação .....	23
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b> .....	23
1.4.1	Objetivo Geral .....	23
1.4.2	Objetivos Específicos .....	23
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	25
<b>2.1</b>	<b>Software e Base de Dados</b> .....	25
<b>2.2</b>	<b>Definição de Objetivos e Escopo e Análise de Inventário</b> .....	25
2.2.1	Fronteiras do Sistema .....	26
2.2.2	Função e Unidade Funcional .....	26
2.2.3	Requisito de Dados .....	26
2.2.4	Análise de Inventário e Método AICV .....	27
2.2.5	Categorias de Impacto .....	27
2.2.6	Modelagem .....	29
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	33
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	50
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

A constante busca pelo desenvolvimento sustentável, capaz de promover melhorias na qualidade de vida humana através da preservação ambiental e do desenvolvimento social, tem-se feito cada vez mais presente na química. Em 1987, o relatório intitulado “Nosso Futuro Comum”, popularmente conhecido como “Relatório de Brundtland” e formulado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento descreveu o conceito de desenvolvimento sustentável da seguinte forma:

O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades (Nosso Futuro Comum, 1987, p.46).

Pensar no ciclo de vida de um processo ou de um produto é uma prática essencial para o desenvolvimento sustentável e isso significa considerar todas as etapas desse processo produtivo, bem como os seus deslocamentos. Esse pensamento serve como base no desenvolvimento de diversas ferramentas capazes de auxiliar na busca pela produção química mais sustentável e uma delas é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma ferramenta capaz de avaliar e quantificar, de forma sistemática, os impactos ambientais que um processo ou produto pode causar ao longo de todo o seu ciclo de vida, que compreende sua extração, produção, transporte, uso e disposição final (REDE ACV, 2023).

No presente trabalho, propôs-se estudar/avaliar de forma simplificada, a produção industrial de ácido glicólico (**Figura 1; Pág. 14**), produto químico de importância estratégica na produção de dermocosméticos, um mercado crescente na indústria brasileira.

Em 2019 a indústria brasileira de cosméticos e produtos de beleza atingiu a quarta posição no mercado mundial, com um faturamento de aproximadamente 29 bilhões de dólares (FORBES, 2020). Esse fato evidencia o potencial de crescimento dessa área, que leva ao conseqüente aumento da produção de seus insumos, incluindo o ácido glicólico, presente em diversas formulações dermocosméticas.

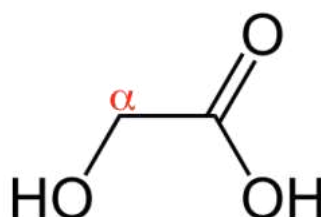
O faturamento do mercado do ácido glicólico foi de 327 milhões no ano de 2022 e a previsão de faturamento estimada de para o ano de 2027 é de 450 milhões de dólares, o que representa uma taxa de crescimento anual esperada de 6,6% de 2022 a 2027 (MARKETS & MARKETS, 2023).

## 1.1 Ácido Glicólico

### 1.1.1 Propriedades Gerais e Aplicações

Os alfa-hidroxiácidos são ácidos orgânicos que se destacam pela presença de um grupo hidroxila ligado ao carbono adjacente do grupo carboxila. O ácido 2-hidroxietanoico, mais comumente conhecido como ácido glicólico e objeto de estudo, é o ácido de estrutura mais simples deste grupo, que está descrita na figura 1.

Figura 1. Estrutura do ácido glicólico.



As principais características físico-químicas do ácido glicólico e outras informações pertinentes estão descritas no quadro 1 abaixo:

Quadro 1 – Propriedades físico-químicas do ácido glicólico.

<b>Nome IUPAC</b>	Ácido 2-hidroxietanoico
<b>Registro CAS</b>	79-14-1
<b>Fórmula</b>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>
<b>Massa molar</b>	76,05 g/mol
<b>Características físicas</b>	Sólido transparente, cristalino. Sem odor. Higroscópico.
<b>Solubilidade</b>	Solúvel em etanol, éter etílico, metanol, acetona, ácido acético e água.
<b>Ponto de fusão</b>	78-80°C
<b>Ponto de ebulição</b>	100°C
<b>Densidade</b>	1,49 g/cm <sup>3</sup> (25°C)
<b>Outros nomes</b>	Ácido hidroxiacético, ácido glicólico.

Fonte: dados adaptados do PUBCHEM (2024).

Esse grupo de ácidos é bastante utilizado na indústria farmacêutica na formulação de dermocosméticos, devido a sua ação esfoliante do estrato córneo, que é a camada mais externa de epiderme, onde se localizam as células mortas. Essa ação de esfoliação é alcançada pela ligação dos ácidos com o cálcio, que desempenha um papel na manutenção da coesão entre as células da pele. Para além da esfoliação, o referido ácido é capaz de conferir melhorias na textura e aparência da pele, pois, assim como outros alfa-hidroxiácidos, possui também propriedades hidratantes, tais como o ácido lático e seus sais derivados, sendo assim utilizados como produtos hidratantes, esfoliantes e antienvhecimento (BISSET, 2009).

Mas, para além de suas propriedades cosméticas, o ácido glicólico também é bastante utilizado em diversas outras indústrias, incluindo a indústria têxtil, na formulação de tinturas, estampania e processos de engomagem. Pode ser utilizado ainda como agentes de limpeza industrial devido às suas propriedades antibactericidas e com baixo potencial de corrosão (MILTENBERGER, 2000). Também é, em menor escala, usado na produção de polímeros biodegradáveis utilizados na formulação de embalagens e aplicações biomédicas (JEM et al., 2020).

### 1.1.2 Principais Meios de Produção do Ácido Glicólico

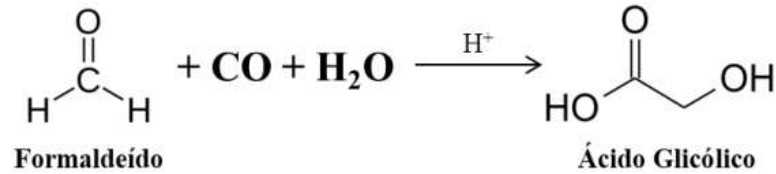
O ácido glicólico pode ser industrialmente produzido a partir de fontes derivadas de petróleo, que é a forma de produção industrial mais comumente utilizada. Porém, tecnologias de menores impactos ambientais tais como rotas envolvendo células biocatalíticas e fontes renováveis de energia, tais como a cana de açúcar, tem sido desenvolvidas e se mostrado bastante eficiente (JEM et al., 2020; KENT, 2017).

Serão descritas abaixo três rotas principais que serão os objetos de comparação neste trabalho: a produção do ácido glicólico através da rota química tradicional a partir do formaldeído e duas rotas alternativas bioquímicas a partir do formaldeído e do etilenoglicol, respectivamente.

#### 1.1.2.1 Rota química a partir do formaldeído (rota tradicional)

A principal rota para a produção comercial de ácido glicólico se dá através da reação de formaldeído com monóxido de carbono em meio aquoso, como descrita na figura 2 (**Pág. 16**):

Figura 2. Reação de síntese da rota tradicional.



Fonte: Moraes (2018).

Esta rota, desenvolvida em 1936 como uma alternativa aprimorada e mais econômica, tem sido utilizada até os dias atuais para a produção do ácido glicólico. O formaldeído é dissolvido em água e, na presença de uma atmosfera pressurizada de monóxido de carbono e com a adição de um catalisador homogêneo de características ácidas, o sistema é aquecido e então a reação de produção de ácido glicólico é iniciada. A reação pode ser ainda realizada sem a presença do catalisador, porém nestas condições o início da reação se dá de forma mais lenta, progredindo à medida que o ácido glicólico é gerado no meio reacional. Sendo assim, é recomendado o uso de catalisadores, que podem ser escolhidos de forma abrangente. Ácidos inorgânicos são mais comumente utilizados, tais como o ácido clorídrico ou sulfúrico. Outras opções são ácidos orgânicos, sais ácidos inorgânicos e orgânicos. A presença de catalisadores ainda auxilia na diminuição das condições de alta pressão e temperatura, as quais o meio reacional precisa ser submetido (LODER, 1939).

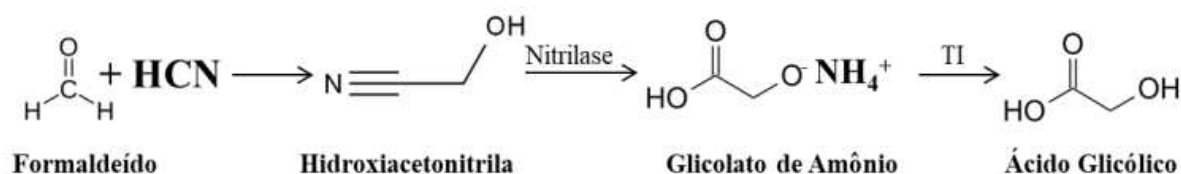
Condições mais gerais da reação são descritas por Loder (1939), que afirma que os catalisadores podem estar em proporções molares iguais ou maiores que a de formaldeído. Já a água, deve estar presente em uma proporção mínima de 0,5 mol por mol de formaldeído (idealmente menores que 15 mol por mol de formaldeído). A reação acontece preferencialmente em pressões acima da atmosférica, podendo variar entre 5 e 1500 atm ou mais e o monóxido de carbono utilizado deve ter pureza elevada. Já as condições mais ideais de temperatura variam entre 140 e 225°C. Este processo exige sistemas de refrigeração para manutenção da temperatura ideal, uma vez que a reação é exotérmica e o produto é obtido e separado do meio reacional por destilação a uma pressão de 80-100 mmHg. O ácido glicólico pode ser cristalizado da solução concentrada após retirada do catalisador e excesso de água e o rendimento percentual é calculado com base no formaldeído, sendo 94% e 95,5% os maiores rendimentos obtidos através de reações descritas (LODER, 1939).

### 1.1.2.2 Rotas alternativas (biotecnológicas)

Diversas rotas alternativas têm sido propostas para a produção de ácido glicólico, visando um processo mais sustentável que o descrito anteriormente. Rotas biotecnológicas, com maior especificidade e condições mais brandas, têm sido estudadas e uma delas é a rota quimio-enzimática de produção do ácido glicólico a partir do formaldeído.

Nesta reação ocorre, em uma primeira etapa, a conversão do formaldeído no intermediário hidroxiacetonitrila, a partir da sua reação com cianeto de hidrogênio. Em seguida esse intermediário é transformado no ácido glicólico, em um processo de hidrólise catalisado pela enzima *nitrilase*, que pode ser realizado em condições mais brandas que se comparada a rota tradicional, e capaz de apresentar alto rendimento (KENT, 2017; PANOVA 2007). As etapas dessa reação estão descritas na figura 3 abaixo.

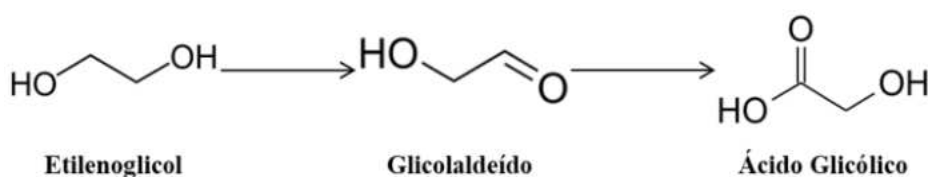
Figura 3. Reação de síntese da rota alternativa I.



Fonte: Moraes (2018).

Uma outra forma de produção alternativa do ácido glicólico é a partir do etilenoglicol. Essa reação de síntese, descrita na figura 4, ocorre pela oxidação em duas etapas do etilenoglicol a ácido glicólico por microrganismos de ocorrência natural. Vale ressaltar que esta rota pode ser ainda mais sustentável, se a produção de etilenoglicol for a partir de fontes renováveis. O processo de bioconversão do etilenoglicol pode alcançar um rendimento de até 90%, como o realizado a partir da bactéria *Gluconobacter oxydans* (WEI, 2009; HUA, 2018).

Figura 4. Reação de síntese da rota alternativa II.



Fonte: Moraes (2018).

