UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DE COMPÓSITO DO TIPO NANOCARBONATO DE CÁLCIO/LIGNINA KRAFT A PARTIR DA CAPTURA DE CO_2

ANA PAULA RODRIGUES DE SOUZA

OURO PRETO – MG

2022

ANA PAULA RODRIGUES DE SOUZA

AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DE COMPÓSITO DO TIPO NANOCARBONATO DE CÁLCIO/LIGNINA KRAFT A PARTIR DA CAPTURA DE CO_2

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Tecnologias Ambientais.
Orientador: Professor Doutor Silvio Vaz Júnior.
Coorientador: Professor Doutor Bruno Eduardo Lobo Baeta

OURO PRETO – MG

2022

Dedicatória

Dedico esta dissertação à minha grande amiga Larissa Mota de Souza (in memoriam), exemplo de amor ao próximo, alegria e bondade. A ela, toda a minha admiração e gratidão por estar comigo em momentos importantes, por todo carinho e torcida direcionados a mim.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, por toda proteção divina, para que eu me mantivesse firme na realização desse trabalho.

Aos meus pais, Salvia e Jocimar, por todo apoio, dedicação e amor imprescindíveis para que eu chegasse e me mantivesse aqui.

Aos meus tios, Luiz Alberto e Solenise, por todo incentivo e dedicação para com a minha educação.

Ao meu irmão Ramon, minha cunhada Giovana e meus sobrinhos Joaquim Bernardo e João Vinícius, por toda torcida e carinho que tem por mim.

À minha família de modo geral, em nome da minha avó Valcira, por toda torcida e oração.

Aos meus amigos, pela torcida, preocupação e companhia, mesmo que distantes.

À Brena por ter sido meu apoio e minha companhia em Ouro Preto e por toda a torcida dedica a mim.

Ao meu orientador Silvio Vaz Júnior, por todo empenho e amparo dedicados desde meus primeiros dias como mestranda, até aqui.

Aos colegas e professores do ProAmb, que não mediram esforços para me ajudar naquilo que eram as minhas demandas.

À UFOP, por toda estrutura oferecida para realização desse mestrado.

À CAPES, pelo apoio financeiro essencial para a elaboração dessa dissertação.

Resumo

O gás carbônico (CO_2) ou dióxido de carbono, é um gás gerado tanto por fontes naturais quanto por fontes antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia e a agricultura. Na atualidade, ele é visto como um dos principais contribuintes para o aumento do efeito estufa, levando ao aquecimento global. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias de captura e uso deste gás é de grande importância para a mitigação dos gases do efeito estufa (GEE) e redução de seus efeitos ambientais negativos. Este estudo teve como objetivo apresentar a avaliação de ciclo de vida (ACV) da síntese de obtenção de nanocarbonatos a partir da captura química de CO_2 do projeto Agricarbono. A ferramenta utilizada para execução da ACV foi o software SimaPro® que trabalha segundo os princípios da série de normas ISO 14044/2009. O principal objetivo dessa ACV foi mensurar as cargas ambientais interligadas com a síntese de obtenção de nanocarbonatos. Os resultados obtidos na análise de inventário, na avaliação de impacto ambiental e na interpretação dos resultados, identificaram a energia elétrica e outros processos de geração de energia como os maiores contribuintes em cargas ambientais para todas as categorias de impacto ambiental estudadas, apontando baixas ou nenhuma carga ambiental para os demais insumos.

Palavras-chaves: aquecimento global; gases do efeito estufa; avaliação de ciclo de vida; nanocarbonato; sustentabilidade.

Abstract

Carbon dioxide (CO_2) is a gas generated by both natural and man-made sources, such as the burning of fossil fuels for energy generation and agriculture. It is now seen as a major contributor to the greenhouse effect, leading to global warming. Therefore, the development of technologies to capture and use this gas is of great importance for the mitigation of greenhouse gases (GHG) and reduction of their negative environmental effects. This study aimed to present the life cycle assessmente (LCA) of the synthesis of obtaining composite from kraft lignin and nanocarbonates from the chemical capture of CO_2 developed by the Agricarbono project. The tool used to perform the LCA was the software SimaPro®, which works according to the principles of the ISO 14044/2009 series of standards. The main objective of this LCA was to measure the environmental loads linked to the synthesis of obtaining composite. The results obtained in the inventory analysis, in the environmental impact assessment and in the interpretation of the results, identified electricity and other energy generation processes as the largest contributors in environmental loads for all categories of environmental impact studied, pointing out low or no environmental loads for the other inputs.

Keywords: global warming; greenhouse gases; life of cycle assessment; nanocarbonate; sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8

2 OBJETIVOS 11

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11

3.1 Aquecimento Global 11

3.1.1 Fontes de emissão de CO_2 13

3.1.2 Emissões na energia, bioenergia e agricultura 16

3.1.3 Tecnologias de captura de CO_2 17

3.1.4 Análise de maturidade tecnológica 26

3.1.5 Mercado de carbono 28

3.2 Ecologia industrial 30

3.3 Avaliação de Ciclo de Vida 32

3.3.1 Etapas da ACV 33

3.3.2 Ferramentas da ACV 36

3.3.3 Categorias de impacto 37

3.3.4 ACV e tecnologias de mitigação de CO_2 39

4 METODOLOGIA 41

4.1 Síntese para obtenção do compósito nanocarbonato de cálcio/lignina kraft 42

4.2 Avaliação de Ciclo de Vida da síntese 47

4.2.1 Objetivo e escopo 47

4.2.1.2 Suposições e limitações 50

4.2.2 Análise de inventário 52

4.2.3 Avaliação de impacto ambiental 56

4.2.4 Interpretação 57

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 57

5.1 Avaliação de impacto ambiental 57

5.2 Interpretação 69

6 CONCLUSÃO 71

REFERÊNCIAS 73

ANEXOS 85

1 INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO_2), ou gás carbônico, é um gás formado por dois átomos de oxigênio (O) e um átomo de carbono (C) por meio de dupla ligação (Figura 1); possui caráter polar e uma geometria linear de sua molécula, O=C=O; sendo solúvel em água, com a formação de ácido carbônico (KOTZ, 2015; PUBCHEM, 2022). Oriundo de processos naturais - produzido durante a respiração por todos os animais, fungos e microrganismos que dependem direta ou indiretamente de plantas vivas ou em decomposição para se alimentar - e de atividades antrópicas, principalmente dos processos de combustão utilizando combustíveis fósseis, o gás carbônico é considerado um gás com potencial de uso como matéria-prima (POLIAKOFF et al., 2015). Quanto às suas aplicações comerciais, pode-se destacar: uso como solvente para extração por fluido supercrítico, agente vasodilatador, anestésico, antagonista, gás para embalagem de alimentos, propelente de alimentos, gás para refrigerante; ademais, é um metabólito da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, utilizada na produção de etanol. As principais propriedades físico-químicas da sua molécula são apresentadas na Tabela 1.

Figura 1. Estrutura química da molécula de dióxido de carbono. Oxigênio em vermelho e carbono em cinza. Fonte: PUBCHEM (2022).

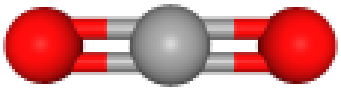


Tabela 1. Propriedades físico-químicas da molécula de dióxido de carbono. Fonte: adaptado de PUBCHEM (2022).

Nome da propriedade	**Valor da propriedade**
Massa molecular	44,009 g mol^{-1}
Aceptores de ligação de hidrogênio	2
Massa molecular exata	43,989829 g mol^{-1}
Massa molecular monoisotópica	43,989829 g mol^{-1}
Área superficial topológica polar	34,1 Å²
Carga formal	0
Unidade covalentemente ligada	1

Para um melhor entendimento do potencial de utilização deste gás, promovendo uma descarbonização de processos industriais e agroindustriais, especialmente os de geração de energia, devem ser considerados aspectos diversos, como os termodinâmicos e cinéticos, a viabilidade técnico-econômica dos projetos e tecnologias, a integração de processos, a sustentabilidade e os princípios de química verde.

Sabe-se que a emissão de gases do efeito estufa (GEE) ocorre através de fontes naturais, mas que uma significativa parcela dessas emissões é de origem antrópica - para o qual o gás carbônico é tido como um dos principais contribuintes, juntamente

com o gás metano, tais gases produzem alterações climáticas em escala global, com efeitos ambientais adversos (United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition, 2021).

Eventos como o aquecimento global em decorrência do efeito estufa, se apresentam como valiosa justificativa para as buscas por tecnologias que amenizem as consequências da poluição atmosférica.

Peoplow (2022) noticia a reciclagem de CO_2 oriundo de um parque industrial com fornos que convertem calcário e carvão em cal e coque em uma província da China. A fábrica pretende converter o CO_2 em produtos como combustível e plástico. O artigo evidencia não só a captura e a utilização de CO_2, mas também os produtos finais dessa integração (combustível e plástico), sendo que o último auxiliará na problemática dos combustíveis fósseis.

Com um número crescente de tecnologias de mitigação de GEE nos últimos anos como a utilização de CO_2 como matéria-prima e o armazenamento geológico, a avaliação de ciclo de vida (ACV) emerge como instrumento notório de verificação de cargas ambientais de processos de integração de captura, armazenamento e utilização de CO_2.

A ACV teve seus primeiros trabalhos desenvolvidos mundialmente na década de 1960 e no Brasil ganhou forças nas últimas três décadas. Trata-se de uma ferramenta "*gradle-to-grave*" (do berço ao túmulo) capaz de investigar todas as etapas de um processo, serviço ou produto, quantificando seus respectivos impactos ambientais (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

A utilização do CO_2 como insumo, é uma alternativa promissora para a mitigação dos GEE. Além de possuir valor agregado, o CO_2 pode beneficiar setores industriais, como o da química e da agropecuária, como é o caso da obtenção de nanocarbonatos.

A obtenção de produtos químicos é um caminho de integração novo e próspero no setor de captura de CO_2, e que vem sendo buscado pelo projeto Agricarbono, parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA) e a Eletrobrás. Muitos estudos tem sido desenvolvidos com a finalidade de avaliar as cargas ambientais dessa tecnologia e validar a utilização de CO_2 como matéria-prima.

2 OBJETIVOS

Avaliar os impactos ambientais, através da avaliação de ciclo de vida (ACV), de um processo de obtenção de compósito obtido por meio de lignina Kraft e nanocarbonato a partir da captura química de CO_2, para uso na agricultura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aquecimento Global

Com o crescimento industrial, as emissões de poluentes gasosos ganharam força. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2018), são emitidas aproximadamente 41 bilhões de toneladas de dióxido de carbono anualmente que contribuem para um aumento na temperatura do planeta. Devido a isso, o aquecimento global, provocado pelas emissões descontroladas dos gases causadores do efeito estufa (ex.: dióxido de carbono, metano e óxido nitroso), é objeto de pesquisa científica, de políticas ambientais e de conscientização da sociedade moderna.

O efeito estufa é um fenômeno que ocorre naturalmente na atmosfera terrestre. É um fenômeno primordial para a existência de vida no planeta, pois atua como uma

manta recebendo energia solar para manter a temperatura média global (KWEKU et al., 2017). O efeito estufa evita que o calor que volta para atmosfera se perca para o espaço. Sem essa condição, a Terra teria uma temperatura tão baixa ao ponto de não haver condições adequadas para a vida terrestre (UNITED KINGDOM, 2011). Por sua vez, o aquecimento global ocorre pela presença massiva de gases na atmosfera que retém calor além do necessário para a manutenção da Terra (KWEKU et al., 2017).

De acordo com Schultheis (2013), os gases do efeito estufa (GEE), majoritariamente dióxido de carbono, óxido nitroso e metano, possuem uma estrutura molecular capaz de absorver determinada quantidade de calor e é essa capacidade que configura tal efeito. Se a concentração de moléculas desses gases for elevada, a manta de proteção da Terra fica sobrecarregada de calor, provocando o aquecimento global. A contribuição percentual ao efeito estufa se dá do seguinte modo (FALCI, 2019):

- Dióxido de carbono: 53%
- Metano: 17%
- CFCs (clorofluorcarbonos): 12%
- Óxido nitroso: 6%
- Outros: 12%

A grande quantidade de GEE emitidos para a atmosfera por meio de atividades industriais e agroindustriais – como a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia em termoelétricas e a fermentação de sacarose para a produção de etanol em usinas de cana-de-açúcar -, podem promover o efeito estufa por possibilitarem

uma maior absorção da radiação infravermelho do espectro eletromagnético. Desse modo, os processos antrópicos são considerados aqueles que estão intensificando o aquecimento global (KUMAR et al., 2018).

Sendo o aquecimento global um assunto de interesse econômico, social e ambiental de grande relevância, a maioria dos países têm direcionado grandes ações para mitigação dos GEE (LIN; XU, 2018), como é o caso das tecnologias de captura de CO_2 e da precificação do carbono.

Cabe destacar a importância do entendimento, monitoramento e controle das mudanças climáticas, especialmente do aquecimento global, o que pode ser refletido na organização de grandes convenções mundiais sobre o tema, como o Acordo de Paris[1], Rio +20[2] e Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas[3], as quais visam unir esforços e estabelecer ações e políticas internacionais de redução de emissão de GEE.

3.1.1 Fontes de emissão de CO_2

De acordo com Heek et al. (2017), as principais atividades emissoras de GEE são:

- A geração de energia em usinas que usam combustíveis fósseis como carvão mineral, gás natural e petróleo;
- O tráfego e transporte;
- A agricultura;

[1] https://news.un.org/pt/tags/acordo-de-paris

[2] http://www.rio20.gov.br/sobre_a_rio_mais_20.html

[3] https://unfccc.int/

- As indústrias de manufatura e construção.

Tajudin et al., (2019) ressaltam que o notável aumento de indústrias e de automóveis em áreas urbanas caracteriza a principal causa da emissão desenfreada de poluentes como o monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO_2) e dióxido de carbono (CO_2). Antony et al. (2018), observaram que a indústria química é o setor que mais contribui para a geração de poluentes gasosos, sendo desejável o desenvolvimento de processos sustentáveis de transformação.

A emissão de GEE teve seu crescimento global acelerado a partir da primeira revolução industrial, em meados do século XIX. A necessidade da queima de combustíveis fósseis para obter energia, por exemplo, é responsável por ¾ da emissão de dióxido de carbono na atmosfera, sendo este o setor que mais contribui para liberação do gás; em seguida, tem-se mudança de uso da terra, com desmatamentos descontrolados e maus usos de madeiras e afins (KAHPRE et al*.,* 2019). Sabendo-se que as usinas termoelétricas estão inclusas no setor que mais contribui com as emissões de poluentes gasosos, é pertinente agregar esforços para o desenvolvimento de tecnologias mitigadoras de GEE para as primeiras.

No setor da agroindústria, mais especificamente na produção de etanol, Paulo (2019) destaca como as principais emissões gasosas dessa atividade: dióxido de carbono, vapor d'água, material particulado e dióxido de nitrogênio.

O dióxido de carbono provém, principalmente, de atividades como a combustão e mudança de uso das florestas (SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES, 2017) e é usado como meio de referência para os outros gases quando se consideram seus potenciais de influência no aquecimento global; por exemplo: o óxido de nitrogênio (N_2O) resultante, principalmente, da combustão possui um poder de

aquecimento global 310 vezes maior que do dióxido de carbono (BRAGA et al., 2007). Já o metano, que é produzido por atividades como a decomposição da matéria orgânica, sendo emitido, geralmente, em aterros sanitários e lixões, apresenta poder de aquecimento global 21 vezes maior que do dióxido de carbono (BRASIL, 2018).

O dióxido de carbono é considerado o GEE que mais contribui para o aquecimento global, principalmente devido a um aumento de 35% na sua emissão após o início da era industrial, sendo a sua emissão no Brasil no ano de 2020 de 2,16 bilhões de toneladas brutas de gás carbônico equivalente (CO_2e) (SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES, 2022), trata-se de 3% do total mundial, (BRASIL, 2022).

De acordo com o GWP100 (*100-year Global Warming Potential*), conforme documento do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014a), referência utilizada nos cálculos de descarbonização, os impactos relativos de diferentes gases na temperatura global são:

- CO_2 =1;
- CH_4 fóssil = 30;
- CH_4 biogênico = 28;
- N_2O = 265.

3.1.2 Emissões na energia, bioenergia e agricultura

3.1.2.1 Plantas termoquímicas e usinas de etanol como fontes de CO_2

A geração de eletricidade fóssil é o setor que mais contribui para a poluição do ar, respondendo por 17% deste aporte (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014b). As plantas termoquímicas geram, em sua predominância, energia através da queima de combustíveis fósseis não renováveis – como o carvão mineral e o diesel.

Devido aos impactos ambientais causados por esta geração não renovável de energia, alternativas de substituição por gás natural, energia nuclear, hidrelétricas e tecnologias que minimizem os impactos são amplamente estudadas (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016). Entretanto, muitas dessas alternativas dependem de viabilidade técnica e de viabilidade econômica, o que varia conforme o país e as suas condições naturais. Esse impasse faz requerer tecnologias que reduzam as emissões gasosas das plantas existentes, apesar da concentração do dióxido de carbono emitido ser de, aproximadamente, 8% v/v[4].

A produção de etanol se apresenta como alternativa de mitigação em relação a outros processos agroindustriais, já que o gás emitido poderia, em tese, ser absorvido na sua totalidade pelas plantas cultivadas (ex.: cana-de-açúcar) por meio da fotossíntese (NOVA CANA, 2022). Como subprodutos da fermentação da sacarose para a produção do etanol, tem-se calor e dióxido de carbono. Além de mais uma alternativa para reduzir as emissões de GEE através do uso do etanol como

[4] Valor determinado pelo projeto Agricarbono (Eletrobras CGTEE-Embrapa-Programa de P&D ANEEL) em 2019.

biocombustível, a produção do etanol gera um dióxido de carbono com 99% v/v de pureza (ZHANG et al., 2017), pureza muito desejável para o uso do segundo como matéria-prima industrial. Devido ao elevado teor de pureza do gás, a viabilidade da sua captura torna-se mais significante por permitir tecnologias de captura de menor custo (SILVA et al., 2018).

3.1.3 Tecnologias de captura de CO_2

Considerado o principal causador do aquecimento global, o dióxido de carbono apresenta-se como tema de grande interesse acadêmico e industrial. Mikayilov et al. (2018) afirmam que o número de atividades emissoras deste gás tende a crescer futuramente e salientam que não só os países possuidores das grandes economias devem adotar as medidas de redução, mas os demais países também devem empregar as políticas ambientais destinadas à sua mitigação.

Para tratar do controle das emissões de dióxido de carbono, diversas pesquisas encontram-se em execução visando à mitigação desse gás. Ghanbaralizadeh et al. (2016) ressaltam que o seu uso pode ser dividido em quatro categorias:

i. Produção química (ex.: matéria-prima de polímeros e carbonatos)
ii. Produção de combustíveis (ex.: matéria-prima de gasolina e diesel)
iii. Aproveitamento biológico (ex.: fonte de C para crescimento de microalgas)
iv. Utilização convencional (ex.: solvente)

Souza (2016) cita como processos de mitigação de dióxido de carbono o uso mais eficiente da energia, a substituição dos combustíveis fósseis por outros com

menor conteúdo de carbono, a utilização de soluções energéticas que empreguem fontes de energia renováveis e o armazenamento do dióxido de carbono em formações geológicas.

Dentre as alternativas de mitigação do dióxido de carbono, o seu uso como matéria-prima representa uma opção de grande apelo econômico e ambiental, pois permite a sua utilização como insumo em processos industriais, podendo colaborar na formação de produtos e materiais inovadores (HEEK et al. 2017). Características como abundância, baixa toxidade e baixo custo, fazem do dióxido de carbono uma excelente matéria-prima (ANTONY et al*.,* 2018).

Visando à sua utilização industrial, as tecnologias se direcionam a capturar esse gás da maneira mais pura, econômica e ambientalmente viável. As principais tecnologias de captura referem-se à adsorção, absorção, captura por membranas e captura química (WILCOX, 2012). A captura de dióxido de carbono pode ser realizada durante três etapas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2005):

- Pré-combustão
- Combustão
- Pós-combustão

Este estudo, foca na discussão da captura de CO_2 na etapa de pós-combustão, ao que se refere à captura química de fontes energéticas para obtenção de nanocarbonatos e, posteriormente, a obtenção de compósito a partir da adição da lignina Kraft.