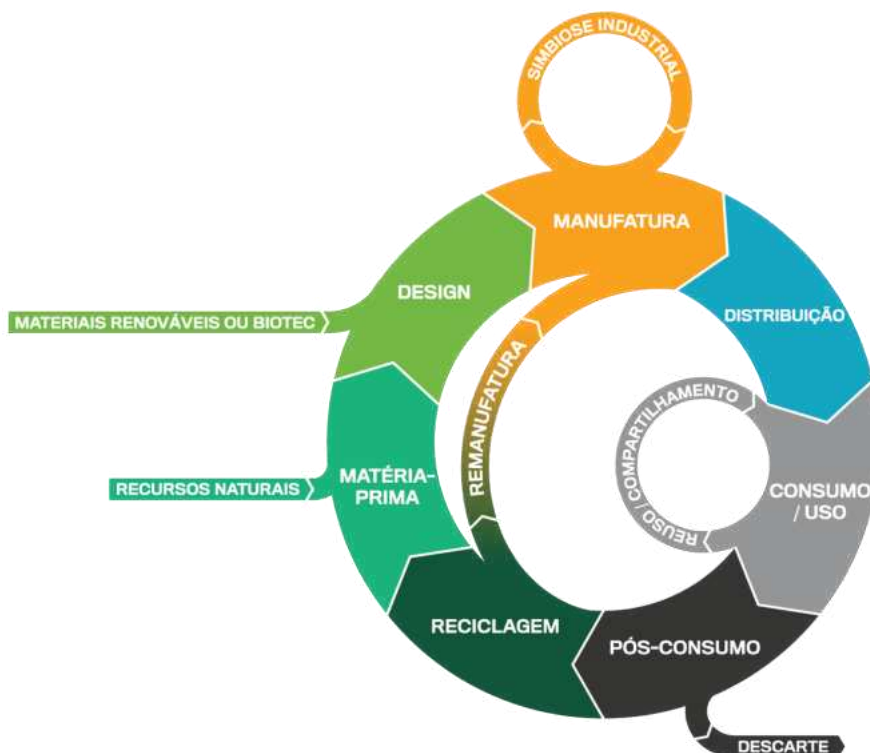
A reação proposta por Wei (2009), a partir de uma biotransformação em batelada, conferiu um rendimento de 86,7% de produção do ácido glicólico, sem a formação de subprodutos de reação. O crescimento celular da bactéria *G. oxydans* foi realizado a partir do consumo de sorbitol em meio controlado (pH 6,0, temperatura de 28°C e pressão de oxigênio acima de 25%). Um estudo realizado por Moraes (2018) alcançou um rendimento similar, com crescimento celular a partir do manitol como fonte de carbono e bioconversão por batelada alimentada de forma periódica com uma concentração de 10 g/L de etilenoglicol em meio tamponado em pH 5,0.

## 1.2 Economia Circular e Sustentabilidade

A economia circular é um conceito que se contrapõe a economia linear, e ambos foram desenvolvidos com o intuito de explicar a forma como produtos são produzidos e comercializados. Na economia linear, formato no qual toda a economia global se desenvolveu ao longo do tempo, observa-se um caminho “linear” no processo produtivo, que passa pela extração de recursos, a produção, o uso e seu descarte final. E como todo esse processo desconsidera a limitação dos recursos existentes, além de se basear na utilização de grandes quantidades desses recursos com o menor custo possível, observa-se um grande impacto ao meio ambiente, com a exaustão desses recursos naturais e perda de biodiversidade, além da enorme geração de poluição no meio produtivo e com os resíduos gerados pelo descarte dos produtos (ISO, 2023; ASSUNÇÃO 2019).

A partir deste conceito de economia linear, encontra-se na economia circular uma alternativa para esse esgotamento de recursos, uma vez que ela se fundamenta na circularidade dos recursos utilizados nesse processo anteriormente linear, fazendo com que muitos desses recursos possam ser regenerados e reaproveitados. Na figura 5 (Pág. 19) é possível visualizar a forma como a economia circular se estrutura e as diversas etapas em que podem ser incluídas o reaproveitamento de insumos e processos.

Figura 5. Esquema de uma economia circular



Fonte: Fiesp (2024).

Com a economia circular é possível satisfazer as necessidades humanas através do gerenciamento dos riscos aos recursos ambientais, mitigação e adaptação das mudanças climáticas, com o comprometimento de gerenciar soluções mais sustentáveis ao processo produtivo (ISO, 2023).

A sustentabilidade pode ser entendida como uma forma de crescimento que visa a eficiência econômica sem renunciar à responsabilidade ambiental e social, fazendo com que seja possível alcançar o desenvolvimento sem o comprometimento dos recursos futuros necessários a esse crescimento. É possível alcançar menores os impactos ambientais, sociais e econômicos em um processo através da aplicação de uma economia circular e as empresas são parte essencial desse processo (MARTINS, 2023).

É possível observar um aumento do interesse na indústria de cosméticos, por exemplo, na formulação de produtos mais sustentáveis e no interesse do consumidor por esses produtos. De acordo com Martins (2023), é de interesse da indústria de cosméticos abordar todo o ciclo de vida de seus produtos, desde a fase de *design* até o pós-uso, incluindo a preocupação pelo uso ético de seus ingredientes, a formulação de testes de eficiência, o comércio e o gerenciamento dos recursos e resíduos utilizados na durante a produção. Dentre essas empresas,

a Garnier e a L'Oréal já aplicam a produção sustentável de seus produtos em todo o seu ciclo de vida (MARTINS, 2023).

Atualmente no Brasil existe a REDE ACV (Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida), na qual fazem parte não somente empresas, mas também, fundações e universidades cujo objetivo visa “*incorporar a ACV como uma ferramenta para determinar a sustentabilidade dos produtos*”. Criada em 2013, essa rede conta com diversos associados, incluindo grandes empresas como a BAYER, BRASKEM, RAIZEN E BASF, como também a ABNT, EMBRAPA, FGV E UFSCar (REDE ACV, 2023).

### **1.3 Avaliação de Ciclo de Vida**

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma técnica de avaliação sistêmica com o objetivo de quantificar os possíveis impactos ambientais que um produto ou serviço pode gerar em algumas ou todas as fases do seu ciclo de vida, desde a aquisição de matérias-primas, produção, distribuição, utilização e tratamento pós uso (descarte, reuso ou reciclagem) (IBICT, 2023).

Uma vez quantificados, as diversas categorias de impacto ao qual cada ou várias partes do processo estão relacionados, podemos determinar quais pontos críticos do ciclo de vida de determinado produto ou serviço tem mais impacto e pode ser melhorado, de forma a aprimorar o desempenho ambiental dos produtos e processos. A comparação da ACV entre processos similares ou alternativos também permite a tomada de decisões referentes a escolha de processos de menos impactos para determinado produto.

#### **1.3.1 Histórico**

O desenvolvimento inicial da avaliação do ciclo de vida (ACV) teve início na década de 60, quando os primeiros debates acerca da limitação de recursos naturais começaram a surgir e vem desde então refletindo o crescente interesse na compreensão e redução dos impactos ambientais relacionados a produtos e processos. Os primeiros estudos que serviram como base para a construção da ACV como conhecemos hoje ocorreram ainda nessa década. Em 1963, um estudo acerca dos requisitos energéticos para a produção de intermediários e produtos químicos foi desenvolvido por Harold Smith e, em 1968, foi realizado um estudo para a “*Coca-Cola Company*” comparando os impactos ambientais de diferentes tipos de embalagem (BJØRN et al., 2018; IBICT, 2023).

A partir de 1989 os primeiros *softwares* dedicados à análise do ciclo de vida foram desenvolvidos e comercializados, bem como o surgimento de eventos científicos sobre o tema (BJØRN et al., 2018). A ACV foi então se estruturando cada vez mais e na década de 90 passou a ganhar reconhecimento internacional como uma ferramenta de avaliação ambiental essencial. Em 1997 ocorreu a publicação das normas ISO 14040 e 14044, que estabeleceram de vez a sua base metodológica.

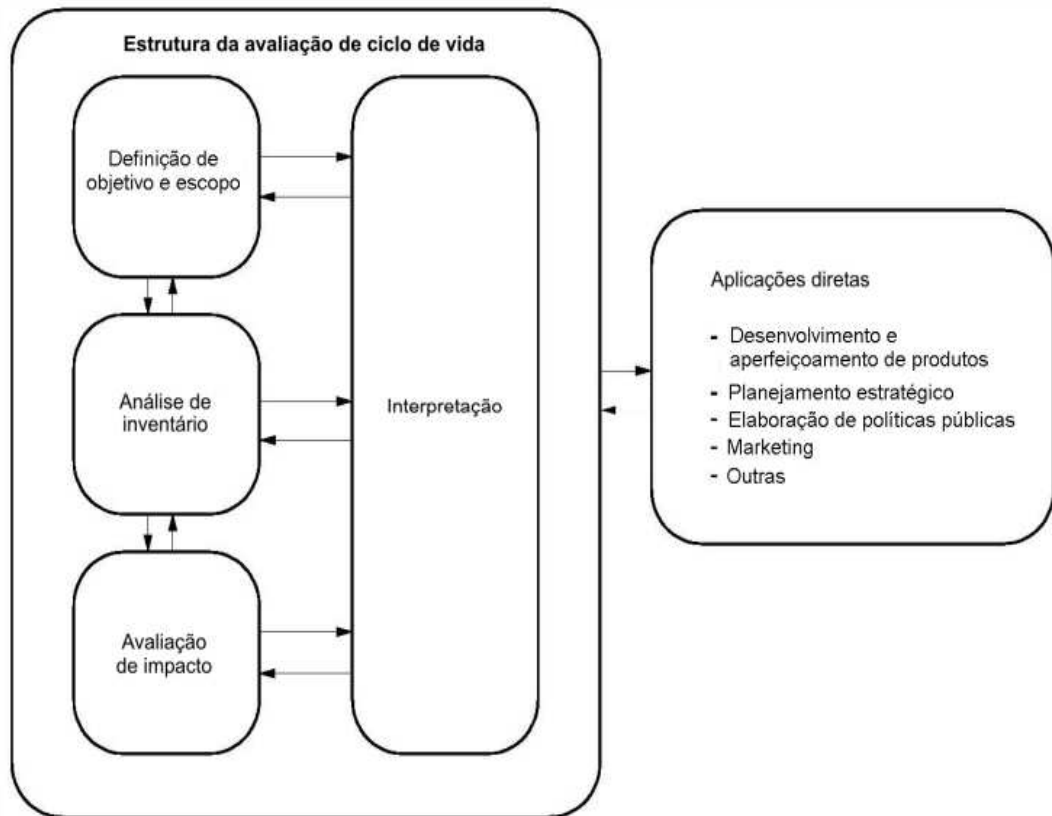
Em 2002, a Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química (SETAC) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) se uniram no lançamento da Iniciativa para o Ciclo de Vida (*Life Cycle Initiative*), com o objetivo de promover o consenso internacional, o acesso e aplicação do conhecimento científico do ciclo de vida (UNEP, 2023).

Já no Brasil, foi possível observar o desenvolvimento da ACV a partir da década de 90. Um subcomitê da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em parceria com o Grupo de Apoio a Normalização Ambiental (GANNA) foi criado em 1994 para desenvolver os padrões e diretrizes da ACV no contexto nacional. Em 2002, a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV) foi fundada, contribuindo assim para a disseminação do conhecimento, desenvolvimento e aplicação da ACV e de parcerias de interesse (IBICT, 2023; ABCV, 2023).

### 1.3.2 Método

É a partir da série de normas ISO 14040 que são definidos os parâmetros que devem estar contidos nos estudos de análise do ciclo de vida e esses estudos são essencialmente compostos de quatro fases, esquematizadas na figura 6 (**Pág. 22**). São elas as fases de definição de objetivo e escopo (primeira fase), de análise de inventários (segunda fase), de avaliação de impactos (terceira fase) e por fim, a de interpretação (quarta fase).

Figura 6. Fases de uma ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2014).

### 1.3.2.1 Definição de objetivos e escopo

A fase de definição de objetivos e escopo se caracteriza pela determinação da aplicação, dos motivos e do público-alvo pretendido do estudo. As fronteiras temporais e geográficas do estudo, a unidade funcional na qual o estudo será estruturado e quantificado, fluxos de referência, critérios de qualidade, regras de corte e quais categorias de impacto serão consideradas também devem ser definidos.

Os limites de um sistema a ser avaliado por uma ACV podem ser definidas como “do berço ao túmulo”, quando elas englobam uma análise completa de todas as etapas do processo que começa na extração da matéria-prima até a disposição final do produto desse processo, incluindo transporte, fornecimento de energia e outras variáveis, e “do berço ao portão” quando as etapas incluídas na análise são apenas as da extração à produção (excluindo-se assim as etapas de transporte, uso e disposição final). Outras definições podem ser aplicadas, como “do berço ao berço” (conceito que consiste na utilização dos recursos de forma cíclica e considera que os resíduos finais possam ser reutilizados no início do ciclo), “do portão ao portão”, e “do

poço a roda” (estuda o impacto na etapa de transporte) dependendo da complexidade do ciclo de vida e de quais são os segmentos desse ciclo de interesse a serem avaliados (HAUSCHILD, 2018).

#### 1.3.2.2 Análise de inventário

A análise de inventários (ICV) é a fase de coleta de dados, onde todos os fluxos de entrada e saída de massa e de energia associados a todas as etapas do ciclo de vida do produto estudado serão determinadas e os procedimentos de cálculo para quantificação das entradas e saídas do sistema.

#### 1.3.2.3 Avaliação de impacto

Na avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) ocorre a conversão dos fluxos definidos no inventário (fase 2) em categorias de impacto específicas com indicadores de categoria.

#### 1.3.2.4 Interpretação

Nesta última fase de interpretação se faz a avaliação dos resultados obtidos da AICV. São definidas as conclusões, limitações e recomendações do estudo em questão.

### **1.4 Objetivos**

#### 1.4.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral a análise do ciclo de vida simplificada, do berço ao portão do ácido glicólico e a comparação do impacto de três rotas sintéticas disponíveis na literatura: a rota tradicional a partir da conversão química do formaldeído e duas rotas alternativas, a partir da bioconversão de formaldeído e de etilenoglicol.

#### 1.4.2 Objetivo Específico

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca das principais rotas de produção do ácido glicólico e suas principais variáveis e parâmetros operacionais;

- Realizar uma análise do ciclo de vida simplificada a partir de um *software* de livre acesso e mensurar os impactos do processo de produção do ácido glicólico do berço ao portão, a partir de diferentes rotas sintéticas;
- Comparar os resultados das diferentes rotas por diferentes calculadoras de impacto, verificando se há reprodução dos resultados com base em diferentes categorias;
- Determinar a partir dos resultados obtidos qual rota de produção do ácido glicólico é a mais sustentável e quais etapas foram as mais significativas nesse processo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 *Software* e Base de dados

Para a análise de ciclo de vida das rotas de produção do ácido glicólico foi utilizado o *software* de código aberto *openLCA* (versão 2.0.0), desenvolvido pela empresa alemã de consultoria e *software* em sustentabilidade GreenDelta, e disponibilizado através do link <https://www.openlca.org/download/>.

Após aquisição do *software*, foram selecionadas e combinadas quatro diferentes bases de dados de livre acesso (através do link “<https://nexus.openlca.org/databases>”), sendo elas:

- AGRIBALYSE (versão 3.0.1);
- ENVIRONMENTAL FOOTPRINTS (versão 3.1);
- NEEDS (versão 2);
- openLCA LCIA METHODS (versão 2.0.5).

A base de dados “Agribalyse” foi usada como banco de dados principal e as outras duas foram importadas a ela, de forma que gerasse um banco de dados mais completo, para maior abrangência nas análises realizadas. Cada uma delas tem suas próprias características, sendo escolhidas com base nos usos mais comuns encontrados na literatura.

A base de dados “Agribalyse” é, principalmente, voltada para produtos agrícolas e alimentícios. Já a *Environmental Footprints* é uma base de dados com conjuntos secundários de inventário do ciclo de vida que atende a padrões de pegadas ambientais de diversos provedores. A NEEDS consiste em uma base de dados industriais sobre o ciclo de vida de serviços de transporte, eletricidade e fornecimento de materiais. Por fim, a base de dados *openLCA LCIA Methods* consiste num pacote de mais de 40 métodos de cálculos para avaliação de categorias de impacto compatíveis com as bases de dados utilizadas (*openLCA*, 2023).

### 2.2 Definição de Objetivos e Escopo e Análise de Inventário

Como definido anteriormente, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma análise do ciclo de vida de 3 diferentes rotas de produção do ácido glicólico e compará-las para fins de verificação da rota sintética mais sustentável. Assim, abaixo, descreve-se o escopo dos processos realizados.

### 2.2.1 Fronteiras do Sistema

As etapas incluídas no sistema foram exclusivamente as de síntese, ou seja, de transformação da matéria-prima (reagentes) em produtos, o que descreve uma análise do berço ao portão. Etapas de transporte e comercialização das matérias-primas e disposição do produto não foram consideradas. Uma fronteira geográfica também não foi definida para que a pesquisa na base de dados não fosse tão limitante, uma vez que os dados foram obtidos com base em diferentes bases de dados e da literatura de diferentes localidades.

### 2.2.2 Função e Unidade Funcional

Para garantir a comparabilidade dos resultados, a unidade funcional utilizada como base de referência para a associação das entradas e saídas foi de 1 Kg de produto (ácido glicólico). Já o produto, bem como sua função é a mesma para as três rotas sintéticas de comparação.

### 2.2.3 Requisito de Dados

Os dados foram adaptados a partir de informações já existentes na literatura e em bases de dados pré-existentes (dados secundários). Os artigos de referência foram escolhidos com base no detalhamento de informações que eram disponibilizadas das rotas de síntese definidas também o cruzamento de referências disponíveis entre elas. Para a rota tradicional a partir do formaldeído, foi realizada uma adaptação de dados já existentes baseados em um estudo de ciclo de vida realizado por Zhou et al. (2021). Para a rota alternativa a partir do formaldeído, dados foram calculados e estimados a partir dos estudos de Panova et al. (2007). Já no caso da rota alternativa a partir do etilenoglicol, a dissertação de Moraes (2018) – um trabalho desenvolvido pelo Laboratório de Desenvolvimento de Bioprocessos (LADEBIO), na UFRJ – foi utilizado como referência principal.

### 2.2.4 Análise de Inventário e Método AICV

Os fluxos de entrada (*input*) e saída (*output*) foram definidos a partir das referências bibliográficas e a análise de inventário de ciclo de vida (ICV) foi realizada a partir de 3 diferentes métodos listados abaixo com suas respectivas traduções e abreviações que serão usadas ao longo desse trabalho.

- CML-IA *baseline* (CML-IA linha de base) – **CML-IA**
- *Ecological Scarcity* 2013 (Escassez ecológica) – **ES**
- ReCipe 2016 *midpoint* H (ReCipe ponto médio, H) – **RCMH**

O método “CML-IA *baseline*” contém as categorias de impacto mais comumente utilizadas em ACV e tem como base uma abordagem *midpoint* (que utiliza indicadores localizados ao longo dos processos que resultam em uma categoria de impacto), além de ter um escopo de aplicação global.

O método “*Ecological Scarcity*” calcula os impactos ambientais a partir de ecofatores derivados de alvos ou legislações ambientais europeias. O objetivo principal desse método é o de comparar produtos e aprimorar processos (Acero *et al.*, 2016).

O método ReCipe, inicialmente uma combinação do método CML 2000 e um segundo método (Eco-Indicator 99), na sua versão “ReCipe *midpoint* H” apresenta indicadores de ponto médio cujas pontuações expressam a importância da categoria de impacto indicada (HUIJBREGTS *et al.*, 2017) e assim como o método CML-IA, apresenta um escopo global.

### 2.2.5 Categorias de Impacto

As categorias de impacto foram definidas a partir dos métodos utilizados para as análises do ciclo de vida. Nas tabelas 1, 2 e 3 (**Págs. 28-29**) encontram-se descritas as categorias de impacto de cada método e suas unidades de quantificação.

Tabela 1 – Categorias de impacto e unidades para o método CML-IA.

<b>Categoria de Impacto (11 categorias)</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição da unidade</b>
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	quilograma de equivalente de dióxido de enxofre
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	quilograma de equivalente de clorofluorocarbono-11
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DB eq	quilograma de equivalente de 1,4-dioxano
Ecotoxicidade marinha		
Ecotoxicidade terrestre		
Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	megajoule
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	quilograma de equivalente de antimônio
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	quilograma de equivalente de fosfato
Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	quilograma de equivalente de etileno
Potencial de aquecimento global em 100 anos	kg CO <sub>2</sub> eq	quilograma de equivalente de dióxido de carbono
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	quilograma de equivalente de 1,4-dioxano

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Tabela 2 – Categorias de impacto e unidades para o método ES.

<b>Categoria de Impacto (18 categorias)</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição da unidade</b>
Aquecimento global	UBP	A unidade UBP, é uma abreviação para “ <i>Umweltbelastungspunkte</i> ”, traduzida do alemão como “pontos de poluição ambiental”, ou ecopontos. Eles são quantificados a partir de ecofatores que atribuem pontos proporcionalmente à intensidade de impactos ou uso de recursos ambientais acima de metas/legislações estabelecidas (FRISCHKNECHT; BÜSSER KNÖPFEL, 2013).
Depleção da camada de ozônio		
Depósito de resíduos não radioativos		
Depósito de resíduos radioativos		
Metais pesados na água		
Metais pesados no ar		
Metais pesados no solo		
Pesticidas no solo		
Poluentes da água		
Poluentes Orgânicos Persistentes na água		
Principais poluentes atmosféricos e material particulado		
Recursos energéticos		
Recursos hídricos		
Recursos minerais		
Substâncias carcinogênicas no ar		
Substâncias radioativas na água		
Substâncias radioativas no ar		
Uso da terra		

Fonte: elaborado pela autora (2024).

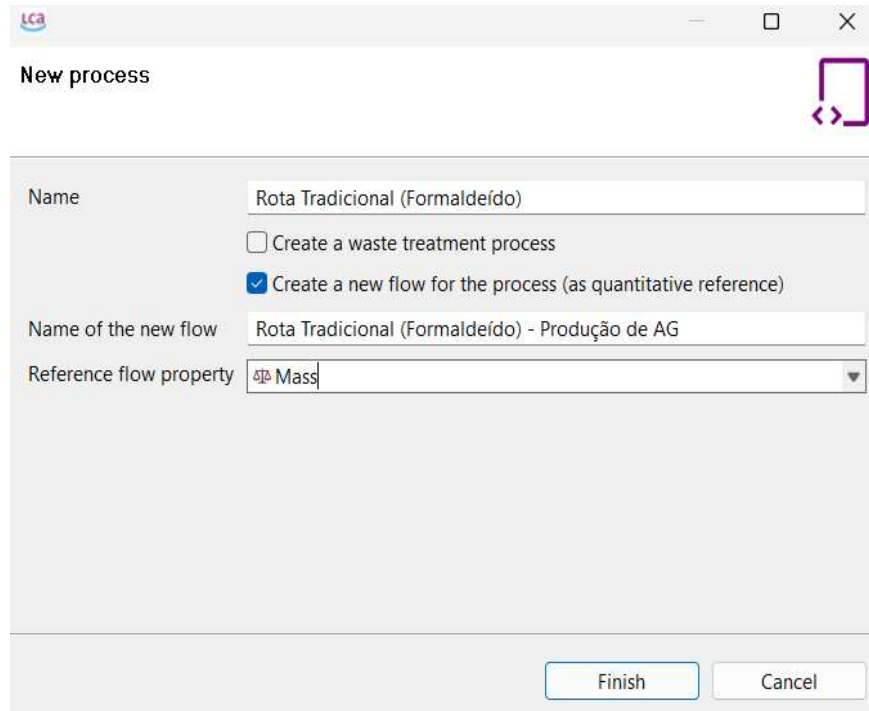
Tabela 3 – Categorias de impacto e unidades para o método RCMH.

<b>Categoria de Impacto (18 categorias)</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição da unidade</b>
Acidificação terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	quilograma de equivalente de dióxido de enxofre
Aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	quilograma de equivalente de dióxido de carbono
Consumo de água	m <sup>3</sup>	metro cúbico
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	quilograma de equivalente de clorofluorocarbono-11
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB	quilograma de equivalente de 1,4-dioxano
Ecotoxicidade marinha		
Ecotoxicidade terrestre		
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	quilograma de equivalente de petróleo
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	quilograma de equivalente de cobre
Eutrofização em água doce	kg P eq	quilograma de equivalente de fósforo
Eutrofização marinha	kg N eq	quilograma de equivalente de nitrogênio
Formação de material particulado fino	kg PM <sub>2.5</sub> eq	quilograma de equivalente de material particulado fino com diâmetro de até 2,5 micrômetros
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	kg NO <sub>x</sub> eq	quilograma de equivalente de óxidos de nitrogênio
Formação de ozônio, saúde humana		
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	kilobecquerel de equivalente de cobalto-60
Toxicidade carcinogênica para humanos	kg 1,4-DCB	quilograma de equivalente de 1,4-dioxano
Toxicidade não carcinogênica para humanos		
Uso da terra	m <sup>2</sup> a crop eq	metros quadrados por ano de equivalente de safra

**Fonte:** elaborado pela autora (2024).

## 2.2.6 Modelagem

A partir do *software openLCA*, três diferentes processos foram criados e nomeados para comparação como: Rota Tradicional (Formaldeído), Rota Alternativa I (Formaldeído), Rota Alternativa II (Etilenoglicol). Uma vez criados os processos, os fluxos de entrada e saída foram adicionados em suas respectivas quantidades. Sistemas de produtos (*Product System*) foram criados a partir de cada processo e então foram selecionados os métodos de cálculo para avaliação dos impactos. Todas essas etapas do *software* estão exemplificadas nas figuras 7, 8 e 9 (**Pág. 30-31**):

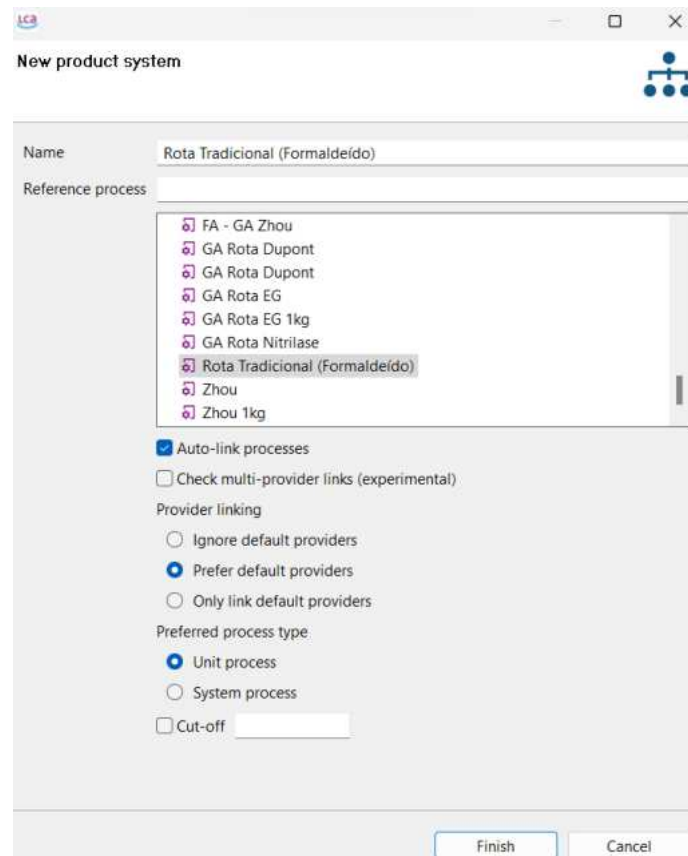
Figura 7 Aba de criação de novo processo no *software OpenLCA*.