3.1.3.1 Adsorção

No processo de adsorção, o gás entra em contato com partículas porosas capazes de o adsorverem devido à sua afinidade superficial (ex.: grupamentos químicos semelhantes), o separando da mistura de gases (WILCOX, 2012).

Diante disso, as tendências de desenvolvimento para esse tipo de captura estão direcionadas principalmente a otimização de gasto energético, eficiência da separação dos gases e materiais adsorventes.

Karimi et al. (2018) estudou a captura de CO_2 realizada a partir de uma solução de solventes com base de cloreto de colina eutético com a finalidade de tornar o CO_2 um precursor útil para a produção de nanopartículas de calcita com valor agregado. Seus principais resultados apresentaram viabilidade para que o precursor seja aplicado em grande escala, reduzindo as emissões de CO_2 e demonstrando a eficiência da solução para o processo de adsorção.

PHAM et al. (2016) aplicou nanozeólita no processo de captura de CO_2 por adsorção, com base na temperatura empregada através de simulações que variaram parâmetros como porcentagem do adsorvente, de CO_2 capturado e temperatura. Mantendo a captura de CO_2 acima de 88% v/v, tendo-se como resultados: alta eficiência da nanozeólita, além da economia produzida pelo adsorvente.

Um estudo foi realizado a fim de testar a adsorção a vácuo, temperatura e concentração em uma usina termelétrica (UT) de carvão. Para que fosse possível avaliar os parâmetros empregados durante a pesquisa, dois cenários foram estabelecidos e o principal resultado referiu-se a taxa de calor específica que se apresentou como vantagem em relação à utilização de aminas convencionais, entretanto os autores constataram o gasto energético como principal impedimento para esta tecnologia (PLAZA E RUBIERA, 2019).

Os processos de adsorção são considerados processos de separação complexos. As pesquisas que visam minimizar os custos desses processos apresentam, hoje, algumas limitações, entre elas a baixa eficiência no processo de separação do gás (KARIMI et al., 2018). Outro fator limitante no desenvolvimento de tecnologias de adsorção é a necessidade de grandes quantidades de energia para operar o processo – ou seja, o balanço energético é desfavorável.

3.1.3.2 Absorção

Na absorção o processo deve ocorrer de maneira com que o dióxido de carbono seja passível de separação posterior, pós-captura. Isso é possível, pois essa tecnologia conta com materiais capazes de absorver o gás e transportá-lo de uma fase para outra, nesse caso o gás carbônico é solubilizado passando-se para fase líquida da mistura, viabilizando a sua separação dos demais componentes (WILCOX, 2012).

A absorção está entre as tecnologias mais promissoras pela sua eficiência e viabilidade econômica. Entretanto, e como já citado, também o seu gasto energético durante o processo é elevado (SILVA et. al, 2018). Devido a isto, as pesquisas estão voltadas a otimizar a energia necessária para a operação.

Quyn et al. (2013) estudou a captura de CO_2 por absorção utilizando o carbonato de potássio como solvente analisando as especificidades do processo a partir da incorporação do solvente escolhido. Para traçar os parâmetros de simulação, utilizou-se o *software* Aspen® e foram estabelecidas porcentagens do solvente para avaliar cenários. Os autores consideraram os resultados como promissores para prever o desempenho do carbonato de potássio no processo de absorção

Valluri e Kawatra (2020) realizaram estudo em escala piloto de 4 tipos de solvente para a captura de CO_2 por absorção. Durante os ensaios, os autores incorporaram um surfactante a fim de avaliá-lo e também material espumante. O principal resultado dos ensaios, referiu-se à eficiência da absorção pelos solventes que tiveram os espumantes incorporados no processo. A eficiência de captura no cenário em questão aumentou de 55 a 99%. A viabilidade dessa otimização apresentou baixo custo, além de ser ambientalmente adequada.

Testes com nanofluidos como absorventes de CO_2 foram realizados no trabalho de Basavaraj e Shijo (2020). Os nanofluidos utilizados foram os de TiO_2 e Al_2O_3. Os principais objetivos dessa pesquisa foram observar os tipos de nanopartículas e a influência de suas concentrações no processo de absorção. O resultado mostrou que o aumento da concentração desses nanofluidos diminuiu o índice de absorção relativa do CO_2. Para realizar a comparação, utilizou-se um fluido de base. Também foram testados os nanofluidos à base de solução salina, onde constatou-se que essa combinação diminuiu a estabilidade das nanopartículas, reduzindo a eficiência da absorção.

Yuan e Rochele (2019) avaliaram um dos solventes mais usados nas tecnologias de absorção de CO_2, a piperazina. Combinações com água e outro solvente, foram realizadas para avaliar a piperazina quanto à sua precipitação. A precipitação desse composto influencia na eficiência da absorção do gás e, por isso, tem-se o interesse nas suas propriedades. Os resultados mostraram que devido a incorporação de novos compostos, aumentou-se a capacidade de captura de CO_2 e a capacidade de reciclagem do absorvente.

3.1.3.3 Separação por membranas

A captura por membranas baseia-se na seletividade do material constituinte delas em relação ao gás. O dióxido de carbono permeia-se pelas membranas, separando-se de outros compostos. Devido a sua função, as membranas dependem de parâmetros como permeabilidade do meio, tamanho de partícula, seletividade e volume de poros (NOCITO; DIBENEDETTO, 2019). Diante disso, esses parâmetros correspondem às tendências das pesquisas dessa tecnologia.

Ren et al. (2020) avaliou a seletividade de membranas híbridas que atuam no processo de captura de CO_2 e N_2 (que também é um gás do efeito estufa) em usinas termelétricas (UT). Utilizou-se nesse trabalho o *software* Aspen® para simular uma UT, e otimizou-se parâmetros econômicos da tecnologia por membranas, permeabilidade e vida útil. O resultado apresentou fatores de causalidade entre o desenho da UT e as propriedades das membranas, além de identificar a seletividade da membrana e variáveis de custos.

Uma pesquisa focou nas características de membranas a serem usadas para capturar CO_2 de fonte de gás natural. Foi usado um modelo matemático para estudar elementos como molhabilidade da membrana, estrutura, tipo de absorvente usado no processo de captura, porosidade e tamanho de fibras. As simulações foram realizadas com quatro tipos de absorventes, tamanhos variados de fibras; porcentagens foram definidas para estimar os valores mais eficientes, com o intuito de definir a membrana ideal. Os resultados apresentados mostraram que concentração do absorvente, densidade e porosidade influenciaram diretamente na separação do CO_2 (ABDOLAHI-MANSOORKHANI; SEDDIGHI, 2020).

Nieminen et al., (2020) estudou a transferência de massa de um contator de membrana de fibra oca. Os parâmetros que influenciaram diretamente no coeficiente

da transferência de massa foram explorados a fim de tornar visível a eficiência do contator quando ligado à membrana. A partir dos ensaios pôde-se observar a trabalhabilidade do contator utilizado. Este apresentou muitas limitações quanto à dessorção. Assim sendo, sugeriu-se que ensaios a vácuo se apresentaram ineficientes, sendo necessário o umedecimento das membranas, a fim de facilitar a transferência de massa por elas.

Scholes et al. (2020) realizaram um teste de absorção realizado em uma planta piloto de geração de energia a partir de carvão mineral. Aqui, os autores utilizaram contatores gás-solvente com a finalidade de promover maior eficiência e compacidade no processo de captura de CO_2 através da tecnologia de captura por membranas híbridas. Os contatores puderam auxiliar aos solventes no processo de absorção do gás. Como resultado, os contatores se mostraram eficientes ao serem aplicados em escala industrial.

As pesquisas voltadas a captura de dióxido de carbono por membranas têm como maior desafio o desenvolvimento de sistemas que otimizem os parâmetros necessários ao processo de captura. Entretanto, segundo Wilcox (2012), essa tecnologia é considerada a tecnologia mais eficaz dentre as já existentes.

Definir a tecnologia de captura, bem como todas as operações unitárias envolvidas no processo, é de fundamental importância e ditará a sua viabilidade de aplicação. Novamente, segundo Wilcox (2012), os métodos de separação de gases envolvendo membranas apresentam melhores resultados.

A principal discussão levantada pelos processos de captura de CO_2 é relacionada aos fatores econômicos envolvidos – CAPEX (Capital Expenditure) que trata de custos de investimento e OPEX (Operational Expenditure) que trata de custos operacionais. Sabe-se que tecnologias verdes requerem alto índice de

aperfeiçoamento e, geralmente, estão atreladas a altos investimentos (KALATJARI et al., 2019).

3.1.3.4 Captura química

Entre as tecnologias de captura de dióxido de carbono atualmente em desenvolvimento, tem-se ainda a captura química – que será explanada separadamente neste capítulo com intuito de destacar a obtenção de carbonatos – para geração de carbonatos como aquela que pode promover uma agregação de valor às cadeias industriais e agroindustriais, além de levar a sistemas de produção mais sustentáveis. Essa captura faz uso de reações químicas tendo-se o dióxido de carbono como reagente e os carbonatos como os produtos finais – esses podem ser inorgânicos ou orgânicos.

Hornberger et al., (2020) investigaram a captura de CO_2 através da tecnologia de circuito (*looping*) de cálcio. A pesquisa foi conduzida em escala semi-industrial em usinas termoelétricas com queima de combustíveis fósseis. Os resultados mostraram que maiores concentrações de sorvente aumentam o transporte de gás. Os ensaios validaram a tecnologia empregada para capturar CO_2, com a mesma mostrando-se para aplicação em usinas de fabricação de cimento.

Enquanto Sila e Santos visaram otimizar a tecnologia de Ca-*Looping* investigando a utilização de aditivos com o intuito de diminuir a desativação de CaO durante o processo de captura de CO_2. Os resultados obtidos mostraram que as combinações de carbonatos com Al_2O_3, aditivo usado nesse experimento, foram eficazes na captura de CO_2, pois impediu o fechamento de poros e o crescimento de cristais de CaO.

Outro trabalho teve como objetivo avaliar a incorporação de óxido de cálcio ao processo de captura de CO_2 por carbonatação. Duas combinações de carbonatação foram feitas: uma com cálcio puro e outra com cálcio misturado com alumina. Constatou-se que a carbonatação com o cálcio puro promoveu maior captura de CO_2 do que a mistura com alumina, que se demonstrou pouco eficiente ao processo de captura de CO_2 como carbonato (BISINOTI et al., 2017).

Liu e Gadikota (2020) estudaram a captura e conversão de CO_2 para produzir carbonato de cálcio com CaO e $CaSiO_3$ como precursores. Usou-se glicinato de cálcio para promover a captura de CO_2 e investigou-se parâmetros como a temperatura, concentração do aditivo e tempo de reação. Os resultados obtidos sugeriram que o glicinato sofre múltiplos ciclos de capturas e regeneração, favorecendo a precipitação de carbonatos.

O grande interesse nessa classe de tecnologia se dá porque os carbonatos obtidos possuem elevado ponto de ebulição, baixa toxicidade e são biodegradáveis (NORTH et al., 2010). Mais do que se pensar em mitigar o dióxido de carbono, a sua captura como carbonato visa à utilidade do gás como insumo para setores industriais, como o químico.

As tecnologias descritas neste capítulo evidenciam o direcionamento do desenvolvimento delas para os processos de captura de CO_2 integrados à utilização desse gás. Vaz Jr. et al. (2022), ressaltaram, em artigo de revisão, fatores econômicos e eficiência energética como os pontos que mais requerem otimização no desenvolvimento das tecnologias de captura de CO_2 existentes.

3.1.4 Análise de maturidade tecnológica

A busca por tecnologias “verdes” ganhou proporção devido à preocupação mundial com os impactos ambientais advindos dos processos industriais, como os processos químicos. Essa problemática impulsa desde o início do século XXI o grande aumento de pesquisas e novas tecnologias para as mais diversas áreas. Os setores de geração de energia, química e agropecuária se destacam quantitativamente no surgimento de tecnologias verdes, pois são os principais responsáveis pelas elevadas emissões de GEE.

Acompanhar o desenvolvimento de novas tecnologias e da otimização das tecnologias existentes é importante por possibilitar projeções futuras para determinado ramo de P&D&I (pesquisa, desenvolvimento e inovação).

A análise de maturidade tecnológica é uma ferramenta desenvolvida pela NASA em 1990 e foi adaptada pelo *The Electric Power Research Institute* (EPRI) como o sistema *Technology Readiness Level* (TRL), que é capaz de realizar um nivelamento das tecnologias existentes, apontando o status em que elas se encontram (FREEMAN, BHOWN, 2011).

O TRL possui uma nomenclatura simples (TRL-1, TRL-2, TRL-3...) e permite analisar o desenvolvimento das tecnologias através de estágios. A identificação do status atual da tecnologia ocorre de forma crescente e o avanço de cada estágio depende do cumprimento do estágio anterior, conforme tabela 2.

Tabela 2. Estágios de desenvolvimento TRL de acordo com o EPRI.

		Nível de maturidade da tecnologia
Demonstração	9	Serviço de comércio normal
	8	Demonstração comercial, implantação em grande escala na forma final
	7	Demonstração em sub escala, protótipo funcional completo
Desenvolvimento	6	Teste piloto totalmente integrado em um ambiente relevante
	5	Validação de subsistema em um ambiente relevante
	4	Validação de sistema em um ambiente laboratorial
Pesquisa	3	Testes de provas de conceito, nível de componente
	2	Formulação de aplicação
	1	Observação dos princípios básicos, conceito inicial

Fonte: Adaptado de FREEMAN e BHOWN (2011)

A avaliação através de TRL possibilita projeções de tempo, custo e de impactos ambientais, quantifica as tecnologias existentes e auxilia a tomada de decisões. Atualmente, é uma ferramenta usada mundialmente pela indústria e a academia em diversos ramos, especialmente na P&D&I.

Por serem, geralmente, tecnologias de captura e uso de CO_2 de alto custo, a utilização da análise de maturidade tecnológica é de extrema importância para a abordagem CCU *(Carbon Capture and Utilization)*, pois identifica tecnologias promissoras capazes de orientar investimentos em P&D ao analisar os níveis de TRL em que a tecnologia é capaz de atingir (ROH et al., 2020). ZIMMERMANN et al., (2018) ressaltam que experimentos em larga escala e que atingem valores de TRL mais elevados, correspondem às tecnologias de maiores custos.

Freeman e Bhown (2011) ressaltam que a escala TRL apresenta como principal limitação a falta de requisitos de cada estágio de desenvolvimento para que se avance

ao próximo estágio, ou seja, não se sabe o nível de esforço necessário para avançar do TRL-1 para o TRL-2 e assim sucessivamente.

O uso de ferramentas como a escala TRL muda a perspectiva do setor de P&D&I. Vantagens como as projeções de tempo e custo se destacam na sua aplicação e são extremamente válidas no acompanhamento do desenvolvimento das tecnologias de captura e uso de GEE.

3.1.5 Mercado de carbono

Com o agravo das mudanças climáticas, os mecanismos de controle de poluição voltam-se mais ainda para a mitigação das emissões dos GEE. Kim e Park (2018) defendem que os mecanismos criados em convenções mundiais como o Protocolo de Quioto[5], se dão essencialmente pelo aumento de emissões de GEE, especialmente de dióxido de carbono. Assim, a preocupação mundial com as emissões deste gás vai além do aquecimento global, ganhando um enfoque econômico e social.

O mercado de carbono compreende acordos feitos em convenções mundiais por diversos países com o objetivo de fomentar e impulsionar as buscas por processos mitigadores e, também, de proporcionar a união de tais acordos visando uma conscientização das reduções dos GEE (GODOY, 2013).

Como forma de incentivar a redução dos GEE, esse mercado permite transações de carbono entre países que não atingiram sua cota de redução e aqueles que a superaram, com essas transações gerando receitas para quem possui créditos de carbono (DUIN; TAVASSZY, 2018), tornando-as de grande interesse econômico e social.

[5] https://ipam.org.br/entenda/o-que-e-o-protocolo-de-quioto/

Entender a viabilidade econômica do mercado do dióxido de carbono auxiliará a estimar, de forma mais exata, as emissões antrópicas desse gás. Com o passar dos anos, é esperado que as mudanças climáticas promovam efeitos mais agressivos, sendo o mercado de carbono um estímulo para que os países cumpram os acordos feitos nas convenções internacionais (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020), além de fomentar as pesquisas de redução e/ou aproveitamento dos GEE.

Na atualidade, os sistemas de precificação de carbono abrangem, principalmente, setores industriais, de energia e mudança do uso da terra. São exemplos de esforços internacionais para a precificação:

- *The Partnership for Market Readiness (PMR)*[6]
- *The Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC)*[7]
- *The Mitigation Action Assessment Protocol (MAAP)*[8]

No Brasil, os setores termoelétricos e sucroalcooleiros são objetos de pesquisa por serem grandes geradores de dióxido de carbono. Cabe destacar a pureza desse gás produzido pelo setor sucroalcooleiro, o que o torno mais facilmente *monetizável*, quando comparado àquele advindo do setor termoelétrico, cuja pureza é consideravelmente reduzida. Como exemplo da precificação de carbono pode-se citar a comercialização de créditos de carbono em bolsa de valores: a B3 - Bolsa Brasil

[6] https://www.thepmr.org/

[7] https://www.carbonpricingleadership.org/

[8] https://maap.worldbank.org/#/homepage

Balcão - registra as emissões feitas por produtores e importadores de biocombustíveis, negocia e solicita a aposentadoria do Crédito de Descarbonização (CBIO) no Brasil (BRASIL BOLSA BALCÃO, 2022).

3.2 Ecologia industrial

As questões ambientais associadas ao CO_2 ganharam grande destaque nas três últimas décadas pela problemática advinda das mudanças climáticas. Desde então, estratégias de mitigação das emissões desse gás vêm sendo desenvolvidas e o setor industrial, por sua vez, agregou a necessidade de adotar a sustentabilidade a fim de atender o meio ambiente e se sobressair quanto à vantagem competitiva de mercado.

Embora a literatura apresente inúmeras variações no conceito de ecologia industrial (EI), essa estratégia está voltada à quantificação de impactos ambientais, através dos fluxos de energia, material (KENDAL E SPANG, 2019) e informações compartilhadas entre ecossistemas naturais e sistemas industrializados (BRUEL et al., 2018).

A EI busca, principalmente, atender as necessidades ambientais e econômicas das empresas como um todo. Análoga a essa estratégia, a economia circular (EC) se apresenta como uma ferramenta, que também parte dos princípios de troca entre ecossistemas naturais e industriais, com foco especialmente nos ciclos de matéria e energia de produtos (BRUEL et al., 2018).

A economia circular concomitante com a ecologia industrial, marca uma grande mudança na sustentabilidade de sistemas industriais. Uma vez que comparada à economia linear (EL), a EC agrega o bônus de considerar sistemas em ciclos de reaproveitamento, que abrangem desde as entradas da matéria-prima até a destinação final dos resíduos de fabricação.

Baldassarre et al., (2019) ressaltam três táticas referentes aos sistemas cíclicos que são essenciais para aplicação da EC, sendo elas: estreitar os ciclos, visando o menor uso de matéria-prima e, por conseguinte, uma menor geração de resíduos; retardar os ciclos, para prolongar a utilização de determinado produto de entrada dentro do sistema; fechar os ciclos, para que seja possível a reciclagem dos resíduos.

Considerando as estimativas de emissões de poluentes atmosféricos oriundos do âmbito industrial, o setor tem se dedicado na integração de tecnologias de mitigação de GEE em suas respectivas plantas com o intuito de aplicar pilares da EI.

As indústrias, pesquisadores e setores governamentais com interesse em captura de GEE, tem dedicado grande atenção à EI através de estratégias como a *Carbon Capture and Storage* (CCS) e *a Carbon Capture and Utilizatization* (CCU), pois atendem a muitos princípios da EI.