The screenshot shows the 'New process' dialog box in the OpenLCA software. The window title is 'lca'. The dialog has a title bar with standard window controls and a purple icon of a document with arrows. The main content area is titled 'New process' and contains the following fields and options:

- Name:** A text input field containing 'Rota Tradicional (Formaldeído)'. Below it are two checkboxes: 'Create a waste treatment process' (unchecked) and 'Create a new flow for the process (as quantitative reference)' (checked).
- Name of the new flow:** A text input field containing 'Rota Tradicional (Formaldeído) - Produção de AG'.
- Reference flow property:** A dropdown menu with 'Mass' selected.

At the bottom right, there are two buttons: 'Finish' and 'Cancel'.

**Fonte:** elaborado pela autora através do *software OpenLCA* (2024).

Figura 8. Aba de criação de novo sistema de produto no *software OpenLCA*.

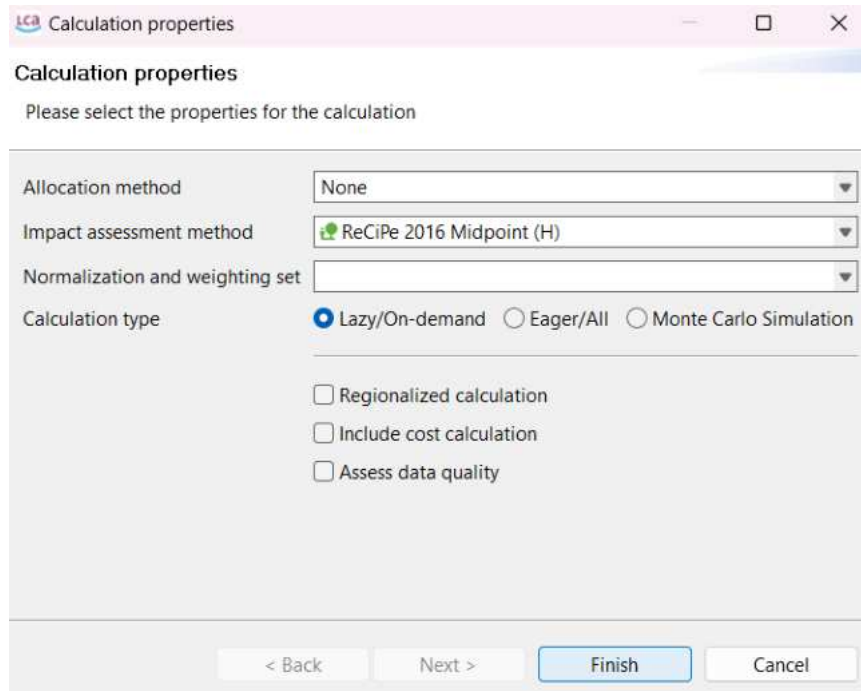
The screenshot shows the 'New product system' dialog box in the OpenLCA software. The window title is 'lca'. The dialog has a title bar with standard window controls and a blue icon of a tree structure. The main content area is titled 'New product system' and contains the following fields and options:

- Name:** A text input field containing 'Rota Tradicional (Formaldeído)'.
- Reference process:** A list box containing several process names, with 'Rota Tradicional (Formaldeído)' selected. The list includes: 'FA - GA Zhou', 'GA Rota Dupont', 'GA Rota Dupont', 'GA Rota EG', 'GA Rota EG 1kg', 'GA Rota Nitrilase', 'Rota Tradicional (Formaldeído)', 'Zhou', and 'Zhou 1kg'.
- Auto-link processes:** A checked checkbox.
- Check multi-provider links (experimental):** An unchecked checkbox.
- Provider linking:** Three radio button options: 'Ignore default providers' (unchecked), 'Prefer default providers' (checked), and 'Only link default providers' (unchecked).
- Preferred process type:** Two radio button options: 'Unit process' (checked) and 'System process' (unchecked).
- Cut-off:** An unchecked checkbox followed by a text input field.

At the bottom right, there are two buttons: 'Finish' and 'Cancel'.

**Fonte:** elaborado pela autora através do *software OpenLCA* (2024).

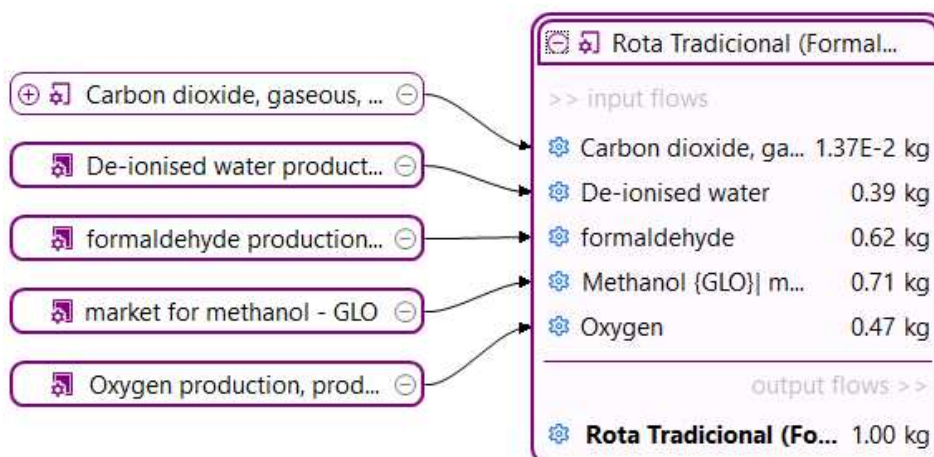
Figura 9. Aba de propriedades de cálculo no *software OpenLCA*.



Fonte: elaborado pela autora através do *software OpenLCA* (2024).

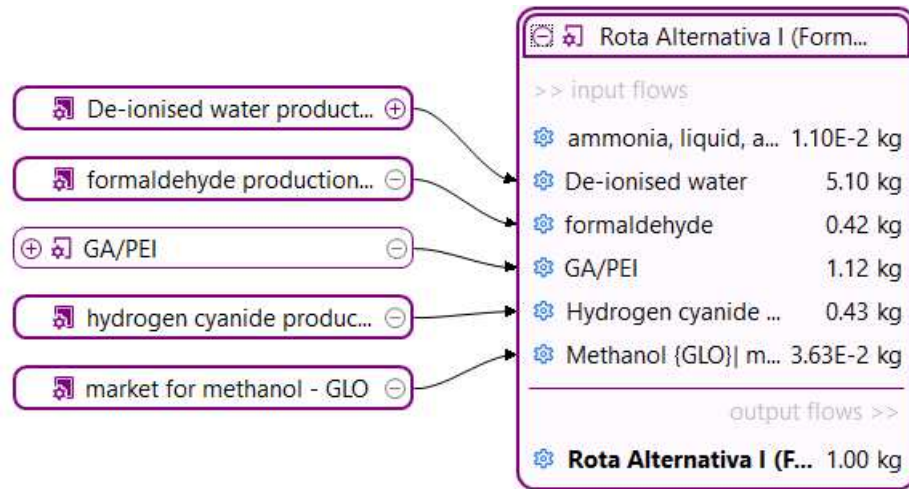
As figuras 10, 11 e 12 (Págs. 31-32) representam os modelos gráficos gerados pelo *software* para os sistemas de produto de cada rota de produção do ácido glicólico avaliados, com os dados de entrada e os processos elementares envolvidos nesses sistemas.

Figura 10. Modelo gráfico da Rota Tradicional.



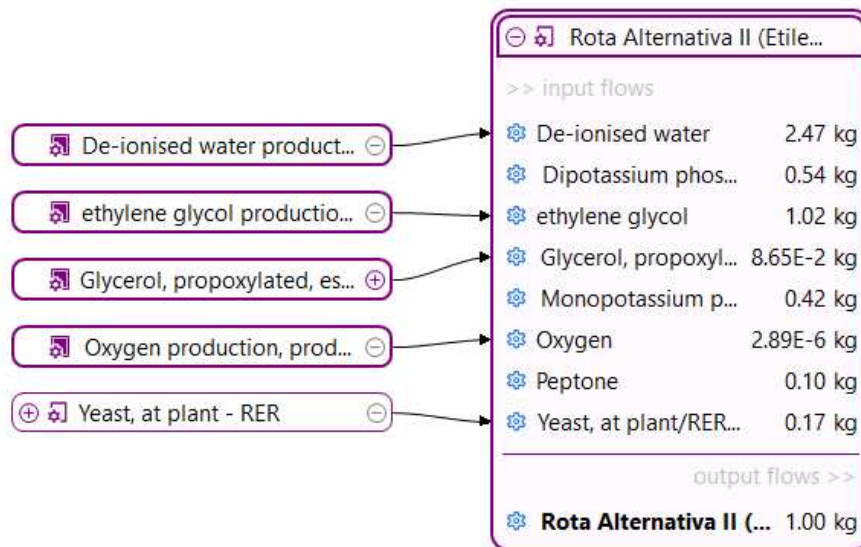
Fonte: elaborado pela autora através do *software OpenLCA* (2024).

Figura 11. Modelo gráfico da Rota Alternativa I.



Fonte: elaborado pela autora através do *software OpenLCA* (2024).

Figura 12. Modelo gráfico da Rota Alternativa II.



Fonte: elaborado pela autora através do *software OpenLCA* (2024).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O *software openLCA* pode realizar os cálculos para cada processo de forma individual e de forma comparativa entre dois ou mais processos. Os valores absolutos obtidos foram descritos através de tabelas (**Tabelas 4, 5 e 6; Pág. 33, 35 e 37**) e a comparação entre os processos foram dados através de gráficos de barras (**Gráficos 1, 2 e 3; Pág. 34, 36 e 38**), com porcentagem relativa à rota de maior valor para fins comparativos. Para fins de simplificação, as rotas foram abreviadas com as seguintes siglas: RT, Rota Tradicional (Formaldeído); RA-I, Rota Alternativa I (síntese a partir do Formaldeído); RA-II, Rota Alternativa II (síntese a partir do Etilenoglicol).

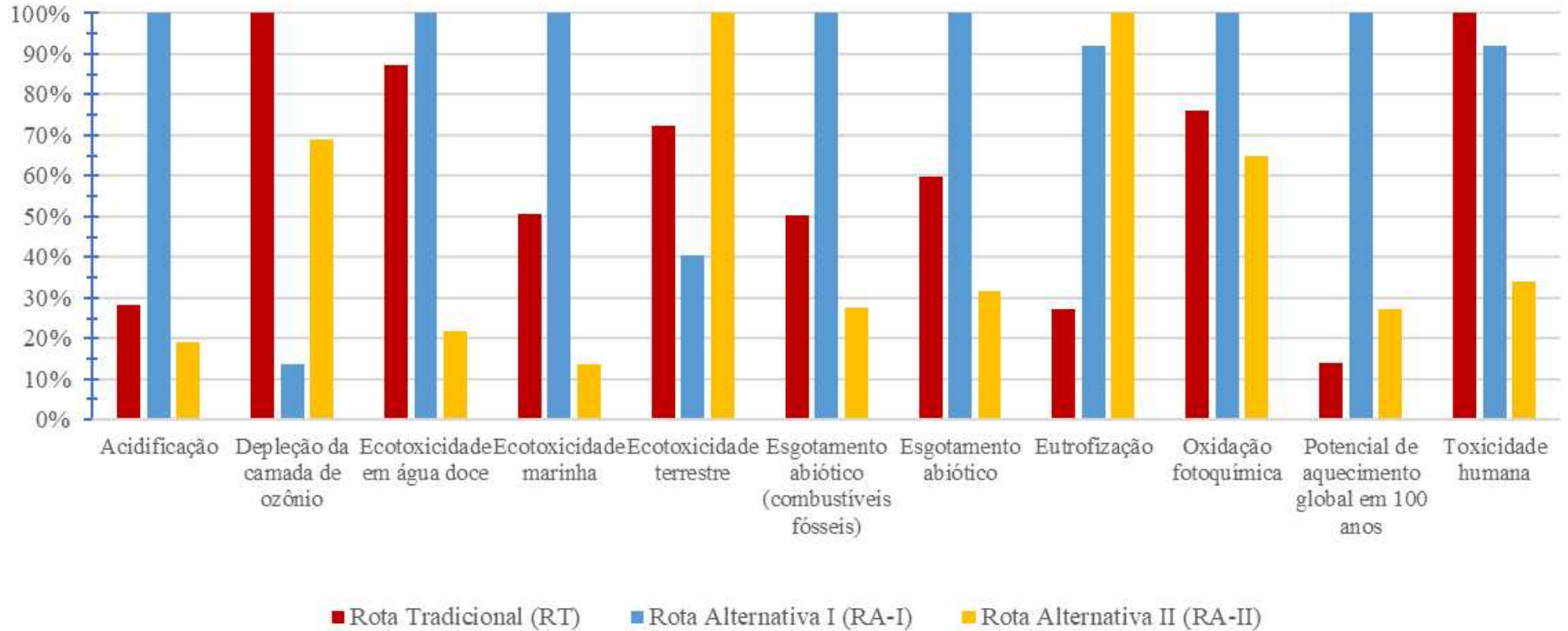
Para além disso, foram avaliados também, os processos que tiveram maior contribuição de impacto nas principais categorias avaliadas em cada método. De cada rota, foram selecionadas as três categorias de impacto mais significativas (maiores “scores”), para exemplificação e essas informações estão descritas no Quadro 2 (**Pág. 37**).