Meylan et al., (2015) debateram tecnologias de captura de CO_2 integradas à sua utilização como matéria-prima na perspectiva de EI e concluíram que integrações às tecnologias já existentes, podem dar início a um novo ciclo do carbono antrópico, favorecendo a mitigação de CO_2. Outras perspectivas tecnológicas foram abordadas por Hepburn et al., (2019), que ressaltam também a importância de outras estratégias atreladas às tecnologias já existentes e o quanto esse fator favorece a EI.

No Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2019) implantou o projeto Agricarbono, que tem como princípio utilizar o CO_2 capturado de plantas de usinas termoelétricas e da produção de etanol, como matéria-prima para produção de nanocorretivos do solo e suportes de liberação controlada para agricultura.

Com significativa contribuição nas emissões dos GEE, a agricultura também sofre consequências diretas das mudanças climáticas, consequências estas pouco

abordadas pela EI. Kendall e Spang, (2019) frisam a importância de desenvolver novas estratégias a partir da EI para identificar a vulnerabilidade da agricultura quanto às mudanças climáticas e estendem o alerta para outros sistemas, uma vez que a literatura não apresenta significativos resultados ao processo de adaptação e resiliência do ambiente.

Para investigar as cargas ambientais – que se referem aos valores para cada impacto ambiental identificado – do setor industrial, a EI conta com diversas ferramentas capazes de quantificar e avaliar os ciclos de vida de processos e produtos industriais, como é o caso da avaliação de ciclo de vida (ACV). Avaliando os avanços da ACV ao longo dos anos, Kendall e Spang (2019) destacaram a capacidade desta abordagem em promover estudos prospectivos e assim avaliar as consequências da obtenção de produtos e seus sistemas.

3.3 Avaliação de Ciclo de Vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma abordagem e ferramenta de análise de sustentabilidade que auxilia em tomadas de decisões em diversos setores industriais, avaliando as cargas ambientais de novas tecnologias (SAADE, SILVA, GOMES, 2014). Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001): *“a ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto (isto é, do “berço ao túmulo”), desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição”.* A norma também salienta que o uso dos recursos, a saúde humana e a ecologia devem ser os principais aspectos a serem considerados durante a avaliação de impacto.

Historicamente, a estrutura da ACV deu seus primeiros passos na década de 1960 nos Estados Unidos, com a *The Coca-Cola Company* gerando o primeiro esquema de destaque ao comparar o desempenho ambiental de embalagens (SANTOS, 2016).

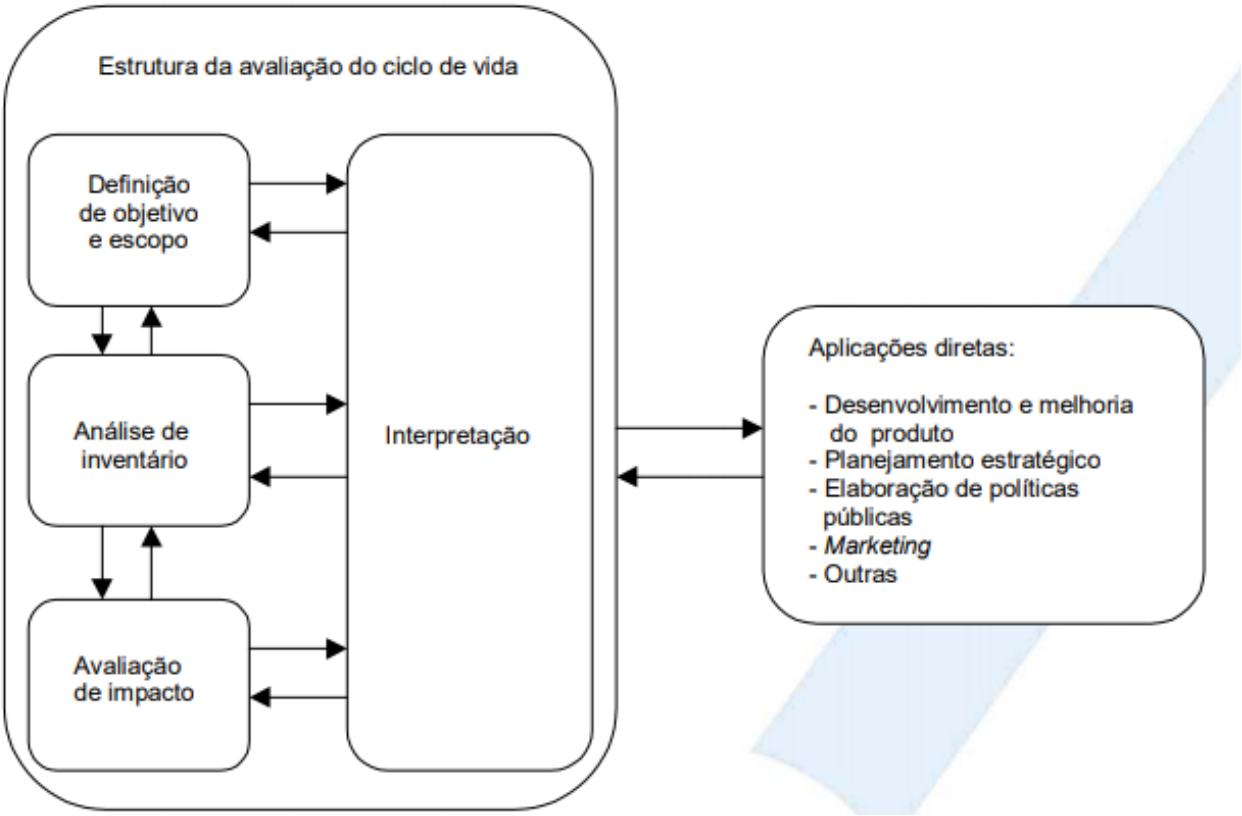
Baseada em procedimentos e normas, a ACV passou por inúmeras reformas metodológicas a fim de incorporar todo o ciclo de vida de sistemas e produtos em sua configuração. A estrutura da ACV é embasada pela série de normas ISO 14040/2006, e hoje, seus principais requisitos e orientações são encontrados na ISO 14044/2009.

Atualmente, a ACV é considerada a metodologia mais eficiente no estudo de impactos ambientais (FEIJOO E MOREIRA, 2020) e tem sido amplamente utilizada em setores de geração de energia, de produção de polímeros, de mineração, de transporte etc. A principal característica de uma ACV é a possibilidade de avaliar os impactos ambientais de cada componente do processo, o que permite quantificar mais precisamente os impactos de determinada rota e, consequentemente, otimizar a proposição de futuras metas e tomadas de decisões.

3.3.1 Etapas da ACV

A estrutura de uma ACV é composta por quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação, conforme Figura 2.

Figura 2. Fases da ACV.



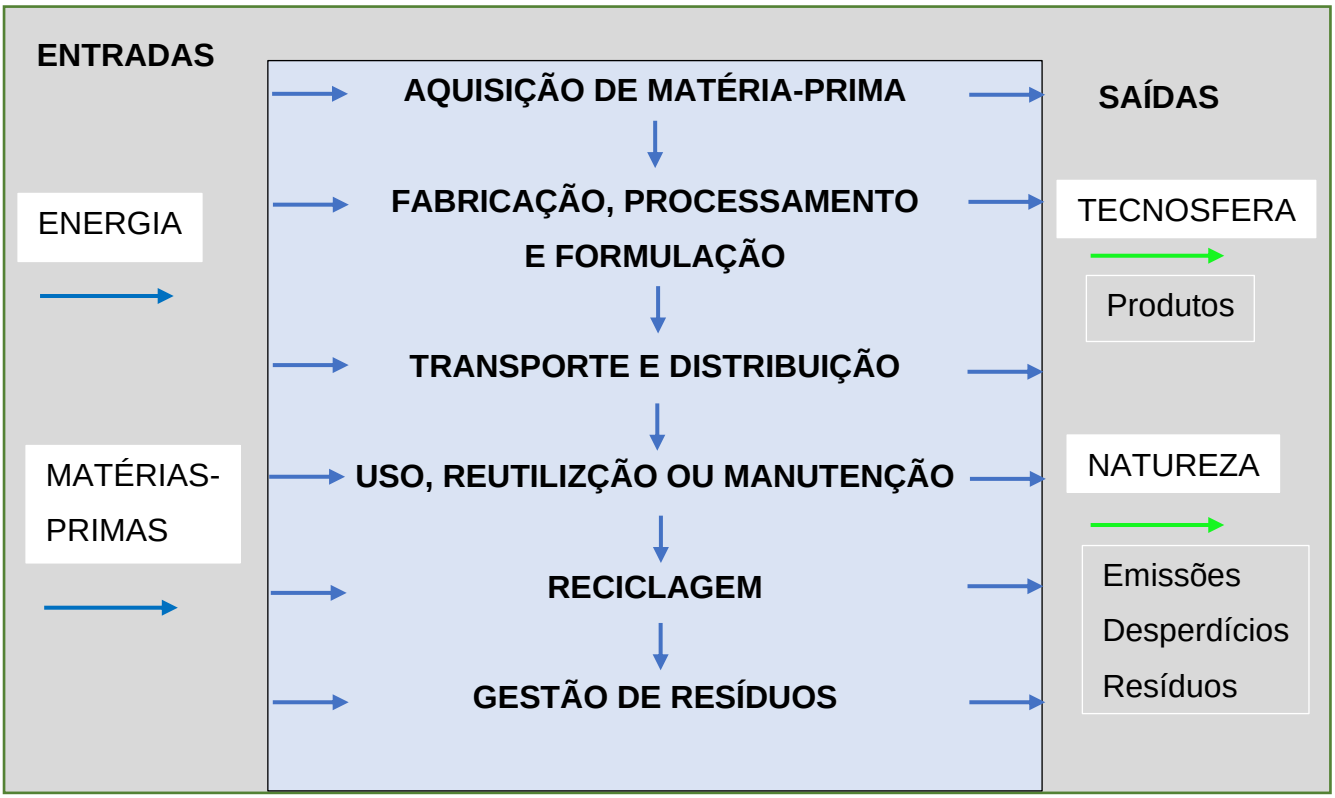
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009).

Na *definição de objetivo e escopo* são estabelecidas as principais metas da ACV. Essa etapa tem como finalidade garantir que a ACV proporcione os resultados esperados. Nela, a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo devem ser definidos consistentemente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Para determinar os itens citados, o sistema, a função do sistema, a unidade funcional e as regras de alocação são consideradas nesta etapa.

A segunda etapa, que corresponde à *análise de inventário,* envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de um sistema de produto, considerando todo seu ciclo de vida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001), como mostra a metodologia da Figura 3. As ferramentas

de coleta de dados devem ponderar a qualidade dos dados levantados, com foco na precisão e confiabilidade dos mesmos.

Figura 3: Diagrama de fluxo do inventário de ciclo de vida. Fonte: Adaptado de Feijoo e Moreira (2020).



Fonte: próprio autor.

Na *avaliação de impacto*, ocorre a integração dos resultados; ou seja, é nessa etapa que se compreende e se avalia os impactos potenciais de um sistema de produto. Essa integração ocorre a partir dos dados levantados no inventário. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009) estabelece os três principais tópicos dessa etapa, sendo eles:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;

- Correlação dos resultados do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) às categorias de impacto selecionadas (classificação) e,
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

A *interpretação* corresponde à etapa de análise dos resultados do inventário e da avaliação de impacto, a fim de verificar se as combinações são consistentes com o objetivo e escopo da ACV. Nesta etapa, deve ser realizada uma avaliação e análise de sensibilidade dos elementos de entrada e saída, e outros componentes metodológicos adotados ao longo da ACV (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Essa fase permite que conclusões sejam feitas para formação de recomendações e metas futuras.

3.3.2 Ferramentas da ACV

SimaPro® é um *software* de ACV que coleta, analisa e monitora dados de desenvolvimento sustentável de produtos e serviços e é empregado em aplicações como pegada de carbono e pegada hídrica, desenho de produto, geração de declarações ambientais de produtos e definição de indicadores chave de desempenho.[9]

Considerado uma das melhores ferramentas de ACV, o SimaPro® se destaca pela possibilidade de realizar a análise por diversos métodos, permitindo criar inúmeros cenários para um determinado processo e comparar seus resultados.

O Eco-Indicator 99, por exemplo, é um dos métodos mais utilizados no SimaPro®. É um método desenvolvido por holandeses que se baseia em *endpoints*.

[9] https://network.simapro.com/acvbrasil/

Ele cria eco indicadores que facilitam a modelagem do processo (CAMPOS, 2012), atribuindo pontos/pesos a cada impacto identificado, permitindo comparar quantitativamente o malefício de cada impacto para o meio ambiente.

O SimaPro® é o software de ACV mais utilizado no mundo todo, abrangendo usuários e entidades em mais de 80 países, entre eles: universidades, indústrias e empresas, além de seguir as recomendações da ISO 14040/2001.

3.3.3 Categorias de impacto

A definição de categorias de impacto é um importante estágio da ACV e é realizada durante a terceira etapa da ACV (avaliação de impacto). Para que as categorias de impacto sejam estudadas, é necessário a avaliação e seleção de modelos de caracterização visando aquele que melhor se adequada às particularidades de cada categoria.

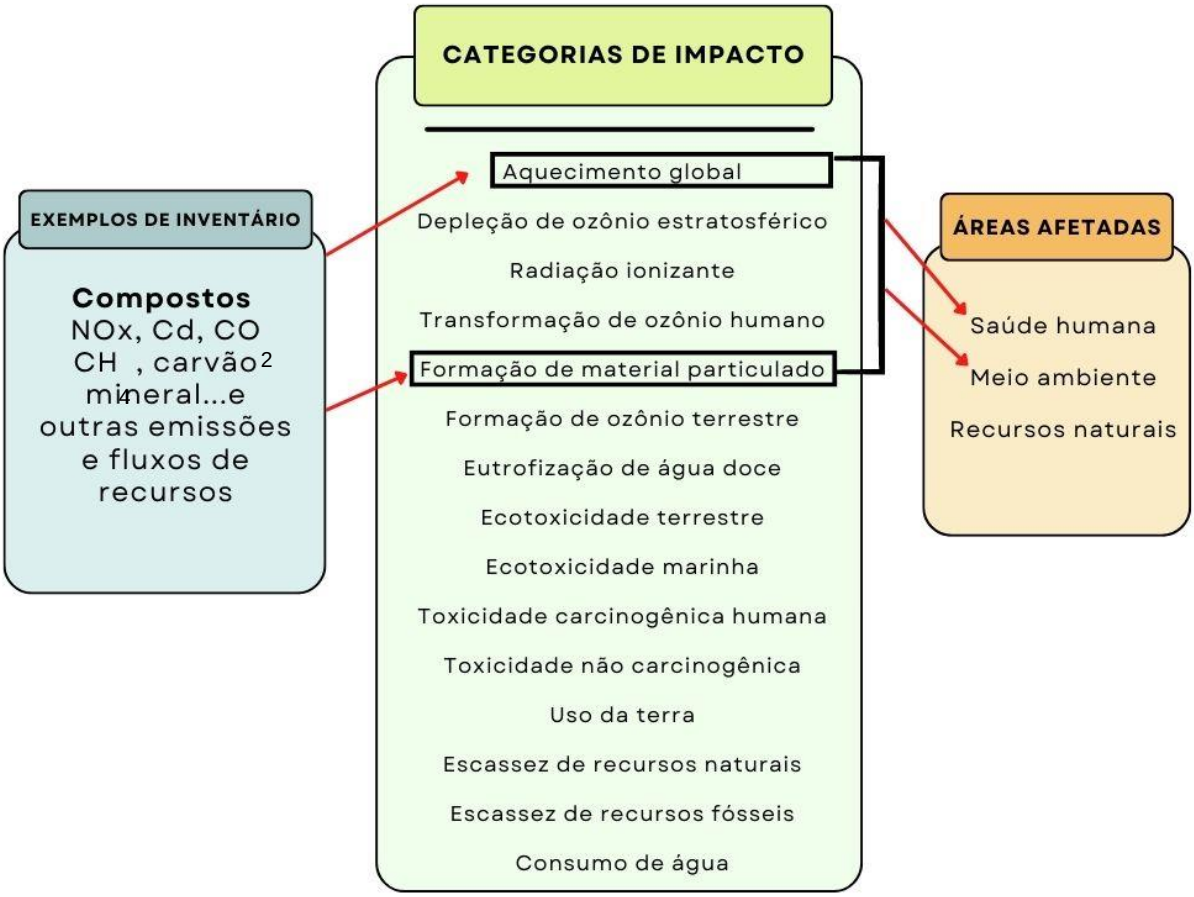
Os modelos são selecionados considerando critérios como causa-efeito, espaço geográfico, escala temporal, fluxos elementares, clareza de variáveis entre outros. Em um documento de recomendações de modelos de caracterização para ACV no Brasil, a Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) (2019) dividiu esses critérios em 3 categorias: abrangência do escopo de aplicação, robustez científica, e fatores de caracterização nacionais/regionalização.

O método ReCiPe 2016, por exemplo, é um dos mais utilizados pela comunidade acadêmica e dispõe de 18 categorias de impacto e 3 causadores de danos (National Institute for Public Health and the Environment, 2016). A escolha do método depende do momento em que o avaliador quer quantificar as cargas ambientais na ACV, seja durante o processo, seja ao final do processo.

Cada categoria de impacto, tem o objetivo de analisar um problema ambiental intermediário ou indireto para os alvos (*midpoint*). Essas categorias podem estar relacionadas à três áreas afetadas, classificadas em: saúde humana, meio ambiente e recursos naturais, ponderando o efeito final nos ecossistemas e no ser humano (*endpoint*).

Na Figura 4 são mencionadas as 18 categorias de impacto e a classificação das áreas afetadas, com um exemplo relacionando dados de um inventário com as suas respectivas categorias envolvidas.

Figura 4. Categorias de impacto, áreas afetadas e exemplo de relação.



Fonte: Adaptado de Feijoo e Moreira (2020).

Os *endpoints* saúde humana, meio ambiente e recursos naturais, correspondem aos danos à saúde do ser humano, aos danos à qualidade do meio ambiente e aos danos à disponibilidade de recursos, respectivamente (National Institute for Public Health and the Environment, 2016).

Em um estudo de ACV, as categorias de impacto devem ser definidas de acordo com as recomendações das normas, considerando sempre os objetivos e os sistemas estudados.

3.3.4 ACV e tecnologias de mitigação de CO_2

O surgimento de novas tecnologias de captura, armazenamento e utilização de CO_2 deriva da problemática do aquecimento global, ocasionado pela presença massiva de gases como CO_2, CH_4, N_2O, O_3, halocarbonos e vapor d'água na atmosfera. Para que se possa mensurar a viabilidade econômica, social e ambiental, são necessárias metodologias capazes de quantificar e analisar as tecnologias de redução de GEE.

Handler et al., (2015) utilizaram a ACV para quantificar as emissões de GEE do processo de conversão de gás de uma siderúrgica em etanol e, através dos dados de emissões de GEE do processo, concluíram que a conversão emite 60% menos GEE quanto ao processo convencional de obtenção de combustíveis.

No âmbito do armazenamento e captura de CO_2 Hepburn et al., (2019) observaram através da ACV, que tecnologias como as que utilizam o CO_2 como matéria-prima para obtenção de policarbonatos, tem maior potencial de redução do gás do que nas remoções líquidas da atmosfera (estratégia CCS), isto é, tal observação valida a estratégia de CCU incorporada às indústrias.

Yadav et al, (2020) estudaram e compararam ciclos de vida da produção de microalgas a partir de CO_2 de gases de combustão de lagoas de adutoras e, por se tratar de uma estratégia nova de captura de CO_2, dados a nível industrial são imprescindíveis para a realização da ACV, principalmente quanto às questões geográficas.

Atualmente, muitos estudos de ACV estão voltados a identificar se realmente as tecnologias de captura de CO_2 tem colaborado com as estratégias de reduções das mudanças climáticas. Um artigo da Peoplow (2022) destaca alguns fatores limitantes que aumentam essa desconfiança, como custo e as emissões de GEE dos próprios processos de reciclagem do CO_2.

Souza et al., (2012) estudaram a eficiência de um projeto de captura de CO_2 oriundo de uma usina termoelétrica no Rio de Janeiro e sua utilização para produção de microalgas e bicarbonato de sódio. Uma comparação através de ACV foi feita entre o processo com e sem reciclagem de amônia incorporada ao CO_2 para produção de bicarbonato de sódio, resultando em eficiência satisfatória para os dois cenários, com destaque para o processo com reciclagem.