Tabela 4 – Resultados para o método de cálculo CML-IA.

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>RT</b>	<b>RA-I</b>	<b>RA-II</b>
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	1,76E-03	6,27E-03	1,20E-03
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	1,41E-02	1,91E-03	9,73E-03
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DB eq	1,08E-01	1,24E-01	2,72E-02
Ecotoxicidade marinha		2,77E+02	5,48E+02	7,40E+01
Ecotoxicidade terrestre		3,40E-04	1,90E-04	4,70E-04
Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	2,22E+01	4,41E+01	1,21E+01
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	1,30E-01	2,17E-01	6,85E-02
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	4,50E-04	1,52E-03	1,65E-03
Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	4,10E-04	5,40E-04	3,50E-04
Potencial de aquecimento global em 100 anos	kg CO <sub>2</sub> eq	4,72E-01	3,39E+00	9,25E-01
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	1,73E-01	1,59E-01	5,88E-02

**Fonte:** elaborado pela autora a partir dos dados obtidos no *software OpenLCA* (2024).

Gráfico 1 – Comparação dos resultados entre as rotas para o método CML-IA.



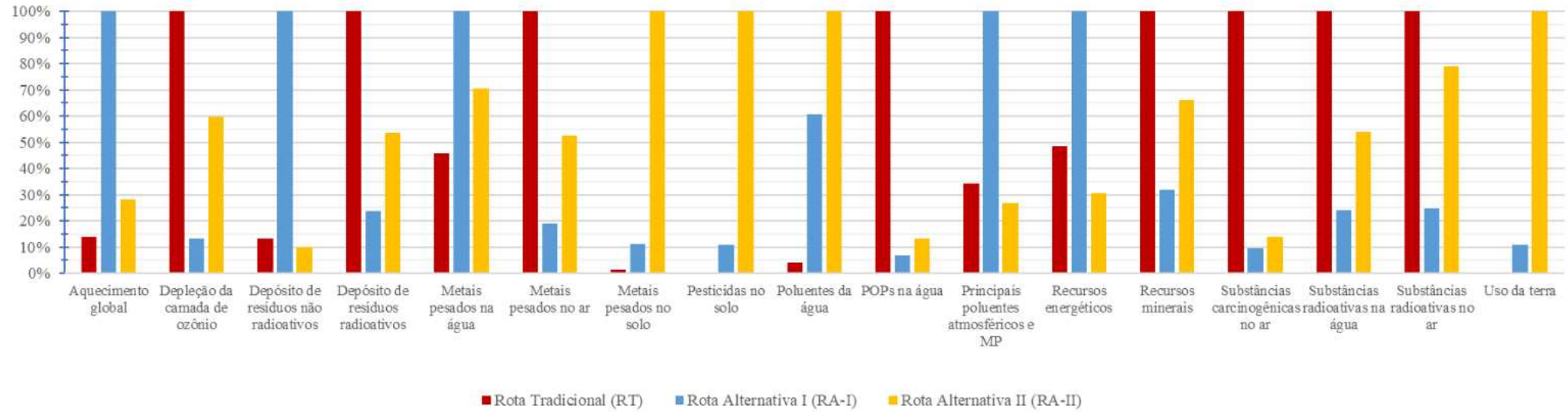
Fonte: elaborado pela autora a partir dos dados obtidos no *software OpenLCA* (2024).

Tabela 5 – Resultados para o método de cálculo ES.

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>RT</b>	<b>RA-I</b>	<b>RA-II</b>
Aquecimento global	UBP	2,14E+02	1,52E+03	4,29E+02
Depleção da camada de ozônio		8,29E-01	1,10E-01	4,96E-01
Depósito de resíduos não radioativos		1,39E+00	1,05E+01	1,02E+00
Depósito de resíduos radioativos		4,29E+00	1,02E+00	2,30E+00
Metais pesados na água		3,00E+01	6,55E+01	4,62E+01
Metais pesados no ar		1,18E+01	2,24E+00	6,20E+00
Metais pesados no solo		5,41E-01	4,44E+00	4,00E+01
Pesticidas no solo		4,41E-03	2,36E+01	2,16E+02
Poluentes da água		1,46E+01	2,20E+02	3,63E+02
Poluentes Orgânicos Persistentes na água		1,09E+01	7,58E-01	1,43E+00
Principais poluentes atmosféricos e material particulado		1,07E+02	3,11E+02	8,37E+01
Recursos energéticos		8,43E+01	1,74E+02	5,30E+01
Recursos hídricos		-4,14E+00	4,02E+00	4,06E-02
Recursos minerais		1,15E+01	3,68E+00	7,62E+00
Ruído/Barulho		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Substâncias carcinogênicas no ar		7,77E+01	7,29E+00	1,09E+01
Substâncias radioativas na água		4,76E-02	1,14E-02	2,57E-02
Substâncias radioativas no ar		1,17E-01	2,88E-02	9,26E-02
Uso da terra		5,62E-01	2,57E+01	2,34E+02

**Fonte:** elaborado pela autora a partir dos dados obtidos no *software OpenLCA* (2024).

Gráfico 2 – Comparação dos resultados entre as rotas para o método ES.



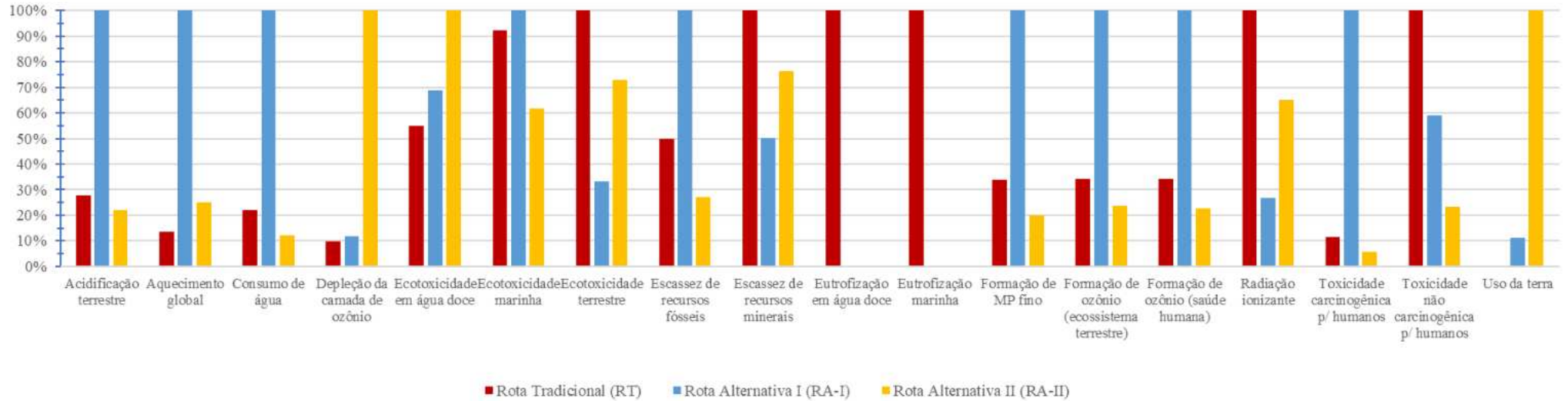
Fonte: elaborado pela autora a partir dos dados obtidos no *software OpenLCA* (2024).

Tabela 6 – Resultados para o método de cálculo RCMH.

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>RT</b>	<b>RA-I</b>	<b>RA-II</b>
Acidificação terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	1,41E-03	5,09E-03	1,12E-03
Aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	5,07E-01	3,75E+00	9,45E-01
Consumo de água	m <sup>3</sup>	3,02E-03	1,37E-02	1,66E-03
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	2,81E-02	3,30E-02	2,83E-01
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB	1,06E-02	1,33E-02	1,93E-02
Ecotoxicidade marinha		1,54E-02	1,67E-02	1,03E-02
Ecotoxicidade terrestre		5,37E-01	1,78E-01	3,91E-01
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	5,49E-01	1,10E+00	2,97E-01
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	1,53E-03	7,70E-04	1,17E-03
Eutrofização em água doce	kg P eq	8,89E+00	2,40E-04	1,20E-04
Eutrofização marinha	kg N eq	6,04E-01	1,80E-04	6,90E-04
Formação de material particulado fino	kg PM <sub>2.5</sub> eq	5,60E-04	1,66E-03	3,30E-04
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	kg NO <sub>x</sub> eq	1,31E-03	3,82E-03	9,00E-04
Formação de ozônio, saúde humana		1,24E-03	3,62E-03	8,20E-04
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	9,49E-03	2,54E-03	6,17E-03
Toxicidade carcinogênica para humanos	kg 1,4-DCB	8,87E-03	7,78E-02	4,41E-03
Toxicidade não carcinogênica para humanos		4,52E-01	2,67E-01	1,06E-01
Uso da terra	m <sup>2</sup> a crop eq	1,96E-03	7,54E-02	6,86E-01

**Fonte:** elaborado pela autora a partir dos dados obtidos no *software OpenLCA* (2024).

Gráfico 3 – Comparação dos resultados entre as rotas para o método RCMH.



Fonte: elaborado pela autora a partir dos dados obtidos no *software OpenLCA* (2024).

Quadro 2 – Contribuições dos processos para as categorias de impacto mais significativas em cada método.

<b>CML-IA</b>											
ROTA TRADICIONAL				ROTA ALTERNATIVA I				ROTA ALTERNATIVA II			
Ordem	Categoria de impacto	Processos	%	Ordem	Categoria de impacto	Processos	%	Ordem	Categoria de impacto	Processos	%
1	Ecotoxicidade marinha	Metanol	98,3	1	Ecotoxicidade marinha	Cianeto de Hidrogênio	94,9	1	Ecotoxicidade marinha	Levedura	99,7
		Dioxido de carbono	1,62			Metanol	2,53			Etilenoglicol	0,23
2	Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	Metanol	98,8	2	Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	Cianeto de Hidrogênio	94,4	2	Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	Levedura	100
		Dioxido de carbono	1,19			GA/PEI	3,07			Etilenoglicol	0
3	Potencial de aquecimento global em 100 anos	Metanol	98,8	3	Potencial de aquecimento global em 100 anos	Cianeto de Hidrogênio	96,2	3	Potencial de aquecimento global em 100 anos	Levedura	100
		Dioxido de carbono	1,2			GA/PEI	3,09			Etilenoglicol	0
<b>ES 2013</b>											
ROTA TRADICIONAL				ROTA ALTERNATIVA I				ROTA ALTERNATIVA II			
Ordem	Categoria de impacto	Processos	%	Ordem	Categoria de impacto	Processos	%	Ordem	Categoria de impacto	Processos	%
1	Aquecimento global	Metanol	98,7	1	Aquecimento global	Cianeto de Hidrogênio	96,1	1	Aquecimento global	Levedura	100
		Dioxido de carbono	1,28			GA/PEI	3,18			Etilenoglicol	0
2	Principais poluentes atmosféricos e material	Metanol	83,4	2	Principais poluentes atmosféricos e material	Cianeto de Hidrogênio	94,9	2	Poluentes da água	Levedura	100
		Dioxido de carbono	16,6			GA/PEI	3,69			Etilenoglicol	0
3	Recursos energéticos	Metanol	98,8	3	Poluentes da água	Cianeto de Hidrogênio	81,6	3	Uso da terra	Levedura	100
		Dioxido de carbono	1,23			GA/PEI	18			Etilenoglicol	0
<b>RCMH</b>											
ROTA TRADICIONAL				ROTA ALTERNATIVA I				ROTA ALTERNATIVA II			
Ordem	Categoria de impacto	Processos	%	Ordem	Categoria de impacto	Processos	%	Ordem	Categoria de impacto	Processos	%
1	Escassez de recursos fósseis	Metanol	98,8	1	Aquecimento global	Cianeto de Hidrogênio	96,5	1	Aquecimento global	Levedura	100
		Dioxido de carbono	1,15			GA/PEI	2,85			Etilenoglicol	0,0
2	Ecotoxicidade terrestre	Metanol	95,5	2	Escassez de recursos fósseis	Cianeto de Hidrogênio	94,4	2	Uso da terra	Levedura	100,0
		Dioxido de carbono	4,5			GA/PEI	3,06			Etilenoglicol	0,0
3	Aquecimento global	Metanol	98,9	3	Toxicidade humana não cancerígena	Cianeto de Hidrogênio	84,8	3	Ecotoxicidade terrestre	Levedura	100,0
		Dioxido de carbono	1,15			Metanol	8,55			Etilenoglicol	0,0

Fonte: elaborado pela autora (2024).