Entretanto, quando se trata de projetos que aplicam a estratégia CCU*,* a ACV se faz necessária por considerar essencialmente fatores ambientais, sejam eles negativos ou positivos. A ACV como ferramenta da EI e da EC, permite a proposição de cenários com maior precisão, quantifica a carga ambiental de sistemas e produtos, identifica possíveis melhorias no desempenho ambiental de sistemas e produtos e auxilia na tomada de decisões de setores interessados (BALDASSARRE et al., 2019).

4 METODOLOGIA

Neste estudo será avaliado o impacto ambiental potencial de um processo combinado de captura de CO_2 de fontes energéticas e produção de compósito - a partir da adição de lignina Kraft -, processo este desenvolvido pelo projeto Agricarbono[10]. As fontes de CO_2 consideradas são:

- *Termoelétrica*, responsável por significativa parcela de emissão global de CO_2 na atmosfera e;
- *Usina de etanol*, geradora de CO_2 de alta pureza e de especial interesse econômico no Brasil.

A avaliação dos impactos potenciais da síntese envolvida será idealizada pela estratégia de ACV, realizada através de *software* SimaPro®.

Para melhor compreensão da ACV, especialmente da análise de inventário, este tópico foi divido em duas etapas: síntese para obtenção do compósito $CaCO_3$/lignina kraft e a avaliação de ciclo de vida, propriamente dita, que discorrerão sobre os detalhes da execução da síntese e das etapas da ACV, respectivamente.

[10] https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32066230/pesquisa-vai-usar-gas-carbonico-como-materia-prima-de-agroquimicos-de-liberacao-controlada

4.1 Síntese para obtenção do compósito nanocarbonato de cálcio/lignina kraft

A síntese do compósito carbonato de cálcio ($CaCO_3$) precipitado/lignina Kraft a partir do borbulhamento de CO_2 em solução de cloreto de cálcio ($CaCl_2$), objetivando a obtenção de dispensador inorgânico-orgânico para liberação lenta de semioquímico, foi realizada em biorreator (Eppendorf) com vaso encamisado com capacidade de 5 L ou 10 L, a depender do volume de solução inicial utilizada. A agitação inicial foi de 300 rpm para solubilização do cloreto de cálcio ($CaCl_2$) (Neon) e homogeneização da solução $CaCO_3$/lignina Kraft e de 1000 rpm quando do início do borbulhamento do CO_2 de alta pureza (White Martins).

Foi preparado, inicialmente, 1 L de solução aquosa a 0,1 mol/L de $CaCl_2$ (a partir daqui chamada de “solução I”); 250 mL de solução aquosa a 2,5 mol/L de hidróxido de amônio (NH_4OH) (Sigma Aldrich), a partir de 84 mL de solução de NH_4OH 29% (m/v) (a partir daqui chamada de solução II), e 500 mL de solução 7,2 % (m/v) de lignina Kraft dissolvida em solução aquosa de hidróxido de amônio 29% (m/v), a partir daqui chamada de “solução base”. As soluções I e II (chamadas a partir daqui de solução III) foram homogeneizadas e aquecidas à temperatura de 53,5^{o}C e, até atingir esta temperatura, mantidas sob agitação com velocidade de 300 rpm (Eppendorf). Após cerca de 30 min, iniciou-se o procedimento, ressaltando-se que a temperatura pode estar próxima ao valor requerido; mas, não necessariamente nele. Fez-se a leitura do valor de pH é igual a 9,98 (mistura), aumentando-se a velocidade de agitação para 1000 rpm e iniciou-se o borbulhamento de CO_2 com fluxo de 1 L/min. Nesse momento, também, iniciou-se a adição da “solução base” (solução de hidróxido de amônio a 2,5 mol/L). Ressalta-se que a adição da solução base foi feita de modo automático

sempre que o valor de pH se apresentava abaixo de 8, isto porque, o valor de pH ideal para o meio reacional e obtenção do compósito $CaCO_3$/lignina Kraft deve ser mantido o mais próximo de 8 possível. O registro do pH foi feito a cada 15 min. Após 30 min da reação, o fluxo do gás CO_2 foi reduzido para 0,5 L/min, uma vez que houve formação de espuma.

Decorridos 120 min após o início do borbulhamento do CO_2, o fluxo deste gás foi interrompido, assim como a adição da solução base (pH 7,97). A suspensão $CaCO_3$/lignina Kraft resultante foi deixada em repouso por 180 min e velocidade de agitação de 500 rpm, enquanto ocorria o resfriamento da mesma até temperatura ambiente (aproximadamente 25 ^oC). O pH registrado ao final do resfriamento foi de 8,07.

O material sintetizado foi centrifugado a 4700 rpm por 15 min em centrífuga de solo de alta velocidade (modelo RC 6 Plus, Thermo Fisher Scientific). Após a centrifugação observou-se a formação de duas fases sólidas distintas no interior dos frascos utilizados, uma de cor mais escura e consistência gelatinosa e outra de cor mais clara, ao fundo.

O sobrenadante da centrifugação foi descartado em recipiente próprio para destinação como rejeito químico conforme determinação da Embrapa Agroenergia. O compósito de $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft, mais escuro e em forma gelatinosa, foi disposto sobre papel filtro em placas de Petri e levado para secar em estufa de renovação e circulação de ar (modelo MA035, Marconi) à temperatura de 70 ^oC pelo período de aproximadamente 15 h (*over night*). Ressalta-se que, inicialmente, utilizou-se estufa a vácuo, entretanto, o líquido evaporado do material condensou de modo a inviabilizar a utilização desse tipo de secagem.

Resquícios do compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft, de cor mais clara e em forma pastosa, foram retidos nos frascos da centrífuga e estes foram, então, recuperados e lavados com acetona e filtrados a vácuo. O material sólido, que fica disposto no papel de filtro, foi levado para secar na estufa de renovação e circulação de ar. O líquido da filtração foi também disposto em recipiente apropriado para descarte como rejeito químico.

A caracterização para confirmação da obtenção do compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft foi realizada por difração de raios X, a fim de se confirmar a fase cristalina carbonato de cálcio presente no compósito; por microscopia eletrônica de varredura, a fim de se observar a morfologia e calcular o tamanho das partículas formadas; por adsorção multimolecular pelo método Brunauer-Emmet-Teller (BET) com o intuito de se verificar a porosidade e área superficial, uma vez que estas características têm direta influencia no potencial de uso do compósito como dispensador de semioquímicos; e, análise termogravimétrica para avaliação da decomposição termal do material, uma vez que seu uso na agricultura implica em estar susceptível a mudanças climáticas.

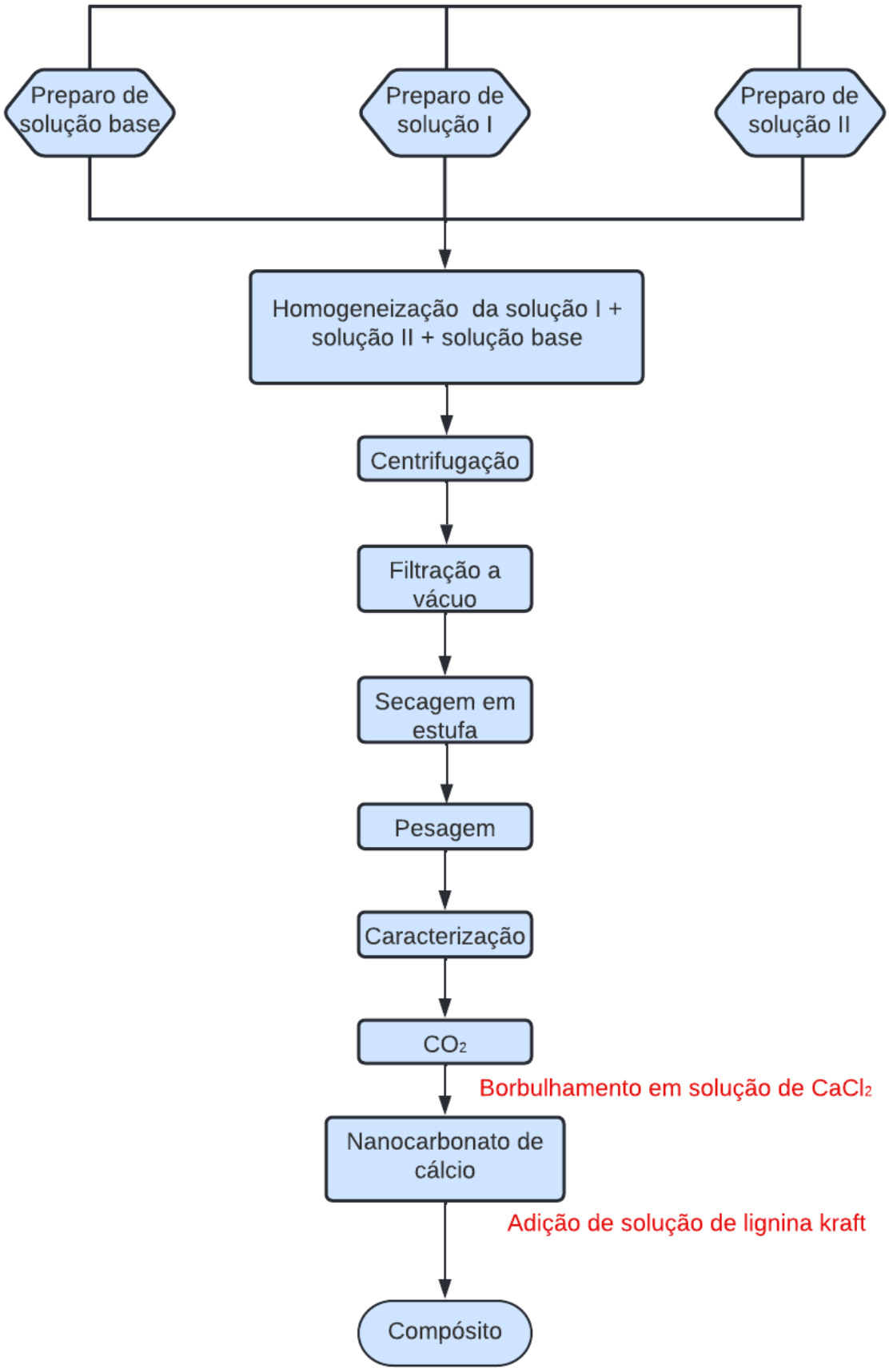
A análise por DRX foi realizada no Laboratório Difratometria de raios X, do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IGD/UnB). O difratômetro utilizado foi da Rigaku Última IV, radiação CuKα (λ = 1,54059Å), 35 kV e 15 mA, com varredura de 20º a 70º 2θ, passo 0,01º e velocidade de 1º/min. Para a identificação das fases cristalinas foi utilizado o *software* Match! 3.8.1.143. As imagens de microscopia foram obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura SIGMA HV, e o tamanho das partículas foi medido utilizando-se o *software* Image J, o qual é um programa de domínio público destinado a processamento de imagens que foi desenvolvido pelo National Institutes of Health (EUA). As análises de TG/DTG foram feitas em

Equipamento SDT Q600 – TA Instruments. As amostras foram submetidas à uma rampa de aquecimento de 25 ^{o}C a 1000 ^{o}C à taxa de 10 ^{o}C/min e fluxo de N2 de 50 mL/min. A análise por BET foi realizada em equipamento Quantachrome Nova 1200e. As amostras foram, inicialmente, submetidas a um processo de degasagem à temperatura de 150 ^{o}C durante 3 h, sob vácuo dinâmico. Em seguida, as amostras foram submetidas à adsorção de N_2 em uma faixa de P/P_0 de 0 a 0,99.

A fim de se verificar a eficácia do compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft para uso como dispensador, foram realizados, também, ensaios de taxa de liberação semioquímica em laboratório, por extração, com hexano, do material volatilizado, por 30 dias a cada 24 h até o 15^{o} dia, e após estes, a cada 5 dias, e análise por cromatografia gasosa. Assim como, bioensaio comportamental por olfatometria de dupla escolha e ensaio em campo de soja.

A Figura 5 mostra o fluxograma das etapas da síntese descritas acima.

Figura 5. Fluxograma da síntese de para obtenção do compósito $CaCO_3$/lignina Kraft.



Fonte: próprio autor.

4.2 Avaliação de Ciclo de Vida da síntese

A avaliação de ciclo de vida da síntese obedeceu a série de normas ISO 14044 (2009), sobre Gestão Ambiental e que aborda os requisitos e orientação para execução de ACV.

A ACV foi realizada no *software* SimaPro® versão 9.2.0.1, com os dados da base *Ecoinvent* versão 3.7.1, *allocation, cut-off by classification-unit* (alocação, corte por unidade de classificação).

4.2.1 Objetivo e escopo

4.2.1.1 Sistema de produto, as funções do sistema de produto, a unidade funcional; a fronteira do sistema

O objetivo desta ACV é avaliar as cargas ambientais da síntese de obtenção do compósito à base de nanocarbonato e lignina Kraft realizada pelo projeto Agricarbono. Vale ressaltar que o processo em questão obteve rendimento de 93% m/m (Embrapa, 2020), superior ao processo industrial de obtenção de $CaCO_3$ (52 a 56% m/m) (DIAS, 2009), utilizando este último como referência técnica. Os valores de rendimento do compósito podem estar relacionados a fatores como controle laboratorial, ou seja, devido a escala de execução corresponder a um sistema fechado e ao uso de CO_2 sintético, devido a sua pureza.

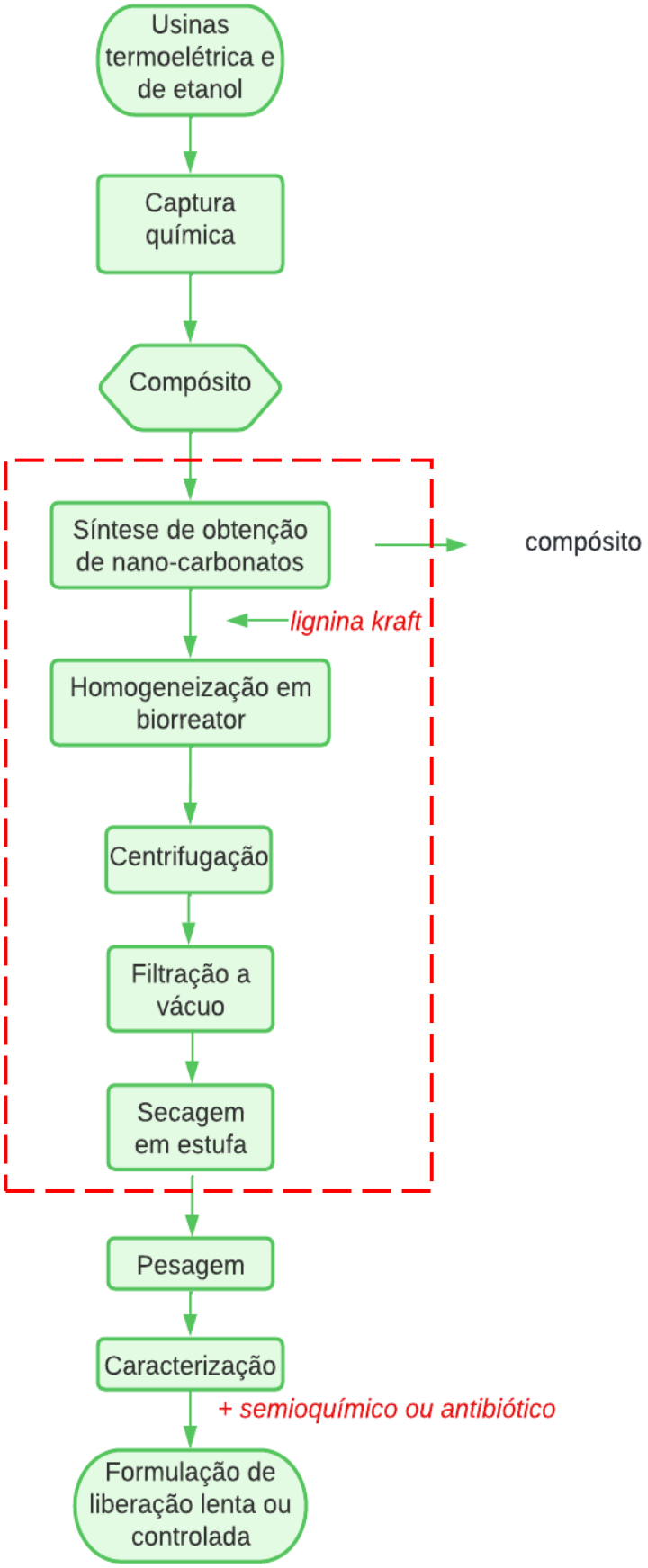
Por ser uma tecnologia em desenvolvimento e classificada em TRL – 4, a função desse estudo foi explanar os impactos potenciais da síntese realizada em escala laboratorial, visando sua aplicação em escala piloto.

O projeto Agricarbono é composto pelas etapas laboratorial e piloto, porém, somente as informações da etapa laboratorial é que foram alcançadas. Pretende-se aplicar os resultados obtidos nesta ACV à futura etapa piloto do projeto, para auxílio em futuros cenários e decisões.

A função desse sistema é substituir produtos convencionais de liberação de agroquímicos de origem petroquímica.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009) o sistema de produto corresponde ao *"conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto*". Diante disso, a Figura 6 expõe o sistema de produto considerado neste estudo e a fronteira do sistema (em destaque).

Figura 6. Sistema de produto e limite de fronteira em destaque.



Fonte: próprio autor.

A fronteira do sistema foi definida considerando os fluxos elementares envolvidos na síntese de obtenção de nanocarbonatos, pois o foco do estudo foi avaliar a etapa laboratorial do projeto.

A unidade funcional desse sistema de produto foi definida em gramas e corresponde à quantidade de compósito $CaCO_3$/lignina Kraft capaz de ser obtido na síntese proposta, que equivale à 101,854g.

4.2.1.2 Suposições e limitações

Por se tratar de uma tecnologia em TRL-4, ou seja, desenvolvida em escala laboratorial, os dados podem ser diferentes para o caso de escalonamento e posterior aplicação em escala industrial. Não foram feitas outras análises de impactos de ciclo de vida (AICV) para etapas como as de captura de CO_2 e de caracterização do sistema de produto supracitado.

Na base de dados Ecoinvent não foram encontrados fluxos para lignina Kraft. Para a formulação de fluxos da lignina Kraft, foi realizado levantamento de literatura e considerado o inventário proposto por (Bernier et. al, 2013).

4.2.1.3 Requisitos de qualidade de dados

Os requisitos de qualidade de dados podem ser divididos segundo o critério de corte, área geográfica, incerteza da informação e limitações tecnológicas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

O critério de corte foi definido considerando-se a escala da síntese. Todos os componentes da síntese foram considerados, em suas respectivas quantidades, de modo a garantir a maior precisão possível dos produtos envolvidos.

Quanto à área geográfica, para dados de consumo de eletricidade foram adotados valores a partir da matriz energética nacional, de consumo hídrico a nível de bacia hidrográfica e para os dados dos demais produtos foram adotados valores a nível internacional.

A incerteza das informações recai, principalmente, no nível de maturidade tecnológica da síntese. É indispensável uma nova AICV após realização do escalonamento dos dados de síntese. Dados de consumo hídrico foram estimados, pois a etapa de recuperação do compósito não garante precisão quanto à quantidade de água utilizada.

As limitações tecnológicas correspondem ao nível de maturidade tecnológica da síntese e, portanto, estão ausentes os dados de escalonamento.

Outras considerações, referem-se ao fato de que a alocação foi evitada nesta ACV especialmente por este ser um processo de produto único. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009) diz que convém que a alocação seja evitada sempre que possível quando a: *“divisão dos processos elementares a serem alocados em dois ou mais subprocessos e coleta dos dados de entrada e saída estejam relacionados a esses subprocessos”*. Por se tratar de um sistema de produto de um único produto que depende das entradas e saídas, a alocação foi evitada nesta ACV.

4.2.2 Análise de inventário

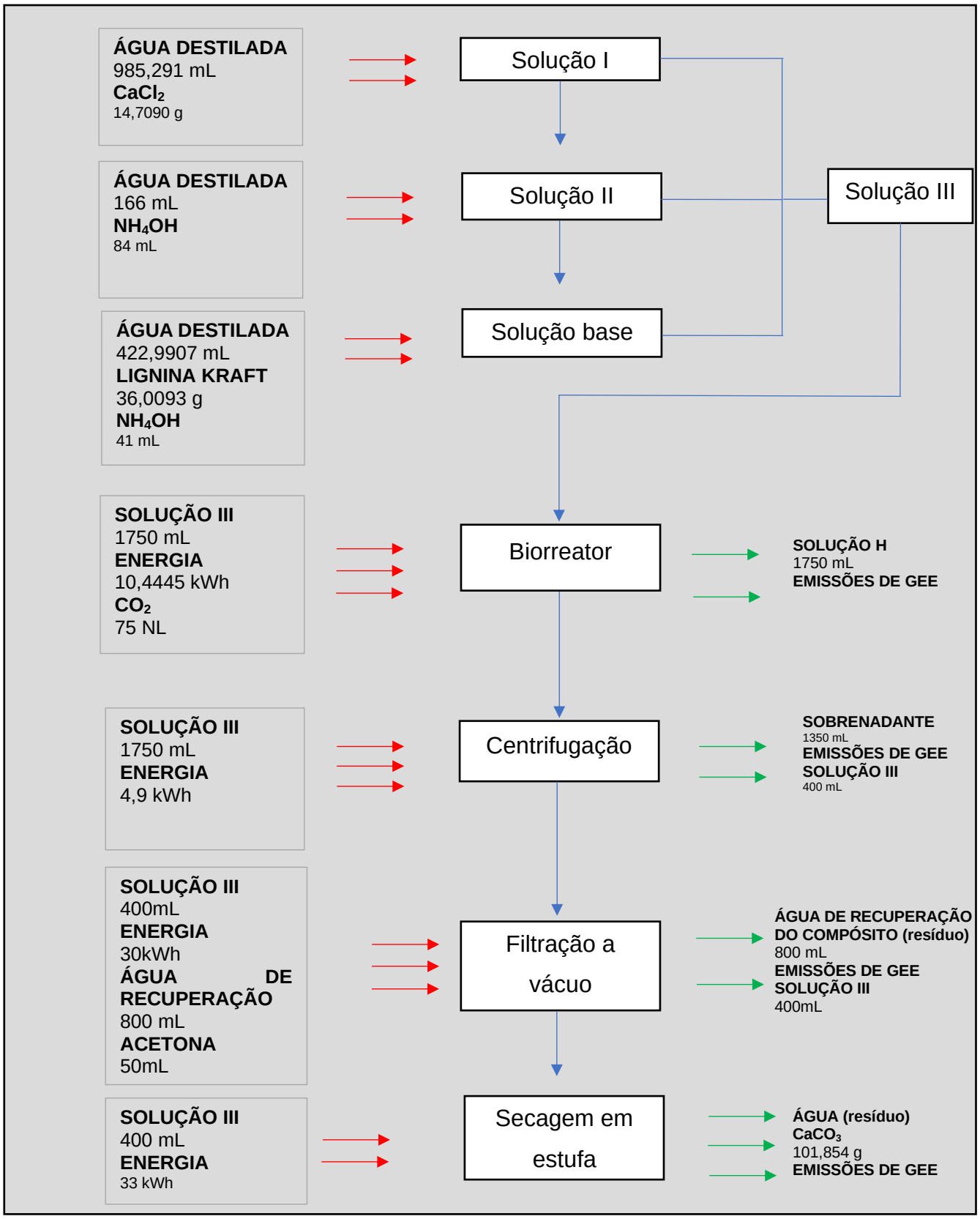
Esta etapa envolveu a coleta, a validação e a correlação dos dados de inventário com a unidade funciona. Foram realizadas revalidação dos dados visando o refinamento da fronteira do sistema.

Os dados foram coletados através de questionários (ANEXO 1) e entrevistas diretamente com o desenvolvedor da síntese. Os dados coletados foram de caráter quantitativo.

A validação dos dados se deu por balanço de massa (Figura 7) e foram correlacionados com a unidade funcional. Ressalta-se que as emissões das etapas de biorreator, de centrifugação, de filtração e de secagem foram atribuídas à utilização de energia elétrica.

Neste trabalho, a cobertura tecnológica trata de desenvolvimento atual e, portanto, os valores de uso da água e sobrenadante foram majoritariamente estimados. Considerando a ausência de informações sobre densidade e quantidade de material particulado na água residuária, a quantidade e a composição do compósito no sobrenadante foram estimadas a partir da criação de um inventário no *software*.

Figura 7. Fluxograma da obtenção do compósito nanocabonato/lignina Kraft.



Fonte: próprio autor.

Os dados do inventário da síntese de obtenção do compósito $CaCO_3$/lignina Kraft e suas respectivas qualidades, são apresentados na Tabela 3. Todos os dados do inventário foram definidos através de testes e otimizados a fim de garantir o rendimento de obtenção do compósito (item 4.2.1.1).

Tabela 3. Inventário da síntese de obtenção do compósito nanocarbonato de cálcio/lignina Kraft.

Reagentes e produtos	Unidade	QUANTIDADE	QUALIDADE
Entradas			
Cloreto de cálcio dihidratado ($CaCl_2.H_2O$)	g	14,709	Verificado
Lignina Kraft	g	36,0093	Verificado
Hidróxido de amônio 29% (NH_4OH)	mL	125	Verificado
Água destilada	mL	1574,2817	Estimado
Acetona	ml	50	Estimado
Dióxido de carbono (CO_2)	NL	75	Verificado
Água destilada (recuperação do compósito)	mL	800	Estimado
Eletricidade	kWh	78,35	Estimado
Saídas			
Compósito	g	101,854	Verificado
Sobrenadante (água + resíduos)	mL	1350	Estimado
Água de recuperação do compósito	mL	800	Estimado

A Tabela 4 apresenta a correlação entre os dados do inventário da síntese e os dados das bases de dados correspondentes a estes produtos.

Tabela 4. Correlação dos materiais utilizados na síntese do compósito nanocarbonato de cálcio/lignina Kraft e base de dados do SimaPro® versão 9.0.2

Reagentes e outros	Terminologia na base de dados
Entradas	
Cloreto de cálcio dihidratado ($CaCl_2.H_2O$)	*Calcium chloride {RoW}| market for calcium chloride | Cut-off, U*
Hidróxido de amônio 29% (m/v) (NH_4OH)	*Ammonia, anhydrous, liquid {RoW}| market for ammonia, anhydrous, liquid | Cut-off, U;* *Water, ultrapure {RoW}| market for water, ultrapure | Cut-off, U*
Água destilada	*Water, deionised {RoW}| market for water, deionised | Cut-off, U*
Acetona	*Acetone, liquid {RoW}| market for acetone, liquid | Cut-off, U*
Dióxido de carbono (CO_2)	*Carbon dioxide, in chemical industry {GLO}| market for carbon dioxide, in chemical industry | Cut-off, U*
Energia	*Electricity, medium voltage {BR-South-eastern grid}| market for electricity, medium voltage | Cut-off, U*
Lignina Kraft	*Lignina Kraft para projeto compósito $CaCl_2$**

*Inventário realizado conforme Bernier et. al, (2013).

O insumo lignina Kraft utilizado na síntese avaliada nesta ACV, é de origem industrial (Suzano Celulose e Papel) e de recente formulação, portanto o projeto Agricarbono não pôde obter informações sobre o ciclo de vida da lignina Kraft por serem confidenciais até a coleta de dados realizada. Além disso, não foram encontrados processos para a lignina Kraft na base de dados Ecoinvent. A busca por processos para este insumo foi realizada nas demais bases de dados presentes no *software* em questão; entretanto, se mostraram ausentes. Para inserir o processo de produção da lignina Kraft na ACV da síntese de obtenção do compósito, foi realizada uma busca na literatura – que resultou em poucas informações para ACV de processos de obtenção de lignina Kraft – e adotado um inventário do processo *lignoboost* para obtenção de lignina Kraft (BERNIER et. al, 2013).

Foram também modelados os dados de cenário de resíduos para a síntese, que corresponde aos dados de saída do sobrenadante, em volume de 1350 mL, estimada por meio de balanço de massa, conforme Figura 7.

4.2.3 Avaliação de impacto ambiental

As categorias de impacto foram definidas conforme literatura abrangente no âmbito de tecnologias de captura de CO_2, especialmente por se tratar de uma síntese de compósito integrada à captura química de CO_2, sendo as mais relevantes: mudanças climáticas, acidificação terrestre, ecotoxicidade de água doce, depleção fóssil, eutrofização de água doce, depleção de ozônio e toxicidade humana.

O modelo de análise adotado nesta ACV foi o ReCipe Midpoint (H) versão 1.13/World Recipe (2010) H, por este associar as emissões e suas quantificações a indicadores de impacto ambientais específicos, a partir de categorias de impactos, sendo consideradas aquelas citadas acima.

Quanto à AICV, a etapa de caracterização (obrigatória) foi considerada para identificar as substâncias de maior impacto para cada categoria e para quantificar as cargas ambientais globais; a etapa opcional normalização foi realizada para melhor visualização das cargas ambientais globais (Figura 9).

Para geração de dados, foi considerado um ponto de corte (*cutt-off)* de 1%, ressaltando que as substâncias restantes não ultrapassaram 5% de contribuição de impacto.

4.2.4 Interpretação

Seguindo as considerações da ISO 14044/2009, foram identificadas nesta etapa as questões significativas, os dados das etapas antecedentes foram revisados através de análise de sensibilidade, foram formuladas as conclusões, as limitações e as recomendações a partir dos resultados da avaliação de impacto ambiental.

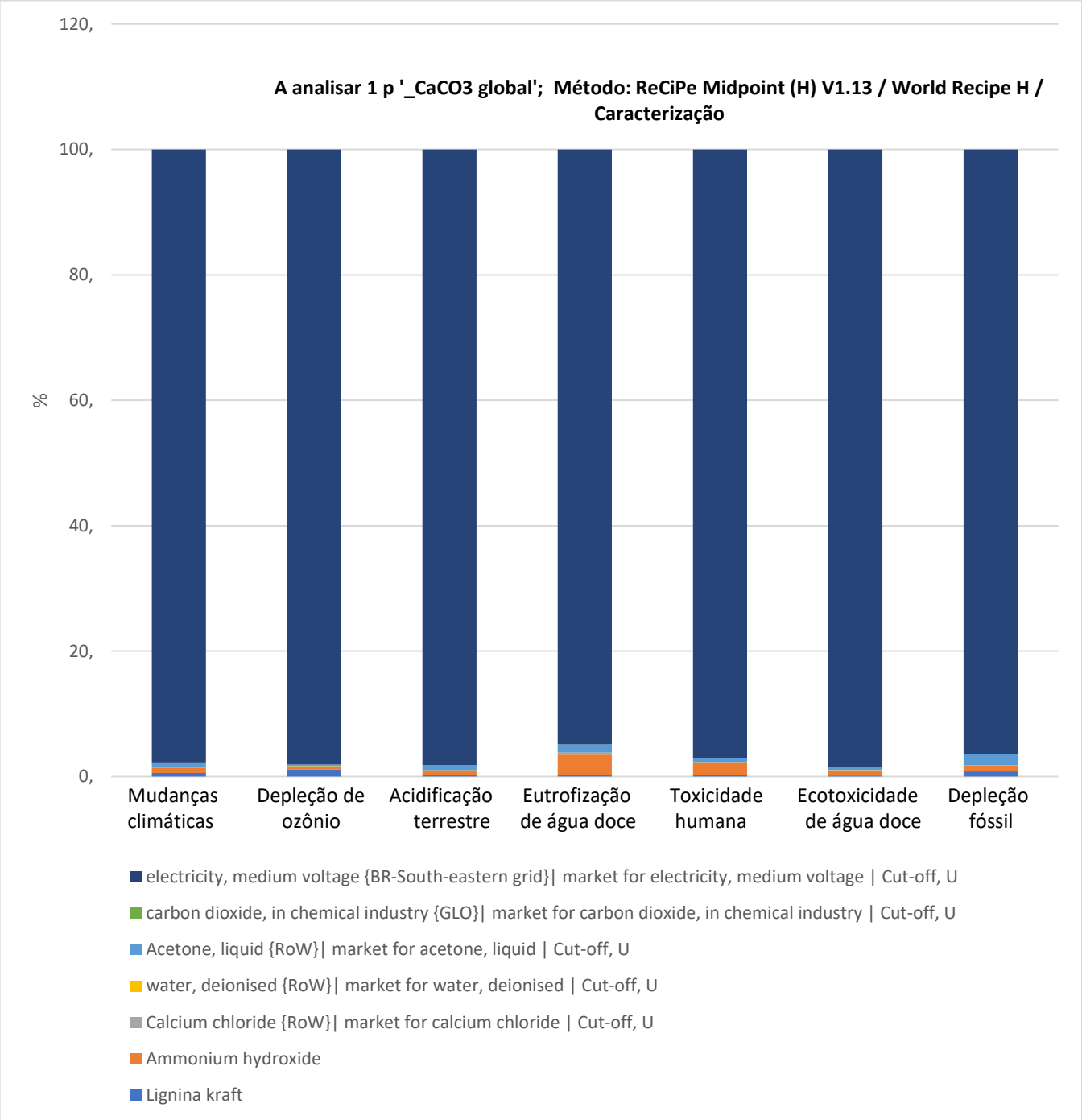
A revisão dos dados foi realizada através de revalidação dos dados do ANEXO 1 e por conseguinte, revisão de consistência e sensibilidade. A partir disso, todas as limitações e recomendações resultantes desta ACV, foram oriundas da parceria com os representantes do projeto Agricarbono.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação de impacto ambiental

A partir das categorias de impactos ambientais selecionadas conforme descrito na Metodologia, a Figura 8 apresenta o gráfico dos resultados das cargas ambientais da síntese de obtenção do compósito nanocarbonato de cálcio/lignina Kraft para cada uma das 7 categorias de impacto ambiental elencadas, conforme caracterização do método ReCipe Midpoint (H) versão 1.13/World Recipe (2010) H. Em evidência, as áreas em cor azul claro correspondem ao insumo energia elétrica.

Figura 8. Gráfico da contribuição de cada insumo da síntese para cada categoria de impacto ambiental estudada.

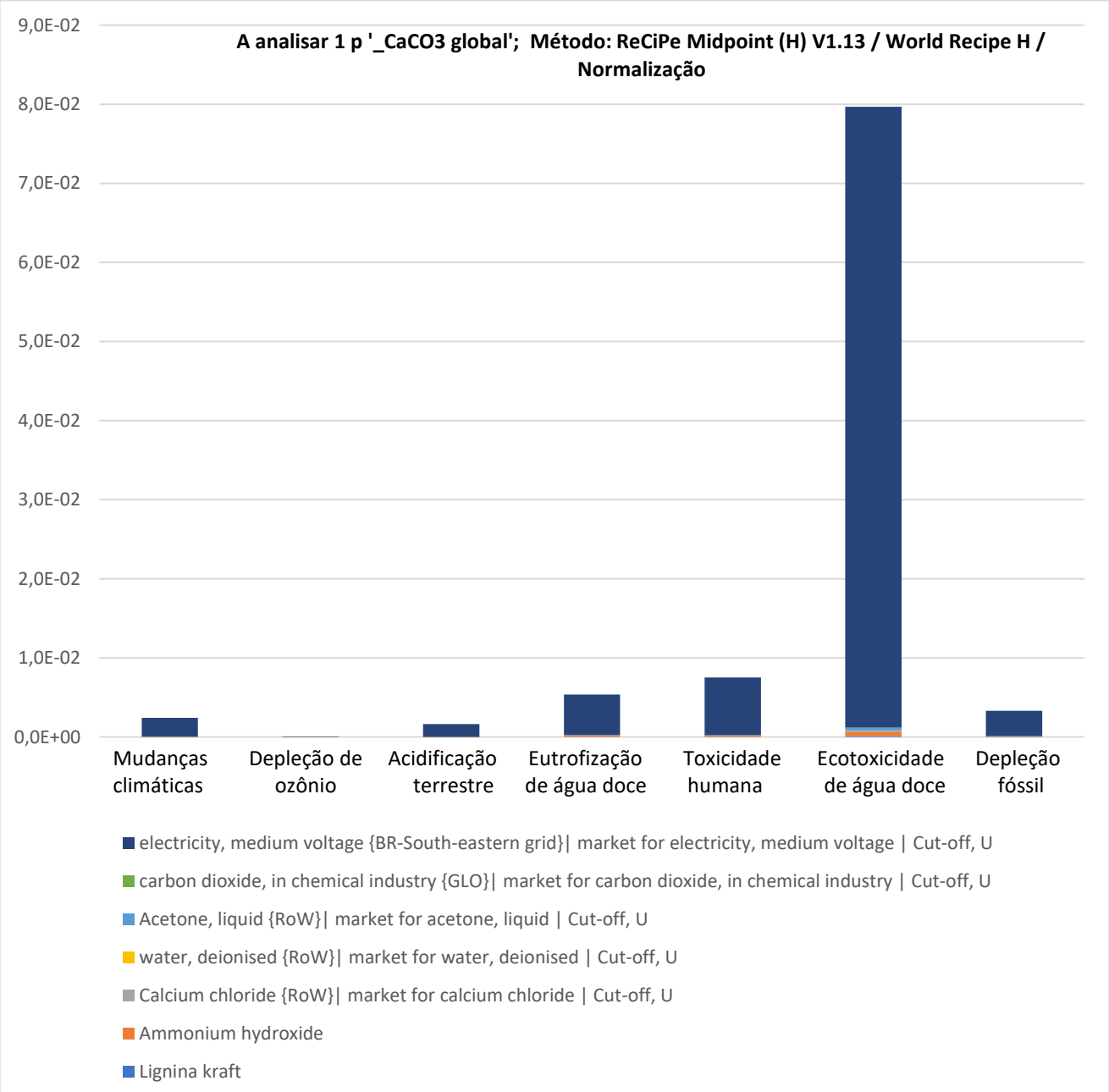


Fonte: próprio autor.

A Figura 9 apresenta o gráfico dos resultados das cargas ambientais da síntese de obtenção do compósito nanocarbonato de cálcio/lignina Kraft para cada uma das 7 categorias de impacto ambiental elencadas, conforme normalização de dados,

permitindo identificar a categoria ecotoxicidade de água doce como a categoria com maiores cargas ambientais. Esses resultados podem estar relacionado a composição do compósito obtido em síntese.

Figura 9. Gráfico da contribuição de cada insumo da síntese para cada categoria de impacto ambiental estudada.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 5 mostra os valores extraídos do gráfico da Figura 8 da contribuição de carga ambiental, em porcentagem de cada insumo, para cada uma das 7 categorias de impacto ambiental elencadas.

Tabela 5. Carga ambiental percentual de impacto dos insumos envolvidos na síntese de obtenção do compósito nanocarbonato de cálcio/lignina Kraft para cada categoria de impacto ambiental.

Categorias de impacto ambiental	Cloreto de cálcio	Água	Hidróxido de amônio	Acetona	Energia elétrica	Lignina Kraft	Total
MC	0,00262	0,00651	0,708	0,738	97,9	0,568	100%
DO	0,0388	0,0564	0,277	0,249	98,2	1,15	100%
AT	0,163	0,011	0,437	0,779	98,2	0,0266	100%
EAD	0,311	0,0294	2,06	1,34	96	0,308	100%
EA	0,201	0,0207	0,715	0,437	98,5	0,147	100%
DF	0,465	3,3	2,9	1,82	90,9	0,603	100%
TH	0,0558	0,00741	0,769	1,75	96,6	0,842	100%

*MC = Mudanças climáticas, DO = Depleção do ozônio, AT = Acidificação terrestre, EAD = Eutrofização de água doce, EA= ecotoxicidade de água doce, DF= depleção fóssil e TH = toxicidade humana.

As cargas ambientais para o insumo CO_2 foram baixas ou nenhuma.