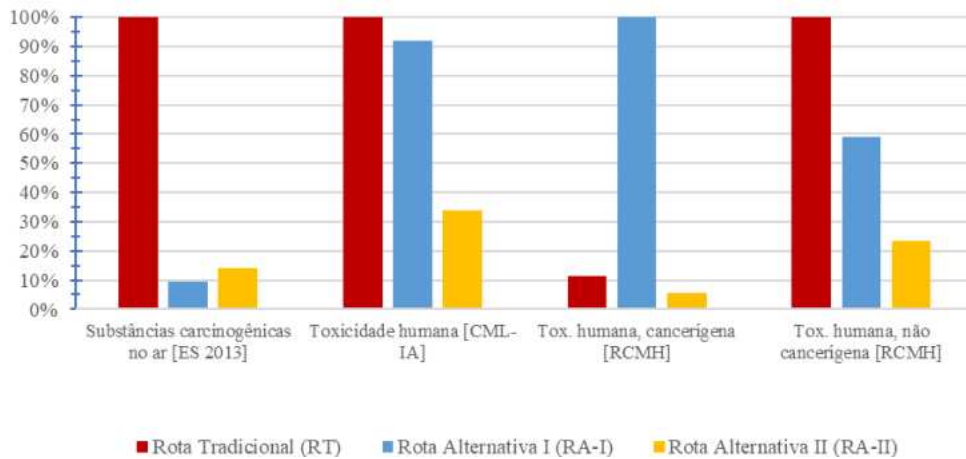
É possível obter algumas conclusões mais gerais a partir dos gráficos obtidos nesta ACV simplificada. Nos cálculos de impacto obtidos para o método CML-IA, das 11 categorias de impacto calculadas, a rota alternativa I apresentou maior contribuição em 7, contra 2 da rota tradicional e 2 da rota alternativa II. Desconsiderando a rota alternativa I, a rota tradicional apresentou maior contribuição que a alternativa II em 8 categorias. Na “*Ecological Scarcity 2013*”, das 17 categorias de impacto evidenciadas no gráfico, a rota tradicional apresentou maior contribuição em 8, a rota alternativa I em 5 e a alternativa II em 4. Na tabela 5 (Pág.35) é possível observar que a categoria de impacto “Ruído” se encontra zerada. Isso pode ocorrer devido à ausência de dados o suficiente para o cálculo desse impacto, e como essa não é uma categoria de interesse no que diz respeito a uma análise de ciclo de vida voltada para a avaliação de rotas sintéticas, ela foi desconsiderada da avaliação. Já a calculadora ReCipe *Midpoint H*, a rota alternativa I consta como a de maior impacto calculado em 9 das 18 categorias avaliadas. A rota tradicional tem maior contribuição em 6 categorias, e a alternativa II em 3.

A partir desse panorama conclui-se que a rota alternativa II é a rota de menor impacto ambiental entre os três métodos de cálculo, ao passo que a rota alternativa I é a opção menos sustentável em duas avaliações (CML-IA e ReCipe), e a rota tradicional em apenas em uma (*Ecological Scarcity*).

As categorias de impacto avaliadas acima podem definir e caracterizar as mais diversas alterações ambientais, que levam a diferentes consequências tanto em fatores bióticos e abióticos quanto energéticas de um ecossistema. A partir desta consideração, para uma avaliação mais direcionada, as categorias de impacto foram agrupadas em três grupos principais, definidos como “Categorias de Impacto a Integridade Humana”, “Categorias de Impacto Energético” e “Categorias de Impacto Ambiental” e para cada um desses grupos, as contribuições individuais, em porcentagem, das rotas sintéticas de cada categoria de impacto foram descritas através de gráficos de barras (**Gráficos 4-14; Pág. 41-48**).

No grupo de “Impacto à Integridade Humana”, foram incluídas três categorias de toxicidade humana e formação de substâncias carcinogênicas no ar, incluídas nos três métodos de cálculo e exemplificadas no gráfico 4 (Pág. 41). Foi possível observar que a Rota Tradicional apresentou as maiores contribuições de impacto em três das quatro categorias descritas. Já a Rota Alternativa II apresentou os menores valores de impacto à integridade humana.

Gráfico 4 – Categorias de Impacto à Integridade Humana.

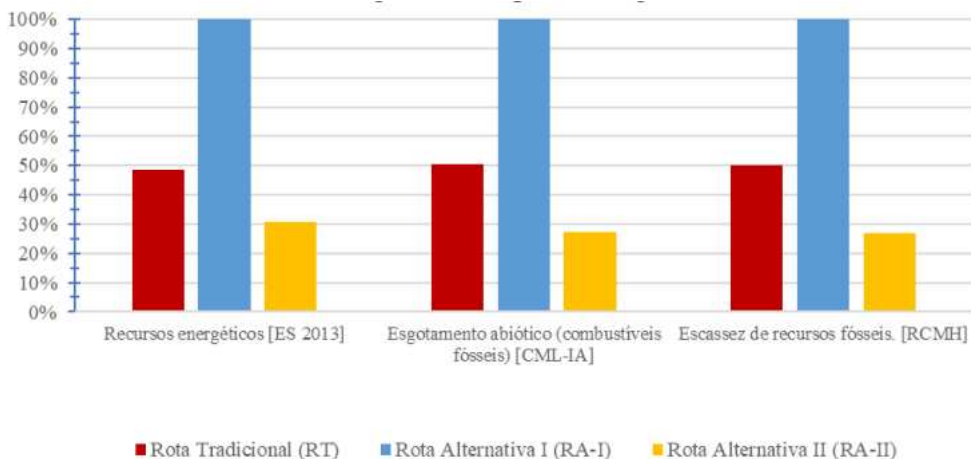


Fonte: elaborado pela autora (2024).

As categorias de toxicidade são quantificadas em quilogramas equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (com exceção da calculadora ES que dá os valores de todas as categorias em ecopontos) e elas são um indicativo da emissão de substâncias químicas no meio ambiente que pode gerar consequências (cancerígenas ou não cancerígenas) à saúde de pessoas expostas a esse impacto. Para as categorias selecionadas, a produção industrial de metanol, presente no processo de produção do ácido glicólico pela Rota Tradicional se sobressaiu, exceto na categoria de Toxicidade Humana Cancerígena calculada pelo método RCMHA, onde o processo de maior impacto é o de produção do cianeto de hidrogênio, usado como reagente na Rota Alternativa I.

As categorias de impacto relacionadas à “Impactos Energéticos” em cada uma das calculadoras usadas estão descritas no gráfico 5 abaixo.

Gráfico 5 – Categorias de Impacto Energético.



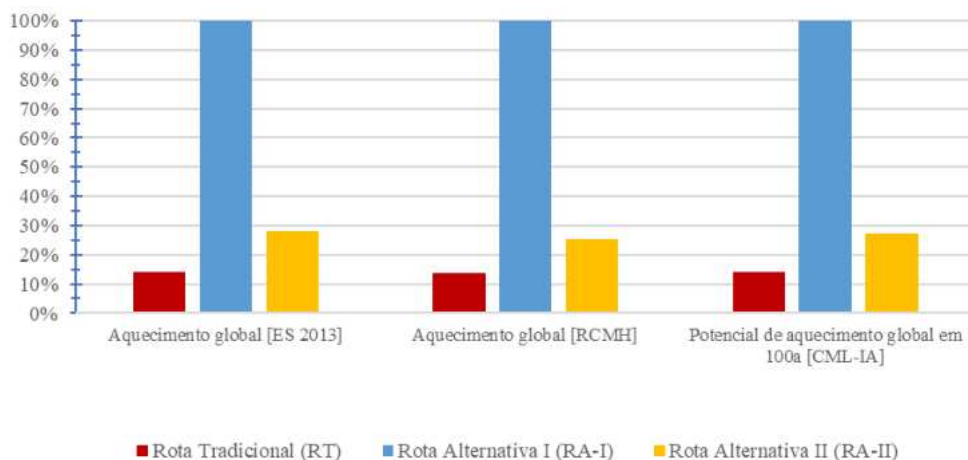
Fonte: elaborado pela autora (2024).

O “esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)” calculado pelo método CML-IA é quantificado pela unidade de energia megajoule e se refere ao esgotamento de energias não renováveis provenientes de combustíveis fósseis, tais como petróleo, carvão e gás natural, que são classificados como fontes energéticas abióticas. A “escassez de recursos fósseis” também descreve o mesmo parâmetro, porém, a sua quantificação energética se dá através da unidade de referência “quilograma equivalente de petróleo” e é calculado pelo método RCMH. Já a categoria “recursos energéticos” da calculadora ES, quantificada através de ecopontos (UBP), descreve tanto fontes renováveis (energia solar e eólica, por exemplo) quanto as não renováveis. Passa esse tipo de impacto, em todas as três calculadoras a Rota Alternativa I foi a de maior contribuição, enquanto a Rota Alternativa II foi a de menor impacto e, portanto, a mais sustentável energeticamente falando. Nessas categorias, os processos de maior impacto foram da produção de cianeto de hidrogênio.

Com relação as categorias de “Impacto Ambiental”, subdivisões foram realizadas para facilitar as comparações. Os subgrupos definidos foram “Aquecimento Global”, “Depleção da Camada de Ozônio”, “Acidificação”, “Ecotoxicidade”, “Recursos Minerais”, “Material Particulado”, “Recursos Hídricos”, “Uso da Terra” e “Eutrofização”.

Através dos gráficos foi possível observar que as categorias de aquecimento global (**Gráfico 6**), apresentaram a mesma proporção de contribuição para cada rota, sendo a Rota Alternativa I a de maior impacto. Vale ressaltar que as categorias de aquecimento global são medidas em quilograma equivalentes de dióxido de carbono e quantificam a quantidade de calor retido na atmosfera por efeito do dióxido de carbono ou outro gás do efeito estufa.

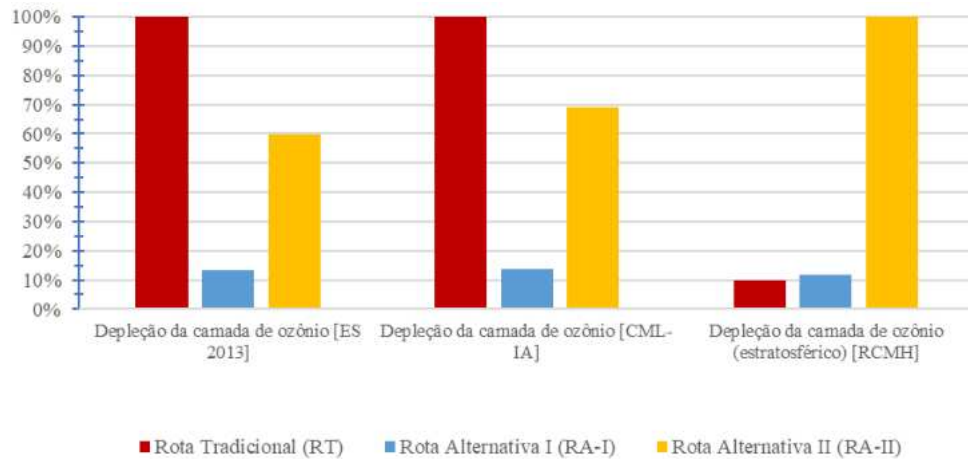
Gráfico 6 – Categorias de Impacto Ambiental (Aquecimento Global).



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Já no caso da depleção da camada de ozônio (**Gráfico 7**), o método RCMH apresentou uma maior contribuição do impacto da Rota Alternativa II, em comparação com os outros dois métodos onde a Rota Tradicional apresentou o maior impacto.

Gráfico 7 – Categorias de Impacto Ambiental (Depleção da Camada de Ozônio).

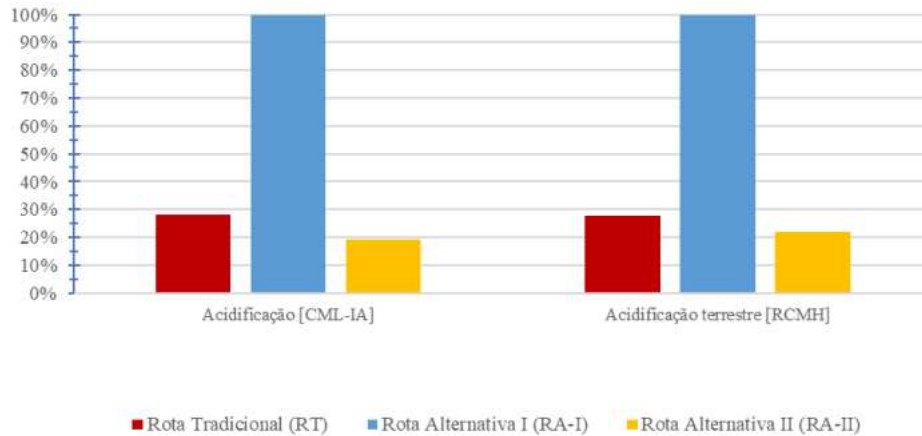


Fonte: elaborado pela autora (2024).

A depleção (redução ou destruição) da camada de ozônio indica o seu potencial de destruição na estratosfera, causada principalmente pela emissão de CFC's (clorofluorcarbonos) ou outras substâncias halogenadas. Esse potencial é medido em quilogramas equivalentes de CFC-11. As proporções dos impactos de cada rota foram similares para as calculadoras ES e CML-IA, onde a Rota Tradicional foi mais impactante (associada ao processo de produção de metanol), seguida da Rota Alternativa II (associada ao processo de produção de soja), mas no caso da calculadora RCMH, a Rota Alternativa II teve um impacto muito mais significativo que as outras duas rotas sintéticas.

A acidificação pode ser observada através da diminuição dos valores de pH da chuva e/ou de névoa, causados pela liberação de prótons de certas substâncias no meio ambiente. O potencial de acidificação é calculado por quilograma equivalente de dióxido de enxofre, principal substância na formação de chuva ácida. Como pode ser observado no gráfico 8 (**Pág. 44**), novamente temos um maior impacto da Rota Alternativa I.

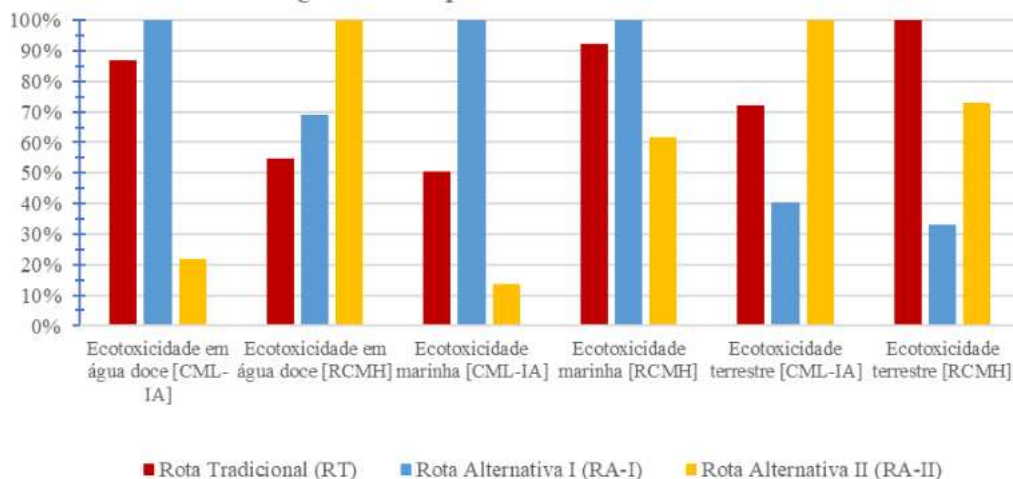
Gráfico 8 – Categorias de Impacto Ambiental (Acidificação).



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Por sua vez, a ecotoxicidade provém da presença de substâncias tóxicas em diferentes ecossistemas. Expressa em quilograma equivalente de 1,4-diclorobenzeno, substância presente especialmente em agrotóxicos. Apesar de serem classificadas em categorias de impacto a ecossistemas, elas também geram impacto à integridade humana. Os resultados desse subgrupo, presentes apenas nas calculadoras CML-IA e RCMH, variaram entre as rotas. Para ecossistemas aquáticos, a Rota Alternativa I (produção de cianeto de hidrogênio) é a que causa maior impacto em sistemas marinhos. Nas duas categorias de impacto a ecossistemas terrestres, enquanto a Rota Tradicional (produção de metanol) se mostrou como a de maior impacto para a calculadora RCMH, para a CML-IA a Rota Alternativa II (produção de soja) teve um impacto mais significativo.

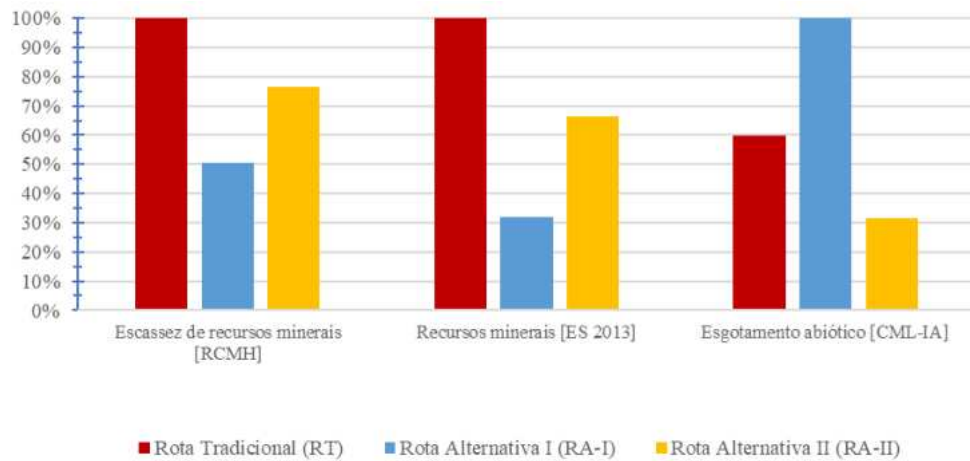
Gráfico 9 – Categorias de Impacto Ambiental (Ecotoxicidade).



Fonte: elaborado pela autora (2024).

A escassez/disponibilidade de recursos minerais (abióticos, tais como alumínio, cobre, cádmio, entre outros) é expressa em quilogramas equivalente de antimônio (CML-IA) e/ou cobre (RCMH) e apresentou um potencial de impacto maior para a Rota Tradicional em duas das 3 categorias do grupo, seguida da Rota Alternativa II, com o processo de produção de etilenoglicol o de maior contribuição.

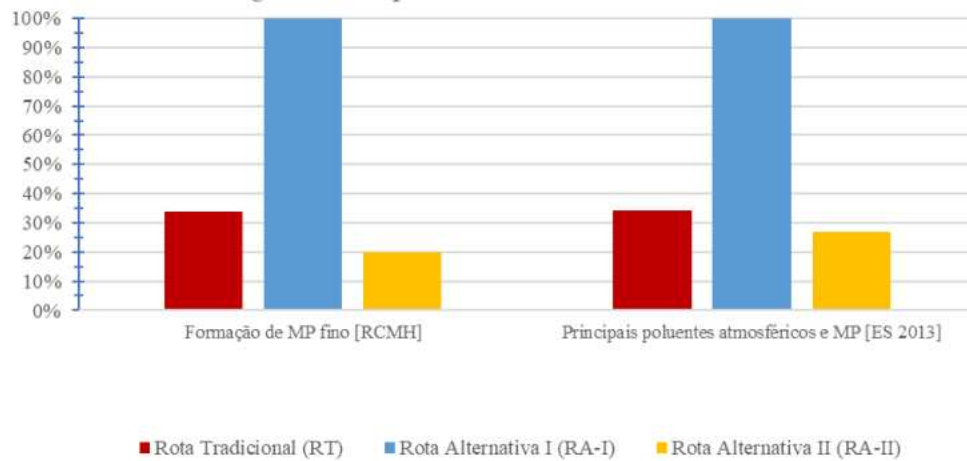
Gráfico 10 – Categorias de Impacto Ambiental (Recursos Minerais).



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Já no que diz respeito a formação de material particulado (**Gráfico 11; Pág. 46**), tanto a calculadora RCMH quanto a ES, apresentaram resultados similares de contribuição das rotas, com a Rota Alternativa I sendo a de maior impacto e a Rota Alternativa II a de menor impacto. Essa categoria avalia a formação de aerossóis causados pela poluição do ar e são quantificadas em quilogramas equivalentes de material particulado com diâmetro igual ou menor a  $2.5\mu\text{m}$  na calculadora RCMH. Esse subgrupo, apesar de ter sido incluído no grupo de Impacto Ambiental por representar poluições atmosféricas, têm impacto direto na Integridade Humana, com conseqüente desenvolvimento de problemas respiratórios.

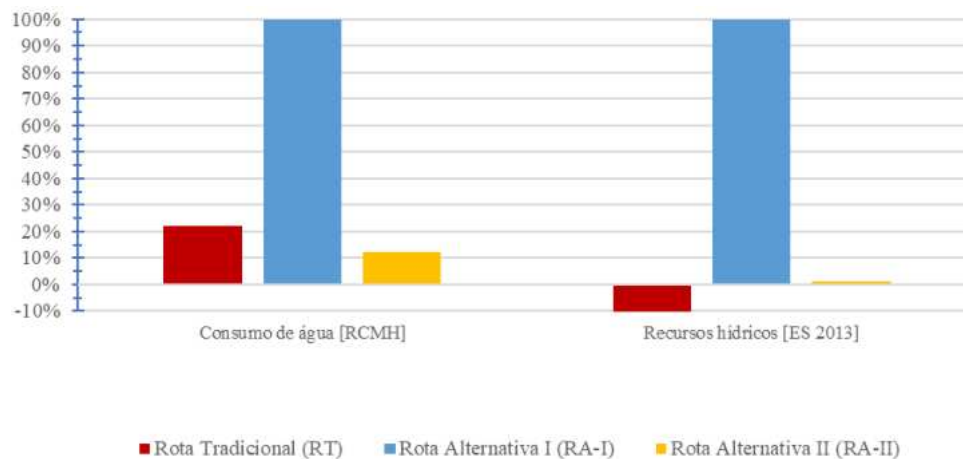
Gráfico 11 – Categorias de Impacto Ambiental (Material Particulado).



Fonte: elaborado pela autora (2024).

O consumo de água/recursos hídricos (Gráfico 12) indica o uso ou a disponibilidade dos recursos aquáticos disponíveis (águas superficiais, subterrâneas, entre outras). É medido em volume ( $m^3$ ) para a calculadora RCMH. Não há uma categoria de impacto relacionada ao consumo de água para o método CML-IA. Novamente, nesta categoria, temos a Rota Alternativa I como a rota de maior impacto aos recursos hídricos. Observa-se também um valor negativo para a Rota Tradicional no método ES.

Gráfico 12 – Categorias de Impacto Ambiental (Recursos Hídricos).

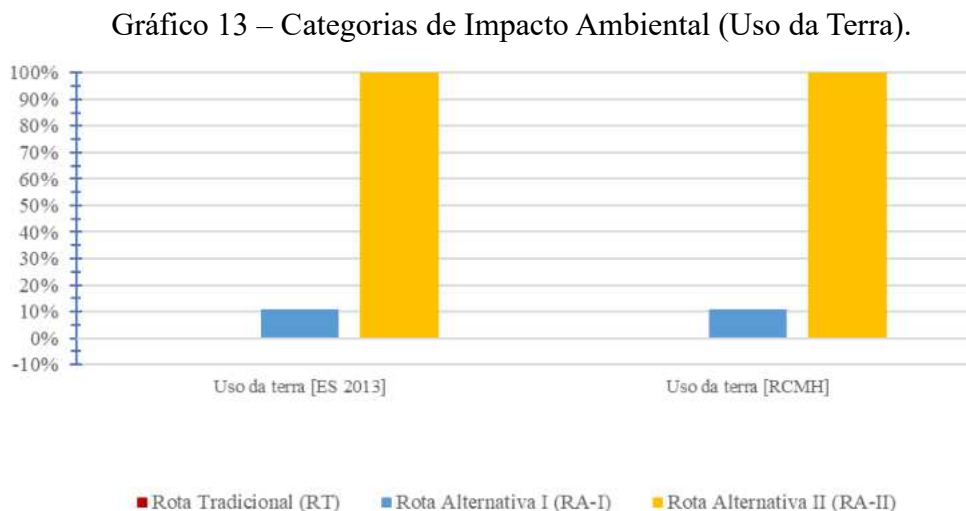


Fonte: elaborado pela autora (2024).

Valores negativos podem, dentre algumas razões, indicar um processo em que há reuso e/ou tratamento eficiente dos recursos hídricos utilizados, bem como abundância desses recursos, gerando assim impactos “positivos” ao meio ambiente. Mais frequentemente, pode

indicar a desconsiderações de fluxos elementares ou outros erros de dados de entrada ou saída. É possível que, por conta da necessidade de se estimar alguns valores de entrada e saída do consumo/descarte de água (usada como meio reacional de síntese) para balanceamento de fluxos, isso acarretou uma estimativa errada deste impacto para a produção de metanol (que foi o processo indicado que resultou nos valores negativos).