Ao analisar os processos envolvidos no ciclo de vida da obtenção do compósito, evidencia-se ainda mais a energia elétrica e/ou processos elementares de geração de energia como principais contribuintes para as cargas ambientais da síntese. A Tabela 6 mostra os processos elementares com maior carga ambiental para cada uma das categorias de impacto ambiental abordadas.

Tabela 6. Relação entre as categorias de impacto ambiental com seus respectivos processos de maior contribuição quanto à carga ambiental.

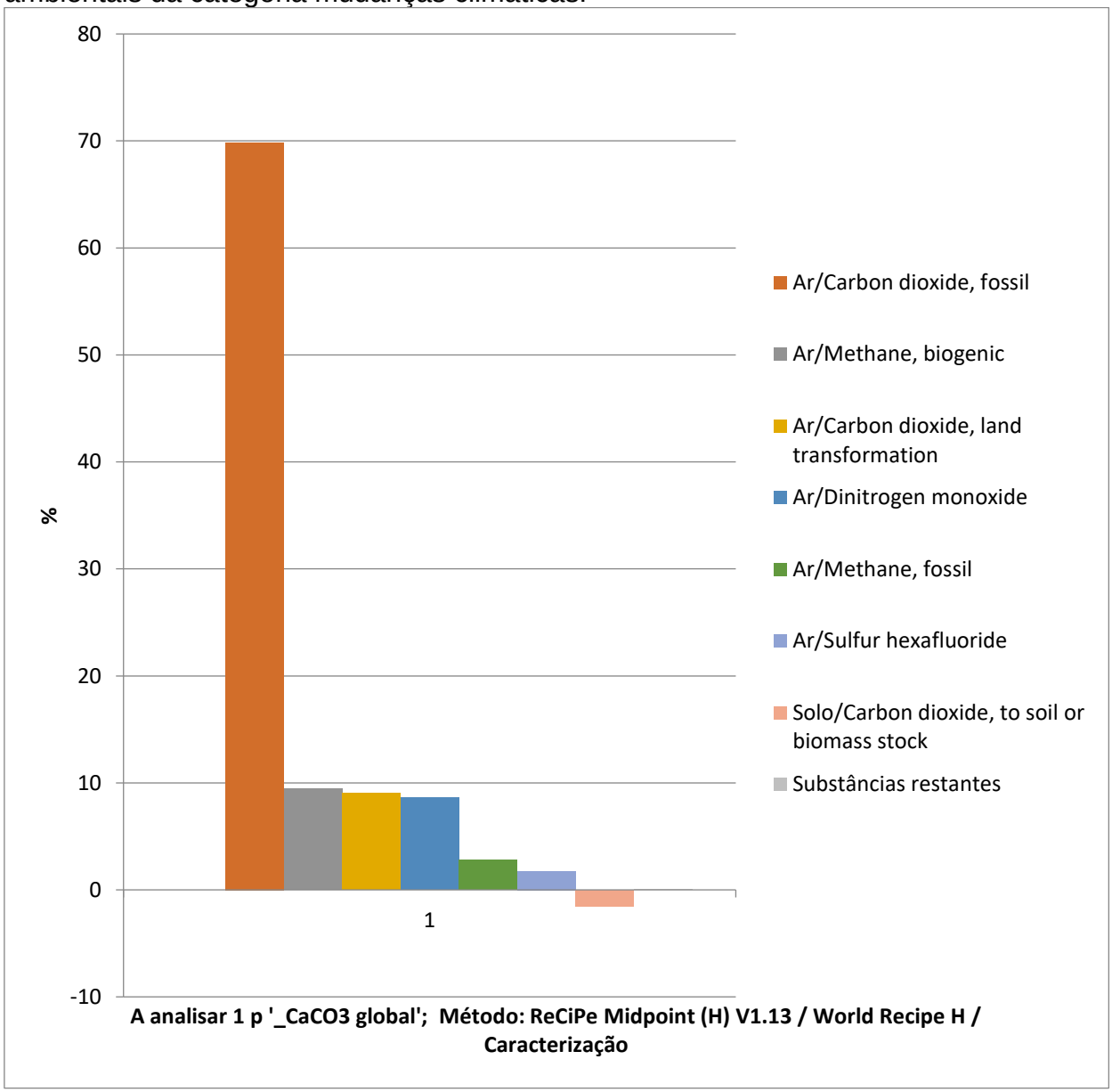
Categoria de impacto ambiental*	**Processo de maior contribuição para essa categoria analisado no *software* SimaPro®**
MC	*Electricity, high voltage {BR-South-eastern grid}| electricity production, natural gas, combined cycle Power plant| Cut-off, U*
DO	*Natural gas, high pressure {RoW} petroleum and gas production, on-shore | Cut-off, U*
AT	*Electricity, high voltage {BR-North-eastern gride}| electricity production, hard coal | Cut-off, U*
EAD	*Spoil from Hard coal mining {GLO} | treatment of, in surface landfill | Cut-off, U*
EA	*Scrap copper {Europe without Switzerland}| treatment of scrap copper, municipal incineration | Cut-off, U*
DF	*Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production | Cut-off, U*
TH	*Spoil from Hard coal mining {GLO} | treatment of, in surface landfill | Cut-off, U*

*MC = Mudanças climáticas, DO = Depleção do ozônio, AT = Acidificação terrestre, EAD = Eutrofização de água doce, EA= ecotoxicidade de água doce, DF= depleção fóssil e TH = toxicidade humana.

A fim de avaliar o inventário envolvido na síntese, os gráficos a seguir mostram as substâncias com maior contribuição para as cargas ambientais oriundas dos insumos.

A Figura 10 apresenta o gráfico de contribuição de substâncias obtido em ponto de corte de 1% para a categoria de impacto ambiental de mudanças climáticas. Nesta categoria, todos os contribuintes são gases do efeito estufa, com destaque para o dióxido de carbono de origem fóssil com contribuição de 70%.

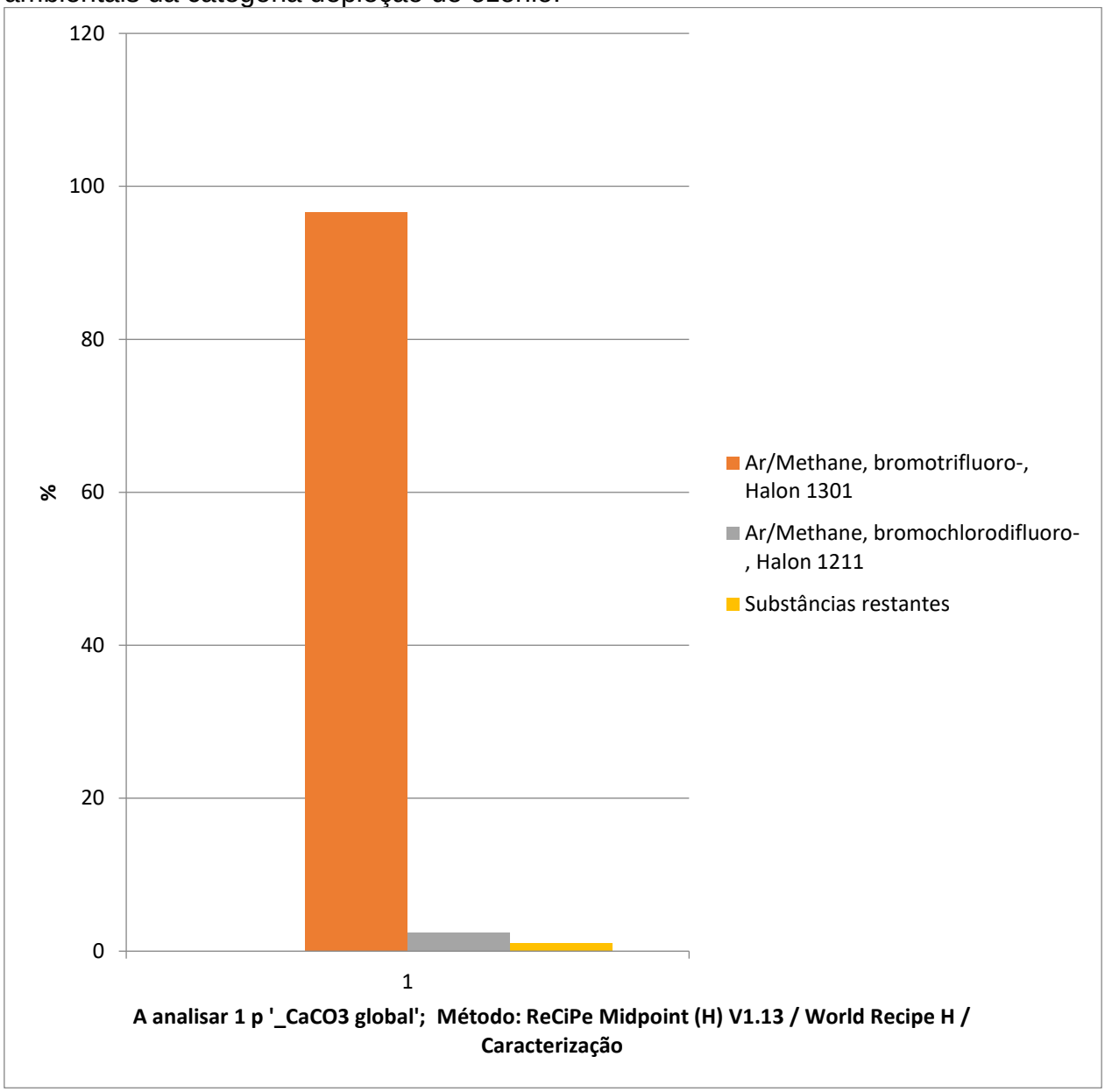
Figura 10. Contribuição das principais substâncias responsáveis pelas cargas ambientais da categoria mudanças climáticas.



Fonte: próprio autor.

A Figura 11 apresenta o gráfico de contribuição de substâncias obtido em ponto de corte de 1% para a categoria de impacto ambiental depleção de ozônio, evidenciando a substância do gás metano como principais contribuintes.

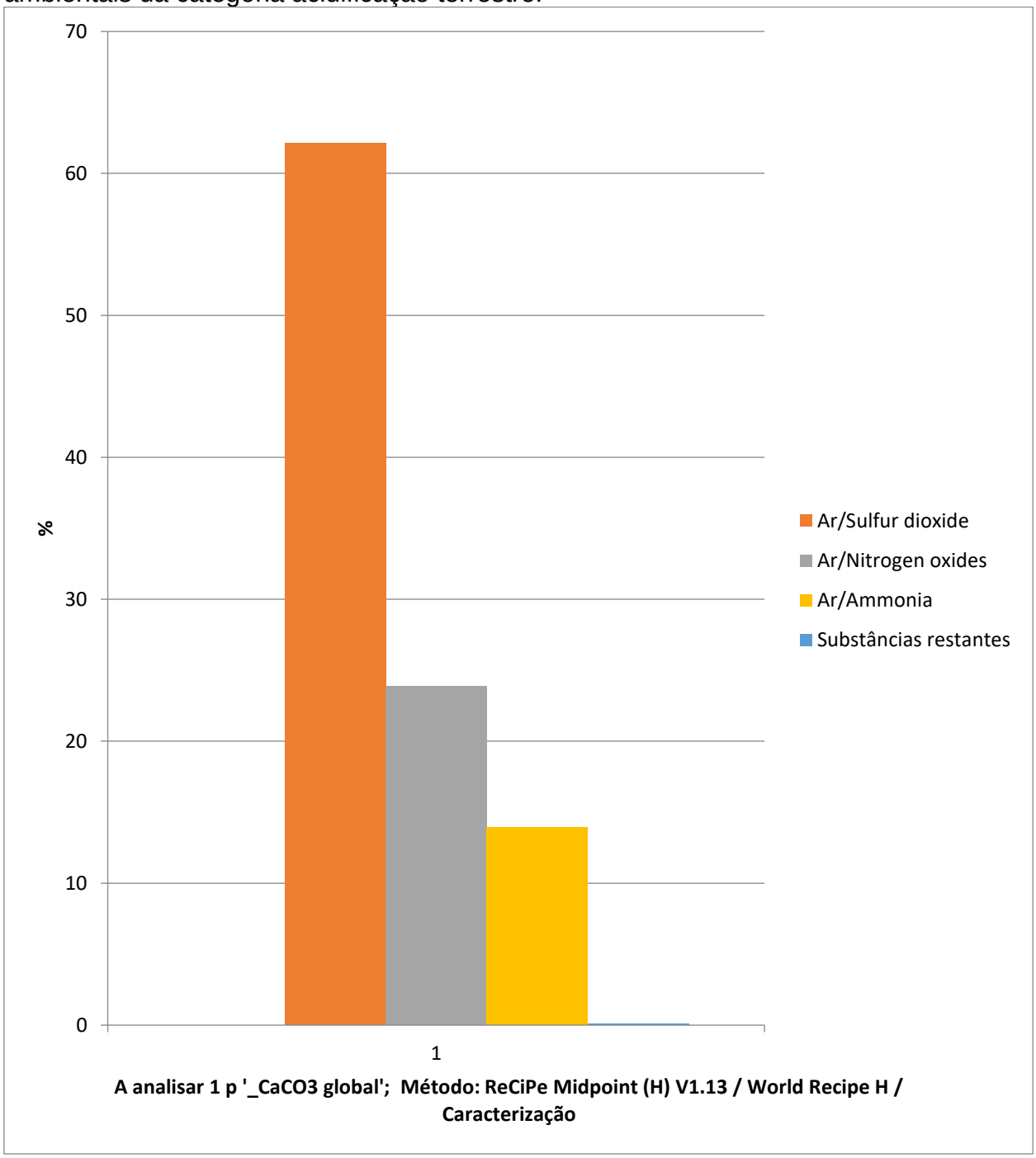
Figura 11. Contribuição das principais substâncias responsáveis pelas cargas ambientais da categoria depleção de ozônio.



Fonte: próprio autor.

A Figura 12 apresenta o gráfico de contribuição de substâncias obtido em ponto de corte de 1% para a categoria de impacto ambiental acidificação terrestre. As principais substâncias contribuintes do inventário para essa categoria foram dióxido de enxofre, oxido de nitrogênio e amônia.

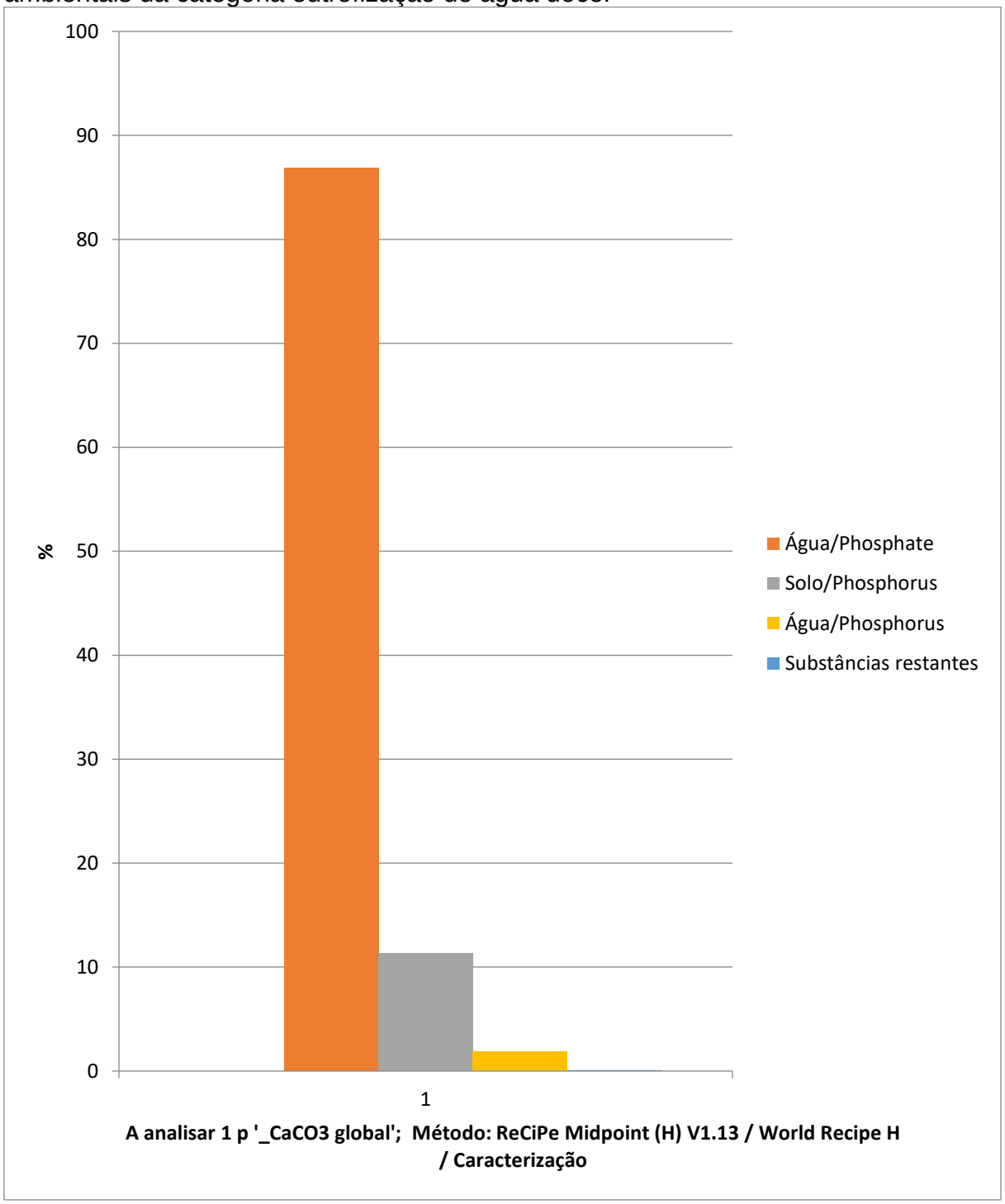
Figura 12. Contribuição das principais substâncias responsáveis pelas cargas ambientais da categoria acidificação terrestre.



Fonte: próprio autor.

A Figura 13 apresenta o gráfico de contribuição de substâncias obtido em ponto de corte de 1% para a categoria de impacto ambiental eutrofização de água doce. As substâncias fosfato e fósforos obtiveram maior contribuição nessa categoria.

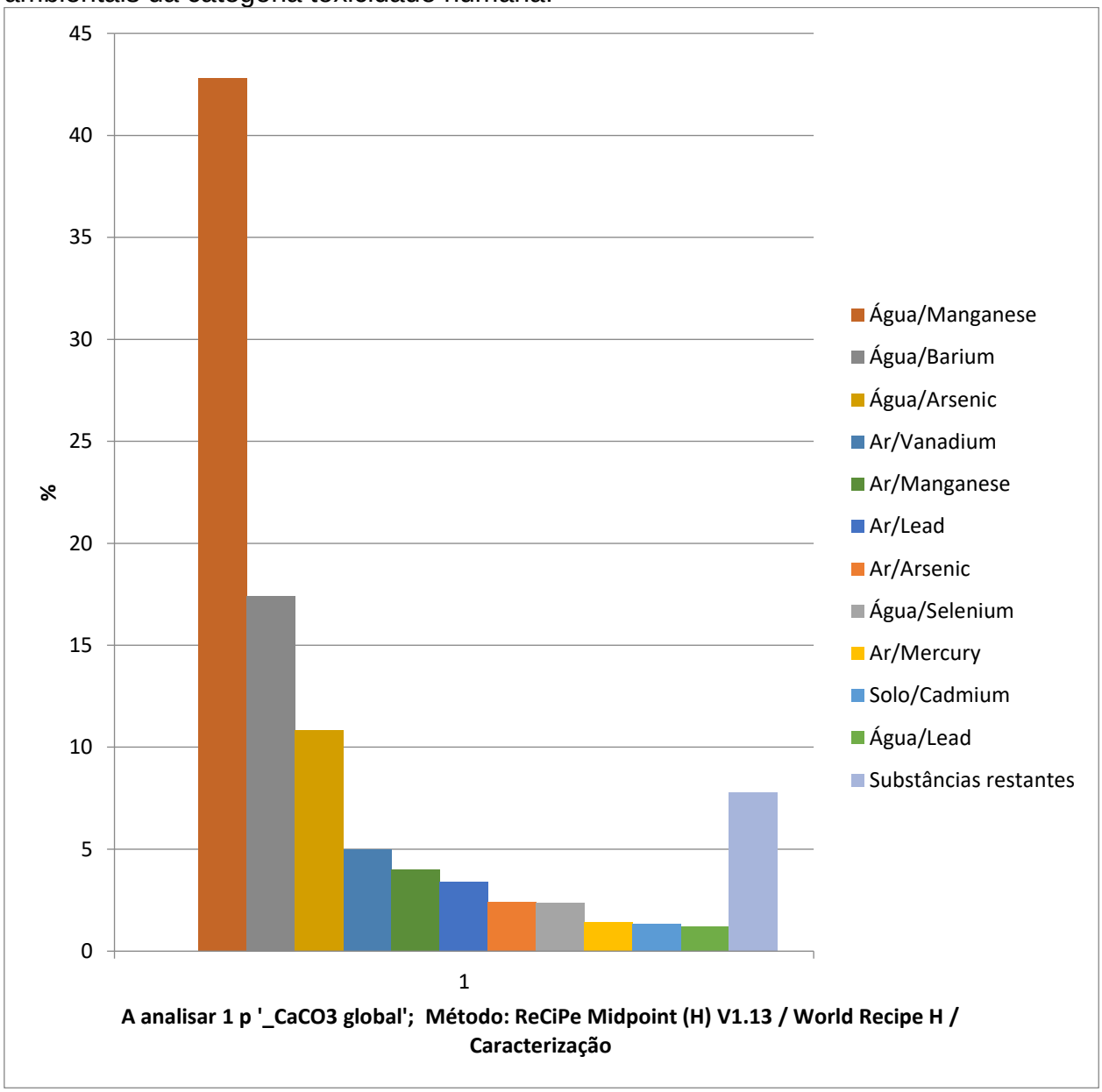
Figura 13. Contribuição das principais substâncias responsáveis pelas cargas ambientais da categoria eutrofização de água doce.



Fonte: próprio autor.

A Figura 14 apresenta o gráfico de contribuição de substâncias obtido em ponto de corte de 1% para a categoria de impacto ambiental toxicidade humana. Nesta categoria, as substâncias manganês e bário foram as maiores contribuintes.

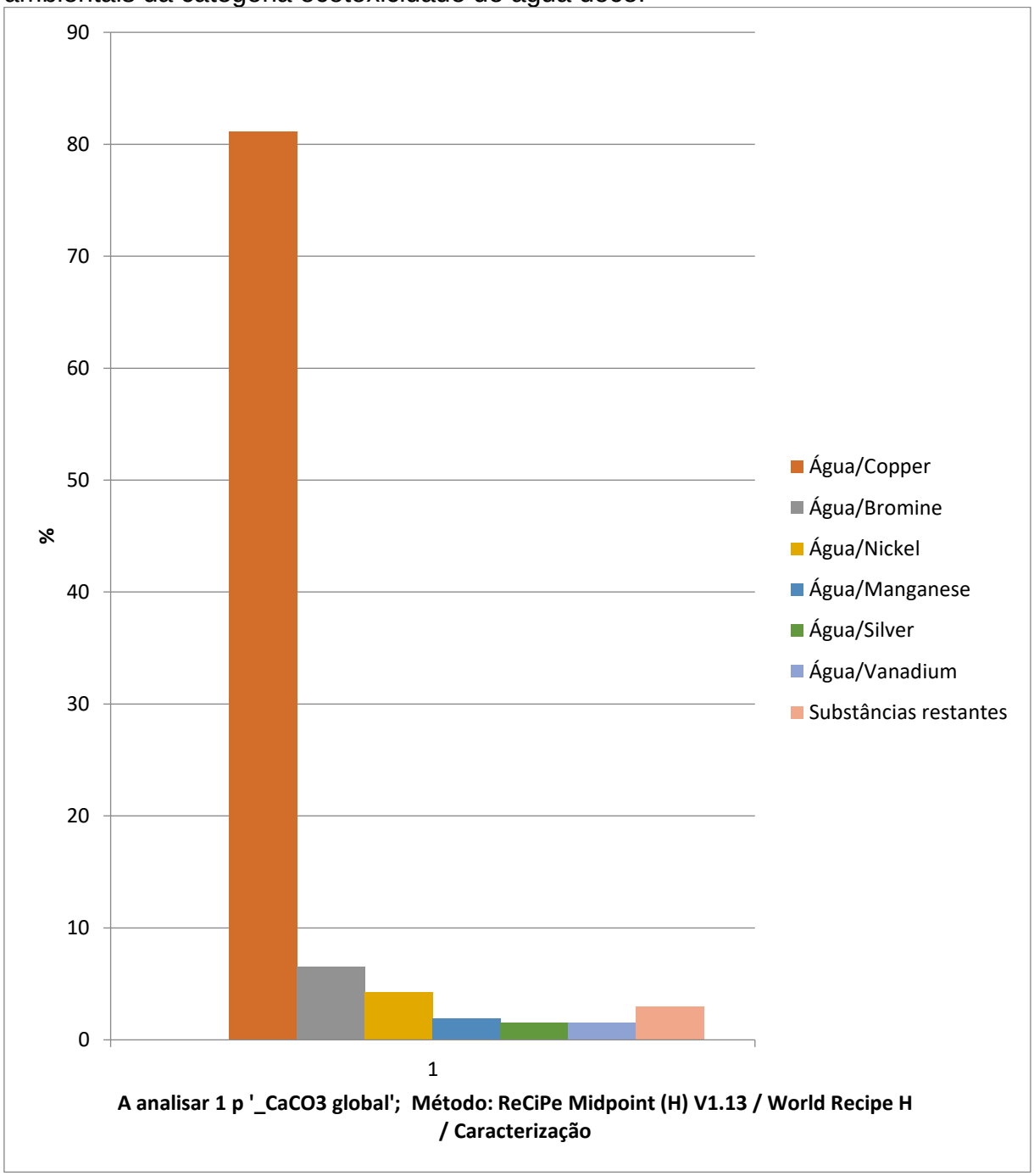
Figura 14. Contribuição das principais substâncias responsáveis pelas cargas ambientais da categoria toxicidade humana.



Fonte: próprio autor.

A Figura 15 apresenta o gráfico de contribuição de substâncias obtido em ponto de corte de 1% para a categoria de impacto ambiental ecotoxicidade de água doce. A substância de destaque desta categoria é cobre.

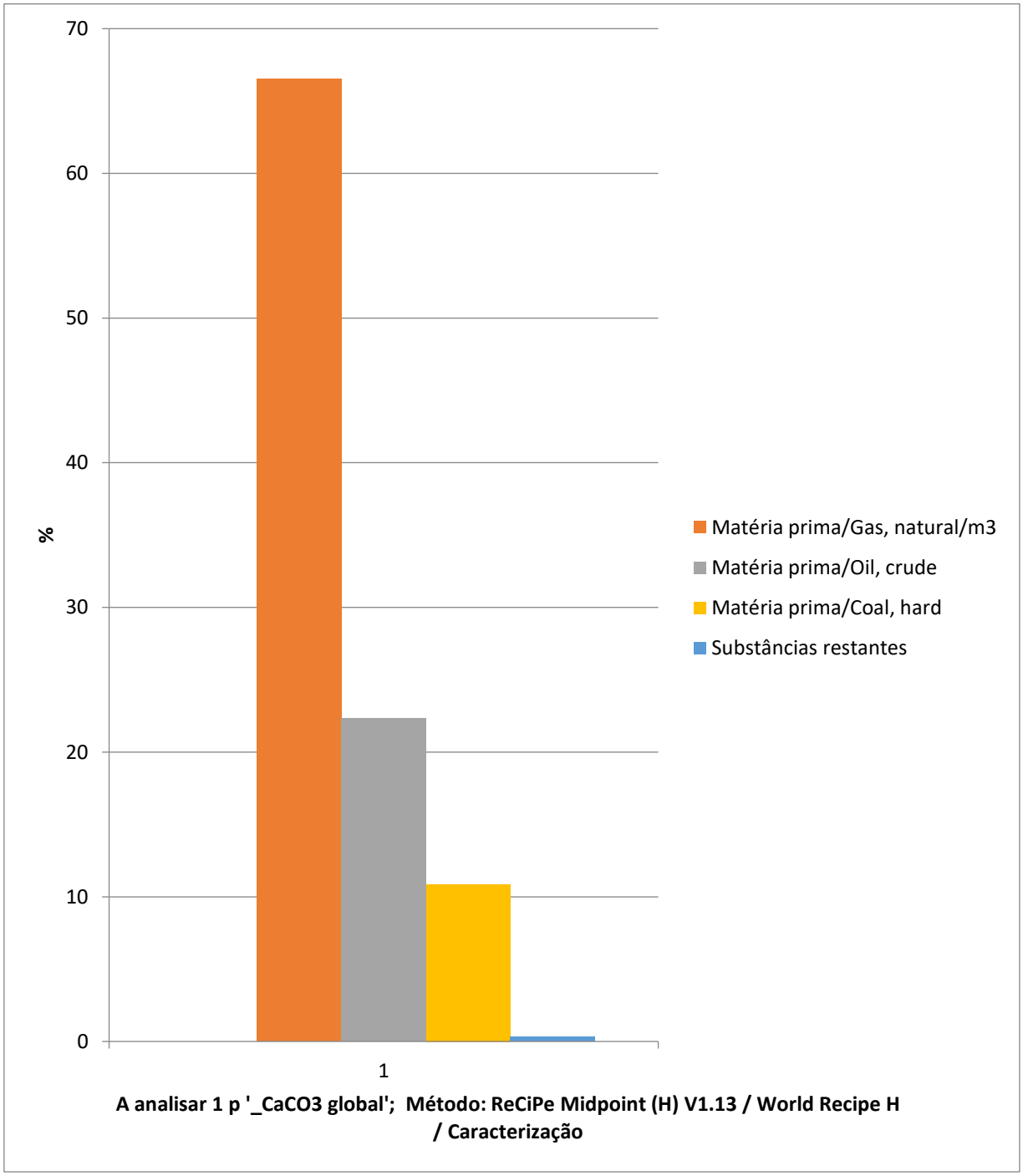
Figura 15. Contribuição das principais substâncias responsáveis pelas cargas ambientais da categoria ecotoxicidade de água doce.



Fonte: próprio autor.

A Figura 16 apresenta o gráfico de contribuição de substâncias obtido em ponto de corte de 1% para a categoria de impacto ambiental depleção fóssil. O gás natural, como matéria-prima, é o maior contribuinte dessa categoria com 66%.

Figura 16. Contribuição das principais substâncias responsáveis pelas cargas ambientais da categoria depleção fóssil.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 7 apresenta em resumo a substância de maior impacto para cada categoria de impacto ambiental aqui abordada em seus indicadores de categoria ambiental.

Tabela 7. Relação entre a substância de maior contribuição e sua categoria de impacto ambiental correspondente.

Categorias de impacto*	Substância	Indicador de categoria de impacto	Quantidade
MC	Dióxido de carbono fóssil	kg CO_2eq	11,7
DO	Metano	kg CFC-11eq	$9{,}93E^{-7}$
AT	Dióxido de enxofre	kg SO_2eq	0,039
EAD	Fosfato	kg Peq	0,00134
EA	Cobre	kg -1,4 DBeq	0,183
DF	Gás natural	kg oileq	2,82
TH	Manganês	kg -1,4 DBeq	1,04

*MC = Mudanças climáticas, DO = Depleção do ozônio, AT = Acidificação terrestre, EAD = Eutrofização de água doce, EA= ecotoxicidade de água doce, DF= depleção fóssil e TH = toxicidade humana.

5.2 Interpretação

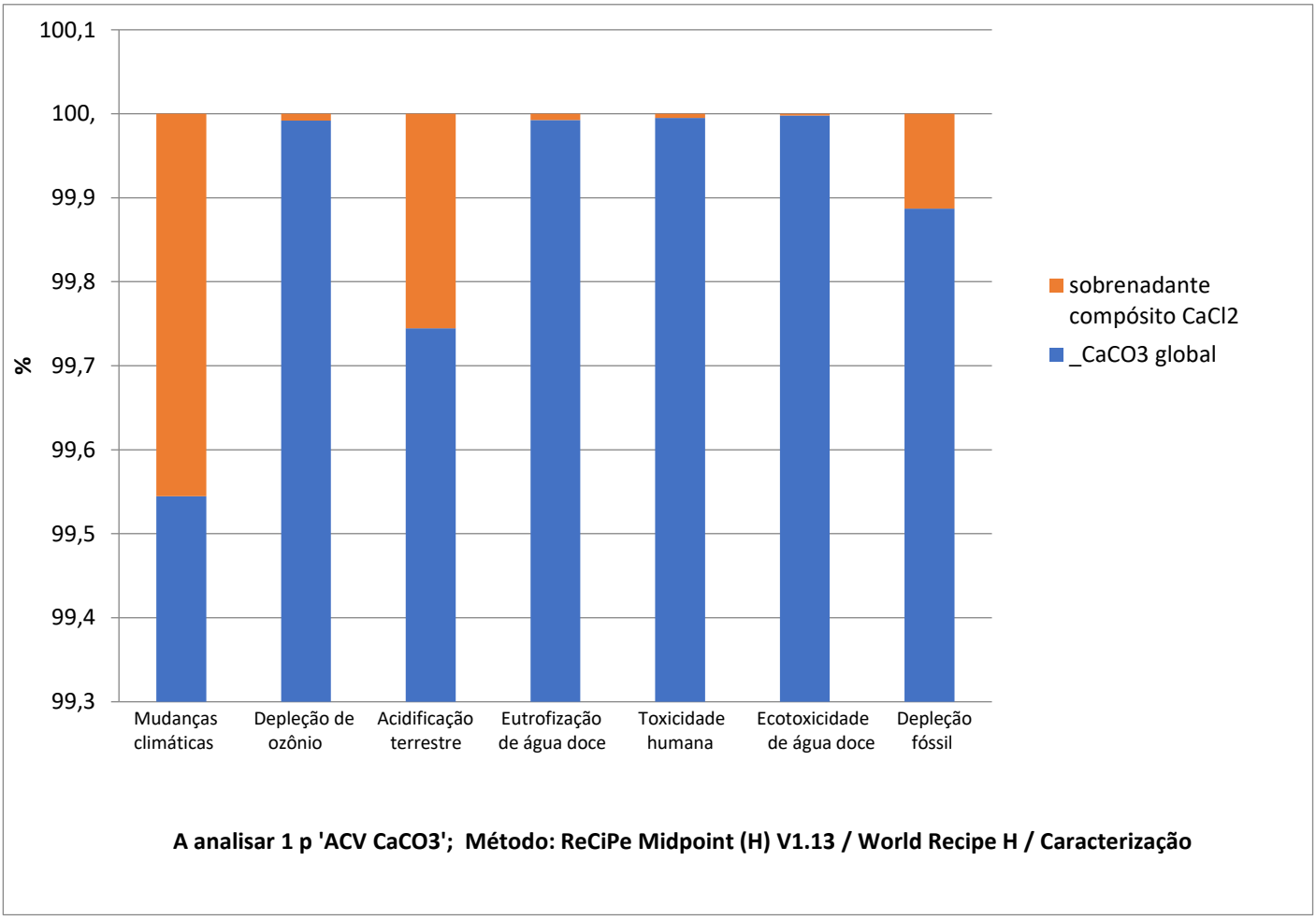
A partir do inventário do ciclo de vida (ICV) e da avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV), notou-se que os processos e substâncias de maior contribuição para as cargas ambientais estão relacionados às entradas e saídas à energia elétrica e seus processos envolvidos. Todos os impactos da geração de energia estão atrelados à matriz energética brasileira.

É necessário salientar que esta ACV foi realizada a fim de mensurar as cargas ambientais de um processo de síntese que visa integrar um processo de captura de CO_2 oriundo de usinas termoelétricas e de usinas de etanol, sendo ambas, fontes de significativas emissões de gases do efeito estufa, especialmente de CO_2.

A análise do sobrenadante, através do cenário de resíduos, apontou baixas cargas ambientais (valores em cor laranja), como mostra o gráfico da Figura 16, excetuando-se os valores para a categoria mudanças climáticas. Ressalta-se que a composição

do sobrenadante se trata de resquícios do compósito obtido em síntese e de grande parte de água destilada. As contribuições em azul referem-se ao processo global de obtenção do compósito e afirmam o processo de obtenção do compósito como o causador das maiores cargas ambientais quando comparado ao cenário de resíduos.

Figura 16. Contribuição em cargas ambientais e do cenário de resíduos (sobrenadante) da síntese de obtenção do compósito pela etapa de caracterização.



Fonte: próprio autor.

Todos os dados de inventário foram revisados e limitações referentes à qualidade deles foram levadas em consideração para a interpretação da ACV. Evidencia-se nesta ACV limitações como quantidade dos insumos para análise de inventário, ausência de dados de escalonamento e ausência de dados do processo de obtenção da lignina Kraft.

A fim de otimizar os dados desta ACV, recomenda-se: a realização de nova ACV com os dados escalonados (ausentes por questões de execução do projeto Agricarbono) para desenvolvimento de processo do tipo CCU em TRL – 6 ou além; nova ACV com dados do ciclo de vida da lignina Kraft utilizada na síntese de obtenção do compósito, que, no momento da coleta de dados não puderam ser divulgados pela Suzano.

O objetivo desta ACV – definido na primeira etapa – foi atendido a partir da mensuração de cargas ambientais do processo de obtenção do compósito nanocarbonato de cálcio/lignina Kraft, evidenciando a geração de energia elétrica e outros processos do setor energético como principais contribuintes para todas as categorias de impacto ambiental aqui consideradas.

6 CONCLUSÃO

Através da metodologia proposta neste estudo, foi possível mensurar as cargas ambientais envolvidas no processo de obtenção de compósito do tipo nanocarbonato de cálcio/lignina Kraft, visando a captura química de dióxido de carbono oriundo de fontes energéticas: termoelétrica e sucroalcoleira.

O principal objetivo da avaliação de ciclo de vida foi atendido e o principal resultado refere-se às altas cargas ambientais da geração de energia e outros processos semelhantes analisados a partir da análise de inventário, como queima de carvão mineral e outras fontes de origem fóssil, gás natural e água utilizada em processos industriais para geração de energia.

Foi identificada através da normalização de dados a categoria ecotoxicidade de água doce como a categoria detentora de maiores impactos ambientais.

Quanto às limitações, destaca-se a ausência de dados do processo de obtenção da lignina Kraft durante a coleta de dados e por conseguinte, a ausência de dados no *Ecoinvent*, base de dados utilizada nesta ACV. Para uma ACV, a qualidade dos dados é um dos itens mais requeridos para a confiabilidade dos resultados.

Vale ressaltar que esta ACV foi realizada para uma tecnologia em TRL – 4, ou seja, para tecnologia recentemente desenvolvida em escala laboratorial. Recomenda-se, então, novas ACV com os dados do processo de obtenção da lignina Kraft específica da síntese de obtenção do compósito e ACV em níveis de maturidade industrial.

Os resultados dessa ACV serão compartilhados com as partes interessadas, a fim de promover decisões mais precisas no desenvolvimento desta e de outras tecnologias de captura e uso de CO_2 como insumo.

REFERÊNCIAS

ABDOLAHI-MANSOORKHANI, H., SEDDIGHI, S. CO_2 capture by modified hollow fiber membrane contactor: Numerical study on membrane structure and membrane wettability. Fuel Processing Technology 209, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106530.

ANAND, N., DUIN, R., TAVASSZY, L. Carbon credits and urban freight consolidation: An experiment using agent based simulation. Research in Transportation Economics Available online 24 December 2019, 100797. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100797

ANTONY, A., RAMACHANDRAN, J.P., RAMAKRISHNAN, R. M., RAVEENDRAN, P. Sizing of paper with sucrose octaacetate using liquid and supercritical carbon dioxide as a green alternative médium. Journal of CO_2 Utilization 28, 2018, 306–312.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro 2009.

BALDASSARRE, B., SCHEPERS, M., BOCKEN, N., CUPPEN, E., KOREVAAR, G., CALABRETTA, G. Industrial Symbiosis: towards a design process for eco-industrial clusters by integrating Circular Economy and Industrial Ecology perspectives. Journal of Cleaner Production (2019). doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.091.