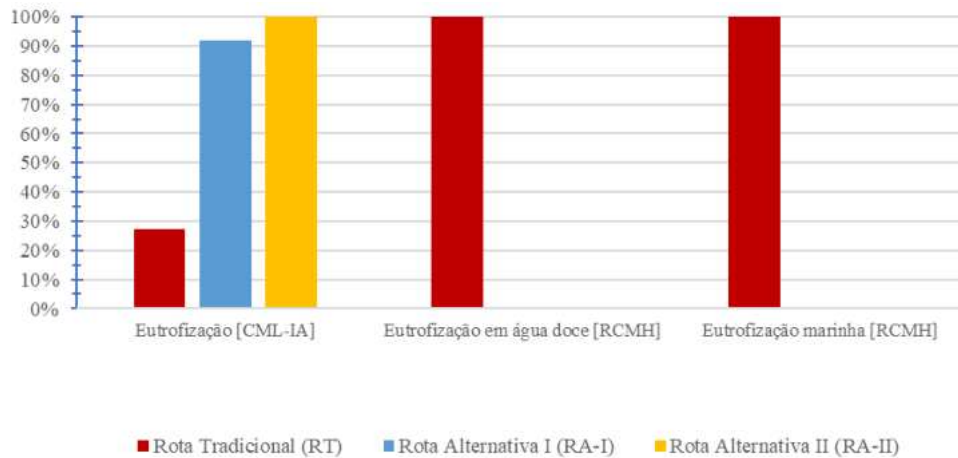
“Uso da terra” (**Gráfico 13**), como já diz o nome da categoria, representa o quanto de terra é usado para determinado processo. Esse “uso” pode ser representado através da área de ocupação de terra necessária a cultivo por um determinado período no tempo ou que será transformada. Tanto a Rota Alternativa II, de maior impacto quanto a Rota Alternativa I tiveram como processo de maior impacto a produção de soja, como demonstrado no gráfico 13. Os valores obtidos para a rota tradicional foram muito pouco expressivos e por isso aparecem na escala da imagem do gráfico.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

O fenômeno de eutrofização (**Gráfico 14; Pág. 48**) ocorre devido ao acúmulo de nutrientes na água, em especial de fósforo e nitrogênio, o que leva a uma maior produção de algas e cianobactérias, alterando o equilíbrio do ecossistema, podendo levar a morte de espécies. São medidas em quilogramas equivalentes de fósforo, nitrogênio e/ou fosfato e é um fenômeno que pode ser observado tanto em ambientes aquáticos como terrestres. Na calculadora CML-IA, a eutrofização foi observada como um fenômeno mais intenso nas Rotas Alternativas (produção de soja para a RA-II), mas em RCMH, a eutrofização de ambientes aquáticos foi significativa apenas para a Rota Tradicional (produção de metanol).

Gráfico 14 – Categorias de Impacto Ambiental (Eutrofização).



Fonte: elaborado pela autora (2024).

De forma geral, é possível observar que, para a Rota Alternativa I, o processo de produção do cianeto de hidrogênio, fez com que ela se tornasse a opção menos sustentável para a maioria das categorias de impacto avaliadas. Sendo um dos reagentes principais da reação de síntese do ácido glicólico, o cianeto de hidrogênio é utilizado em proporções significativas que impactam diretamente nos cálculos de ciclo de vida. A sua produção se dá a partir do processo de reação de amônia e gás metano, fazendo uso de catalisadores metálicos (geralmente platina e/ou rubídio) e a temperatura elevada, geralmente acima de 1100-1600°C, a depender do processo escolhido (DZOMBAK et al, 2005). Todos esses fatores de alta demanda energética, derivados ainda do uso de fontes não renováveis podem influenciar diretamente em categorias de impacto energético, aquecimento global e processos de acidificação, como mostrado nos resultados.

Para além da sua produção, cianetos são substâncias reativas e de alta toxicidade à saúde humana e ao ecossistema como um todo em sua forma livre ( $\text{HCN}$  e  $\text{CN}^-$ ) e seu processo de produção e emissões/geração de resíduos podem também contribuir para resultados de impacto significativos em categorias relacionadas a toxicidade (DZOMBAK et al, 2005).

No caso da Rota Tradicional, o processo de metanol foi o responsável pela maior contribuição nas suas categorias de impacto. Tanto o metanol quanto formaldeído são produzidos através da oxidação parcial de metano em condições controladas. Produzidas a partir de fontes não renováveis e condições não brandas, também acabam justificando o alto valor de impacto que atribuem às categorias. Porém, pelo metanol se tratar de um reagente indireto da reação de produção do ácido glicólico, seu impacto quantitativo é menor e, por isso, não se sobressaiu frente ao impacto da produção de cianeto de hidrogênio em várias das

categorias de impacto analisadas. Vale observar também que tanto a Rota Tradicional quanto a Rota Alternativa I tem como reagente principal o formaldeído e metanol como reagente secundário na reação.

A rota que apresentou os menores valores de nas categorias de impacto em quase todos os grupos avaliados foi a Rota Alternativa II. Tendo condições de sínteses mais brandas e com a proposta de uso de reagentes e processos alternativos, muitos a partir de fontes renováveis de energia, era esperado que esta rota apresentasse menores valores de impacto nas categorias avaliadas. As exceções foram as categorias de “Uso da Terra”, “Ecotoxicidade terrestre” e “Eutrofização” (esta última tanto para ecossistemas terrestres quanto aquáticos), no qual o processo de maior impacto associado foi o de produção de levedura, a partir da fermentação de soja. Diretamente associado ao desmatamento de terras, a produção de soja e seu consequente uso para a produção de levedura podem impactar diretamente nas categorias associadas ao uso de terra, como foi possível observar nos resultados obtidos pela ACV.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho se observou que a rota alternativa de produção do ácido glicólico a partir da bioconversão de etilenoglicol por bactérias acéticas (descrita como a Rota Alternativa II) é a rota que gerou o menor impacto nos três métodos de cálculo utilizados e, por tanto, definida como a mais sustentável.

A partir da literatura era esperado que as rotas alternativas apresentassem ambos resultados menores nas categorias de impacto avaliadas, uma vez que elas se apresentam como alternativas mais sustentáveis à rota tradicional, que se baseia em um processo antigo e de alta necessidade energética, mas o que se observou na verdade foram respostas de impacto maiores para a Rota Alternativa I em comparação com a Rota Tradicional em diversos parâmetros, incluindo as categorias do grupo de Impacto Energético e Aquecimento Global (Impacto Ambiental). Isso se deu em função do grande impacto que a produção de cianeto de hidrogênio contribuiu para as categorias em questão. Alguns fluxos energéticos que não foram considerados nos dados de entrada da Rota Tradicional, por conta da impossibilidade de serem estimados de forma correta, também podem ter contribuído para a subestimação desses valores.

Também se observou boa reprodutibilidade dos resultados nas mesmas categorias de impacto presentes em diferentes métodos de cálculo. Vale ressaltar que as comparações tiveram como base rotas sintéticas cujos fluxos de entrada e saída foram definidos a partir de dados na literatura e os limites do estudo foram os mais abrangentes possíveis para que não faltassem dados, mas ainda assim, foi possível observar que as bases de dados utilizadas em questão apresentavam poucas opções de dados de entrada (*input*) para alguns dos processos utilizados. Essas limitações podem explicar a diferença de resultados obtidas para categorias similares de diferentes métodos.

Por fim, é possível concluir que a metodologia ACV é uma ferramenta bastante interessante na ampliação da base científica de conhecimento sobre os mais diversos sistemas de produção, bem como no apontamento de processos sustentáveis e/ou mais eficientes, pois ainda que de forma simplificada, fornece resultados e/ou indicadores importantes na avaliação dos meios de produção, incluindo rotas sintéticas da indústria química.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ACERO, A. et al. **LCIA methods – Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories**. Greendelta, Berlin, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CICLO DE VIDA (ABCV) (org.). Disponível em: <http://www.abcvbrasil.org.br/>. Acesso em: 11 nov. 2023.

ASSUNÇÃO, G. M. DE. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 2, p. 223–231, 30 jun. 2019.

BISSETT, D. L. Common cosmeceuticals. **Clinics in Dermatology**, v. 27, n. 5, p. 435–445, set. 2009.

BJØRN, Anders et al. LCA History. In: MICHAEL Z. HAUSCHILD et al. (ed.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Switzerland: Springer, 2018. Cap. 3.

DZOMBAK, D. A.; GHOSH, R. S.; WONG-CHONG, G. M. **Cyanide in Water and Soil**. [s.l.] CRC Press, 2005.

FANTKE, Peter; ERNSTOFF, Alexi. LCA of Chemicals and Chemical Products. In: MICHAEL Z. HAUSCHILD et al. (ed.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Switzerland: Springer, 2018. Cap. 31.

FIESP. **Economia Circular**. Disponível em: <https://economiecircular.fiesp.com.br/pt/index.html>. Acesso em: 24 jan. 2024.

FRISCHKNECHT, R.; BÜSSER KNÖPFEL, S. **Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method**: Methodological fundamentals and their application in Switzerland. Environmental studies n° 1330. Federal Office for the Environment, Bern, 2013.

HAUSCHILD, Michael Z. Introduction to LCA Methodology. In: MICHAEL Z. HAUSCHILD et al. (ed.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Switzerland: Springer, 2018. Cap. 6.

HUA, X.; ZHOU, X.; XU, Y. Improving techno-economics of bioproduct glycolic acid by successive recycled-cell catalysis of ethylene glycol with *Gluconobacter oxydans*. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 41, n. 10, p. 1555–1559, 15 jun. 2018.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe 2016 v1.1 – A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **National Institute for Public Health and the Environment**. Netherlands, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **O que é Avaliação do Ciclo de Vida**. Disponível em: <https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>. Acesso em: 21 set. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Histórico da ACV**. Disponível em: <https://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>. Acesso em: 11 nov. 2023.

JEM, K. J.; TAN, B. The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid). **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 3, n. 2, jan. 2020.

KENT, J. A. et al. **Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology**. Cham: Springer International Publishing, 2017.

LODER, D. J. **Process for manufacture of glycolic acid**. 4 abr. 1939. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US2152852A/en>>.

MARIANA WEBER (Brasil). Forbes (ed.). **Brasil é o quarto maior mercado de beleza e cuidados pessoais do mundo**. 2020. Disponível em: <https://forbes.com.br/principal/2020/07/brasil-e-o-quarto-maior-mercado-de-beleza-e-cuidados-pessoais-do-mundo/>. Acesso em: 20 set. 2023.

MARKETS AND MARKETS (org.). **Glycolic Acid Market**. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/glycolic-polyglycolic-acid-market-1090.html>. Acesso em: 20 set. 2023.

MARTINS, A. M.; MARTO, J. M. A sustainable life cycle for cosmetics: From design and development to post-use phase. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 35, p. 101178, 1 out. 2023.

MILTENBERGER, K. Hydroxycarboxylic Acids, Aliphatic. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 15 jun. 2000.

MORAES, Anelize de Oliveira. **Bioconversão de Etilenoglicol a Ácido Glicólico por Bactérias Acéticas**. 2018. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

OPENLCA (org.). **OpenLCA Nexus**: Your source for LCA and sustainability data. Disponível em: <https://nexus.openlca.org/databases>. Acesso em: 2 dez. 2023.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. **ISO/DIS 59010**: Circular Economy — Guidance on the transition of business models and value networks. 2023. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:59010:dis:ed-1:v1:en>. Acesso em: 23 set. 2023.

PANOVA, A. A. et al. Chemoenzymatic Synthesis of Glycolic Acid. **Advanced Synthesis & Catalysis**, v. 349, n. 8-9, p. 1462–1474, 4 jun. 2007.

PUBCHEM. **Hazardous Substances Data Bank (HSDB):5227**. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/source/hsdb/5227#section=Chemical-Physical-Properties>. Acesso em: 24 jan. 2024

REDE EMPRESARIAL BRASILEIRA DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (REDE ACV) (Brasil) (org.). **O QUE É ACV**. Disponível em: <https://www.redeacv.org.br/pt-br/o-que-e-acv/>. Acesso em: 11 set. 2023.

SOUSA-AGUIAR, E. F. et al. Química verde: A evolução de um conceito. **Química Nova**, 2014.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) (org.). **Life Cycle Initiative: Our Mission, Vision and Approach**. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/about/our-mission-vision-and-approach/>. Acesso em: 11 nov. 2023

WEI, G. et al. High cell density fermentation of *Gluconobacter oxydans* DSM 2003 for glycolic acid production. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 36, n. 8, p. 1029–1034, 12 maio 2009.

ZHOU, X. et al. Glycolic Acid Production from Ethylene Glycol via Sustainable Biomass Energy: Integrated Conceptual Process Design and Comparative Techno-economic–Society–Environment Analysis. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 32, p. 10948–10962, 30 jul. 2021.