BERNIER, E., LAVIGNE, C., ROBIDOUX, P.Y. Life cycle assessment of kraft lignin for polymer applications. Int J Life Cycle Assess (2013) 18:520–528. Wood and other renewable resources. DOI 10.1007/s11367-012-0503-y.

BISINOTI, L. V.; SILVA, J. A.; SANTOS, J. B. O. Captura de dióxido de carbono utilizando óxidos a base de cálcio. XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. UFSCar – São Carlos – SP. 2017

BRUEL, A., KRONENBERG, J., TROUSSIER, N., GUILLAUME, B. A Theoretical and Empirical Foundation for the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology (2018).* DOI: 10.1111/jiec.12745.

BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJO, J. G. L., MIERZWA, J. C., BARROS, M.T.L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N., EIGER, S. Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável. São Paulo. Pearson Edcational Brasil, 2ª. Edição, 2007.

BRASIL BOLSA BALCÃO. Disponível em: <Crédito de Descarbonização (CBIO) | B3> . Acesso em 01 de fevereiro de 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>. Acesso em: 05 maio 2022.

CAMPOS, M. G. Abordagem de Ciclo de Vida na Avalição de impactos ambientais no processamento primário *offshore.* 127 f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

CARVALHO, P.G.C.A. Aplicação do Programa SimaPro na Avaliação do Impacto Ambiental causado na Produção e Exploração *Offshore* de Petróleo. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008. xiii, 64 p.; il.

DEVAKKI, B., THOMAS, S. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 28, No. 02, 2050017 (2020) Research Paper. Experimental Investigation on Absorption Performance of Nanofluids for CO_2 Capture. https://doi.org/10.1142/S2010132520500170.

DIAS, A. P. Produção de carbonato de cálcio no estado do Rio de Janeiro. Trabalho de conclusão de curso: bacharelado em geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. (2009).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Metodologia de Captura de CO_2 e de Posterior Obtenção de Suportes Mistos Carbonato-Lignina. Nota técnica. 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Pesquisa vai usar gás carbônico como matéria-prima de agroquímicos de liberação controlada (2019). Acesso em: 03 de março de 2022. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32066230/pesquisa-vai-usar-gas-carbonico-como-materia-prima-de-agroquimicos-de-liberacao-controlada>.

FALCI, P.A. Repesando Práticas em Educação Ambiental: Proposta de uma Sequência Didática. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2019, Viçosa, 48 p.

FEIJOO, G., MOREIRA, M.T. Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Grupo de Biotecnología Ambiental. Departamento de Ingeniería Química. Instituto de Investigación CRETUS. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (2020).

FREEMAN, B.C, BHOWN, A.S. Assessment of the technology readiness of post-combustion CO_2 capture Technologies. Energy Procedia 4 (2011) 1791–1796.

GHANBARALIZADEH, R., BOUHENDIK, H., KABIRIM, K., VAFAYAN, M. A novel method for toughening epoxy resin through CO_2 fixation reaction. Journal of CO_2 Utilization 16, 2016, 225–235.

GODOY, S. G. M. Projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa: desempenho e custos de transação. R. Adm., São Paulo, v.48, n.2, p.310-326, abr./maio/jun. 2013.

HANDLER, R., GRIFFING, E., SHONNARD, D. R., LAI, A. Life Cycle Assessments of LanzaTech Ethanol Production: Anticipated Greenhouse Gas Emissions for Cellulosic and Waste Gas Feedstocks. Industrial & Engineering Chemistry Research. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b03215. 2015.

HEEK, J. V., ARNING, K, ZIEFLE, M. Reduce, reuse, recycle: Acceptanceof CO_2-utilization for plasticproducts. Energy Policy 105, 2017, 53–66.

HEPBURN, C., ADLEN, E., BEDDINGTON, J., CARTER, E.A., FUSS, S., DOWELL, N.M., MINX, J.C., SMITH, P., WILLIAMS, C.K. The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal. Vol 575 | 7 November 2019. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6.

HORNBERGER, M., MORENO, J., SCHMID, M., SCHEFFKNECHT, G. Experimental investigation of the carbonation reactor in a tail-end Calcium Looping configuration for CO2 capture from cement plants, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106557.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. “IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage”. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2005, 442 pp.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2014a.Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core

Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2014b. Bruckner T, IA Bashmakov, Y Mulugetta, H Chum, A de la Vega Navarro, J Edmonds, et al. Chapter 7: Energy systems. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, et al., editors. Climate change 2014: Mitigation of climate change contribution of Working Group 3 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press; 2014. p. 511-97.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, Maycock, M. Tignor and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018, 32 pp.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISSO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. 2006.

KALATJARI, H.R. HAGHTALAB, A., NASR, M. R. J., HEYDARINASAB, M. Experimental, simulation and thermodynamic. Journal of Natural Gas Science

and Engineering, Volume 72, December 2019. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103001.

KARIMI, M., JODAEI, A. KHAJVANDI, A., SADEGHINIKRAHIM, A., JAHANDIDEH, R. In-situ capture and conversion of atmospheric CO_2 into nano-$CaCO_3$ using a novel pathway based on deep eutectic choline chloridecalcium chloride. Journal of Environmental Management 206 (2018) 516e522.

KENDAL, A., SPANG, E. S. The role of industrial ecology in food and agriculture's adaptation to climate change. journal of industrial ecology. DOI: 10.1111/jiec.12851. 2019.

KHAPRE, A. S., JAISWAL, A., RENA, R., KUMAR, S. Utilizing the Greenhouse Effect as a Source to Produce Renewable Energy (2019). DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11021-5

KIM, J., PARK, K. Effect of the clean development mechanism on the deployment of renewable energy: Less developed vs. well-developed financial markets. Eneeco (2018), doi:10.1016/j.eneco.2018.07.034.

KOTZ, J. C. Química Geral e Reações Químicas. Volume 1, 9ª edição, Cengage Learning, 2015.

KUMAR, V., NANDA, M., JOSHI, H. C., SINGH, A., SHARMA, S., VERMA, M. Production of biodiesel and bioethanol using algal biomass harvested from fresh water river. Renew Energy 116, 606–612. 2018.

KWEKU, D. W., BISMARK, O., MAXWELL, A., DESMOND, K. A., DANSO, K. B., OTI-MENSAH, E. A., QUACHIE, A. T., ADORMAA, B. B. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. Journal of Scientific Research & Reports 17(6): 1-9, 2017; Article no.JSRR.39630 ISSN: 2320-0227.

LIN, B., XU, M. Regional differences on CO_2 emission efficiency in metallurgical industry of China. Energy Policy 120, 2018, 302–311.

LIU, M., GADIKOTA, G. Single-step, low temperature and integrated CO_2 capture and conversion using sodium glycinate to produce calcium carbonate, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117887.

MEYLAN, F.D., MOREAU, V., ERKMAN, S. CO_2 utilization in the perspective of industrial ecology, an overview. Journal of CO_2 Utilization. http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2015.05.003.

MIKAYILOV, J. I., GALEOTTI, M., HASANOV, F. J. The impact of economic growth on CO_2 emissions in Azerbaijan. Journal of Cleaner Production, 197, 2018, 1558–1572.

NATIONAL INSTITUTE FOR PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT. ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. RIVM Report 2016-0104. 2016.

NIEMINEN, H., JÄRVINEN, L., RUUSKANEN, V., LAARI, A., KOIRANEN, T., AHOLA,J. Mass transfer characteristics of a continuously operated hollow-fiber membrane contactor and stripper unit for CO_2 capture. International Journal of Greenhouse Gas Control 98 (2020) 103063.

NOCITO, F., DIBENEDETTO, A. Atmospheric CO_2 Mitigation Technologies: Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS). Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2019, https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.10.002.

NORTH, M.; PASQUALE, R.; YOUNG, C. Synthesis of cyclic carbonates from epoxides and CO_2. Green Chemistry. v. 12, p. 1514-1539, 2010.

NOVA CANA. Benefícios em usar etanol. 2013. Disponível em: <https://novacana.com/etanol/beneficios>. Acesso em 16 mai. 2022.

OUNOUGHENE, G., BUSKENS, E., SANTOS, R. M., CIZER, O., GERVEN, T. V. Solvochemical carbonation of lime using ethanol: Mechanism and enhancement for direct atmospheric CO_2 capture. Journal of CO_2 Utilization. Volume 26, July 2018, Pages 143-151. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.04.024.

PAULO, A. A. Análise das emissões de gases e consumo específico de um grupo motor-gerador abastecido com misturas diesel, biodiesel e etanol. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul Escola Politécnica Programa De Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. Porto Alegre, 2019.

PEOPLOW, M. Nature. The race to recycle carbon dioxide. Vol 603 | 31 March 2022.

PHAM, T-H., LEE. B-K., KIM, J., LEE, C-H. Enhancement of CO_2 capture by using synthesized nano-zeolite. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 0 0 0 (2016) 1–7.

PLAZA, M.G., RUBIERA, F. Development of carbon-based vacuum, temperature and concentration swing adsorption post-combustion CO_2 capture processes. Chemical Engineering Journal 375 (2019) 122002. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122002.

POLIAKOFF, M., LEITNER, W. STRENG, E.S. The Twelve Principles of CO_2 CHEMISTRY†. Faraday Discuss, 183, 9–17 DOI: 10.1039/c5fd90078f, 2015.

PUBCHEM (2022) Carbon dioxide. Disponível em: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/280; acesso em fevereiro 2022.

QUYN, D., RAYER, A. V., GOUW, J., INDRAWN, I., MUMFORD, K. A., ANDERSON, C. J., HOOPER, B., STEVENS, G. W. Results from a pilot plant using un-promoted potassium carbonate for carbon capture. Energy Procedia 37 (2013) 448 – 454. doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.130.

REDE DE PESQUISA DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA. Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro/RAICV; organização, Cássia Maria Lie Ugaya, José Adolfo de Almeida Neto e Maria Cléa Brito de Figueiredo. — Brasília, DF: Ibict, 2019.

REN, L-X., CHANG, F-L., KANG, D-Y., CHEN, C-G. Hybrid membrane process for post-combustion CO_2 capture from coal-fired power plant. Department of Chemical Engineering, National Taiwan University, 10617, Taipei, Taiwan, ROC Journal of Membrane Science 603 (2020) 118001.

ROH, K. et al., Early-stage evaluation of emerging CO_2 utilization technologies at low technology readiness levels. DOI: 10.1039/c9gc04440j. The Royal Society of Chemistry 2020.

SAADE, M. R. M, SILVA, M.G., GOMES, V. A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais Natureza on line 12 (3): 109-116. (2014).

SANTOS, H. C. M. Jr. Avaliação dos impactos ambientais no ciclo de vida de produtos lácteos. Itapetinga: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2016. 78 fl.

SCHOLES, C. A., KENTISH, S. E., QADER, A. Membrane gas-solvent contactor pilot plant trials for post combustion CO_2 capture. Separation and Purification Technology 237 (2020) 116470. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116470.

SCHULTHEIS, E. Renewable Energy. CSIR-National Environmental Engineering Research Institute, Nagpur,India. 2019. Contradicting settled science, Donald Trump says "nobody really knows" on climate change. CBS News; 2013.

SILVA, F.T.F., CARVALHO, F. M., CORRÊA, J. L., JR, MERSCHMANN, P. R. C., TAGOMORI, I. S., SZKLO, A., SCHAEFFER, R. CO_2 capture in ethanol

distilleries in Brazil: Designing the optimum carbono transportation network by integrating hubs, pipelines and trucks. International Journal of Greenhouse Gas Control 71 (2018) 168–183.

SILVA, J. A., SANTOS, J. B. O. Captura de CO_2 utilizando o processo Ca-Looping com CaO e Al_2O_3. XXVI Jornada de Jóvenes Investigadores AUGM. 2018.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA. 2017. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission>. Acesso em: 20 set. 2020.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA. 2020. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019. 2020.

SOUZA, D. B. Estudo do comportamento físico-químico de rochas carbonáticas sob injeção de CO_2 supercrítico. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

SOUZA, D. P., MOITA, R. S., VALLE, R. A. B. Utilização da avaliação do ciclo de vida (ACV) para cálculo da eficiência de um projeto de captura de CO_2 de uma usina termoelétrica. III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços "Novos desafios para um planeta sustentável”. 2012.

TAJUDIN, M. A. B. A., KHAN, M. F., MAHIYUDDIN, W. R. W., HOD, R., LATIF, M. T., HAMID, A. H., RAHMAN, S. A., SAHANI, M. Risk of concentrations of major air pollutants on the prevalence of cardiovascular and respiratory diseases in urbanized area of Kuala Lumpur, Malaysia. Ecotoxicology and Environmental Safety 171, 2019, 290–300. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.057.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME AND CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION. Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Nairobi: United Nations Environment Programme. (2021)

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2015. Adoption of the Paris Agreement. Paris.

UNITED KINGDOM. Met Office. Warming: A guide to climate change. Exeter, U.K.: Met Office Hadley Centre; 2011.

VAZ JR., S., SOUZA, A. P. R., BAETA, B. E. L. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. Cleaner Engineering and Technology. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456. 2022.

VALLURI, S., KAWATRA, S.K. Use of frothers to improve the absorption efficiency of dilute sodium carbonate slurry for post combustion CO_2 capture. Fuel Processing Technology. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106620, 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. 2014. World Health Organization. https://apps.who.int/iris/handle/10665/134014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Nove em cada dez pessoas em todo o mundo respira ar contaminado. 2018. Disponível em: <http://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>. Acesso em: 06 mai. 2022.

WILCOX, J. Carbon capture. Dept. of Energy Resources Engineering. Stanford University. Stanford, CA. USA. DOI 10.1007/978-1-4614-2215-0. 2012.WORLD HEALTH ORGANIZATION. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. (2016). ZHANG, Q.; CHENG, C.-L.; NAGARAJAN, D.; CHANG, J.-S.; HU, J.; LEE, D.-J. Carbon capture and utilization of fermentation CO_2: integrated ethanol fermentation and succinic acid production as an efficient platform. Applied Energy 206 (2017) 364–371.

YADAV, G., DUBEY, B.K., SEN, R. A comparative life cycle assessment of microalgae production by CO_2 sequestration from flue gas in outdoor raceway ponds under batch and semi-continuous regime (2020). Journal of Cleaner Production https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120703.

YUAN, Y.; ROCHELLE, G.T. CO_2 absorption rate and capacity of semi-aqueous piperazine for CO_2 capture. International Journal of Greenhouse Gas Control 85 (2019) 182–186.

ZIMMERMANN, A. et al. Techno-Economic Assessment & Life-Cycle Assessment Guidelines for CO_2 Utilization, 2018.

ANEXOS

Anexo 1. Questionário preenchido pelo executor da síntese de obtenção do compósito, utilizado para realização da ACV abordada nesse estudo.

	Dados de entrada (insumos) São necessários para compreender a contribuição de cada insumo tanto para os processos unitários quanto para o processo como um todo	Quantidade do produto utilizada no processo	Marca do produto	Por que você o utiliza?	Outras informações importantes sobre o produto
1	cloreto de cálcio dihidratado ($CaCl_2.2H_2O$)	14,7090 g	Neon	Reagente utilizado como fonte de cálcio para a obtenção do carbonato de cálcio ($CaCO_3$)	Reagente P.A.
2	Água destilada aprox. 1 síntese: 985,3 ml + 166 + 459 ml	1 L / suficiente para completar o balão volumétrico no preparo da solução de lignina Kraft e da solução de NH_4OH	-	Solvente / meio da reação e para o preparo das soluções de NH_4OH de lignina Kraft	Água destilada do laboratório
3	Lignina Kraft	36,0093 g	-	Reagente utilizado para obtenção do compósito com o $CaCO_3$	Lignina Kraft de Eucalipto – projeto GreenMol 05/2019
4	Hidróxido de amônio solução 29 % (NH_4OH)	125 ml	Sigma Aldrich	Reagente utilizado para preparo da solução de hidróxido de amônio que irá manter o pH da reação em torno de 8 e, para solubilização da lignina Kraft	Reagente P.A.

Anexo 1. Questionário preenchido pelo executor da síntese de obtenção do compósito, utilizado para realização da ACV abordada nesse estudo (*continuação*).

5	Dióxido de carbono (CO_2)	75 L*	White Martins	Reagente utilizado como fonte de carbono para a formação do $CaCO_3$	Gás 100 % CO_2
6	Acetona	Suficiente para recuperação e lavagem do compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft formado	Não anotado	Utilizado para recuperação e lavagem do compósito	-
	Dados de eletricidade (equipamentos) São necessários pois fazem total diferença na carga ambiental gerada durante o processo	Quantidade do produto utilizada no processo (horas/minutos utilizando o equipamento)	Marca do produto e todas as características possíveis (voltagem, consumo, país de fabricação do equipamento, o máximo de especificações)	Por que você o utiliza?	Outras informações importantes sobre o produto
1	Balança analítica	15 min	Shimadzu (220 V, país de fabricação filial Brasil (?) ou Japão).	Para pesagem dos reagentes $CaCl_2$ e lignina Kraft; e pesagem do produto final obtido da reação	-
2	Biorreator BioFlo 120	330 min (5,5h)	Eppendorf (potência 0,983 kW, vaso utilizado com capacidade para 5 L, país de fabricação filial Brasil (?)).	Realizar a solubilização do $CaCl_2$ e realizar a reação de formação do $CaCO_3$	Vaso encamisado, com agitação inicialmente de 300 rpm e, durante a reação de 1000 rpm, e pHmetro acoplado ao Biorreator
3	Banho termostático	330 min	Thermo Scientific (potência 0,916 kW, país	Utilizado para o aquecimento da solução de $CaCl_2$, para a	

Anexo 1. Questionário preenchido pelo executor da síntese de obtenção do compósito, utilizado para realização da ACV abordada nesse estudo (*continuação*).

			de fabricação filial Brasil (?)).	manutenção da temperatura durante a reação e para o resfriamento da suspensão do compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft	
4	Centrífuga de solo modelo RC 6 Plus – série A4254	Tempo de centrifugação de 15 min por rodada (ressalta-se que tem o tempo de aceleração, centrifugação e desaceleração) – tempo total em torno de 60 min	Thermo Fisher Scientific (potência 4,9 kW, país de fabricação filial Brasil (?)).	Acelerar a precipitação do compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft formado	Possui um tempo de aceleração e desaceleração e cabem 4 frascos com capacidade de 1500 g cada por vez
5	Filtração a vácuo	Não tem tempo definido	Vidraria de laboratório (Kitasato e funil de Buchner) e bomba de vácuo (220 V)	Após a retirada do precipitado dos frascos da centrífuga é realizada a lavagem dos resquícios que ficaram e esse material é filtrado a vácuo	OBSERVAÇÃO: não tenho dados sobre a bomba de vácuo
6	Estufa a vácuo TE 395	15 h aproximadamente / *over night*, temperatura 70 °C	TECNAL (220 V, 2100 W, país de fabricação Brasil)	Secagem do compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft	OBSERVAÇÃO: essa etapa foi eliminada porque o material estava muito úmido e houve condensação de líquido na estufa

Anexo 1. Questionário preenchido pelo executor da síntese de obtenção do compósito, utilizado para realização da ACV abordada nesse estudo (*continuação*).

7	Estufa de circulação e renovação de ar modelo MA 035	15 h aproximadamente / *over night*, temperatura 50 ºC	Marconi (potência 2,2 kW, 220 V, país de fabricação filial Brasil (?)).	Secagem do compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft	-
	Dados de saída (insumos/resíduos) São necessários para elaboração de cenário e tratamento de resíduos	Quantidade do produto	Marca do produto ou composição	Por que e onde você o descarta	Outras informações importantes sobre o produto (sugestões de destino)
1	compósito $CaCO_3$ precipitado/lignina Kraft	101,8540 g**	-	-	Produto destinado ao uso como dispensador de semioquímico
2	Sobrenadante da centrifugação ou filtração	Quantidade não mensurada, mas, em torno de 1000 mL	-	O sobrenadante resultante da centrifugação foi descartado em recipiente apropriado e recebeu a destinação dos produtos químicos conforme prática da Embrapa Agroenergia	-