



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



POSSIBILIDADE DE DESCARBONIZAÇÃO NO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE EVA E PEBD: ESTUDO DE CASO DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL DE TRIUNFO - RS

Autor: Karen Ramos Tomasi

Orientador: Caroline Borges Agustini

Porto Alegre, setembro de 2023

Autor: Karen Ramos Tomasi

POSSIBILIDADE DE DESCARBONIZAÇÃO NO GERENCIAMENTO DE
RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE EVA E PEBD: ESTUDO DE CASO DE UMA
UNIDADE INDUSTRIAL DE TRIUNFO - RS

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química*

Orientador: Caroline Borges Agustini

Banca Examinadora:

Prof. Jorge Otávio Trierweiler, UFRGS.

Prof. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo, UFRGS.

Porto Alegre

2023

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio e incentivo nos momentos difíceis, e por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade durante todo o meu período escolar.

À minha irmã, pelas risadas e por trazer leveza à minha vida.

Aos meus amigos, de Caxias e do Grêmio, pelas risadas, companhia e apoio emocional durante todos esses anos de graduação.

Às minhas *pets*, pelo conforto emocional nos momentos em que precisei.

À UFRGS. Ao agradecer a UFRGS, agradeço à universidade pública, por seu ensino gratuito e de excelência, seu ambiente inclusivo e seu fomento à pesquisa e desenvolvimento científico e tecnológico. Um agradecimento especial por me proporcionar além do crescimento acadêmico e profissional, desenvolvimento de valores humanos e sociais.

Ao meu estágio e a todos profissionais que tive contato durante esse período, por me proporcionarem crescimento profissional e acadêmico, além de se tornar um incentivo e motivação para terminar a graduação.

À minha orientadora, que conduziu esse trabalho de forma leve e motivadora. Ter uma orientadora como a Carol foi um privilégio que a vida me ofertou.

E, por fim, a todos aqueles que não foram citados, mas que muito contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica.

RESUMO

O etileno acetato de vinila (EVA) e o polietileno de baixa densidade (PEBD) são polímeros obtidos majoritariamente através de matéria-prima fóssil (nafta). A indústria petroquímica possui significativo impacto ambiental, e com a evolução das discussões sobre esse tema, surgiu a preocupação de mitigar esses impactos, entre eles as emissões de gases de efeito estufa. O presente trabalho analisa os impactos referentes a emissões de gases de efeito estufa provenientes de resíduos sólidos de uma planta de produção de PEBD e EVA através de tecnologia tubular localizada em Triunfo, Rio Grande do Sul. O estudo tem como objetivo comparar as emissões de GEE de diferentes destinações dadas aos resíduos sólidos e à resina pós consumo, utilizando como ferramenta principal uma calculadora de emissões disponibilizada pelo Governo Federal, que converte as emissões dos diversos gases de efeito estufa em toneladas de CO₂equivalente. As destinações consideradas nesse trabalho foram desde as mais tradicionais como lixão, aterro sanitário e reciclagem, até as mais robustas como coprocessamento, compostagem e digestão anaeróbia. Além disso, a fim de validar os parâmetros de carbono total considerados na calculadora, foi realizada análise de carbono orgânico total nas amostras de PEBD e EVA. Ao analisar os resultados foi possível observar que as emissões provenientes dos resíduos sólidos gerados no ambiente industrial são irrisórias em comparação com as emissões oriundas da disposição das resinas pós consumo. Ademais, foi possível observar que o coprocessamento se apresenta como uma boa alternativa que visa reduzir os impactos das emissões de GEE de resíduos sólidos.

Palavras-chave: EVA, PEBD, descarbonização, GEE, resíduos sólidos, petroquímica, plástico.

ABSTRACT

Ethylene vinyl acetate (EVA) and low-density polyethylene (LDPE) are polymers mainly obtained from fossil raw material (naphtha). The petrochemical industry has significant environmental impact, and with the evolution of discussions about this topic, emerged the concern to mitigate these impacts, such as the greenhouse gas emissions (GHG). The present study analyzes the impacts resulting from solid residues generated in a LDPE and EVA tubular plant located in Triunfo, Rio Grande do Sul. The study aims to compare the GHG emissions from different destinations given to solid residues and to the post consumption resin, using as main tool an emissions calculator made available by the Federal Government of Brasil, which converts the different GHG emissions into tons of CO₂ equivalent. The destinations considered in this study varied from the most traditional such as dumping ground, landfill and recycling, up to the most robust such as coprocessing, composting and anaerobic digestion. Furthermore, in order to validate the parameters of total carbon considered in the calculator, it was performed a total organic carbon analysis on the EVA and LDPE samples. The results showed that the emissions coming from the solid residues generated in the industrial environment were derisory when compared to the emissions from the disposal of post consumption resins. In addition, it was possible to observe that coprocessing presents itself as a good alternative which aims to reduce the impacts of GHG emissions from solid residues.

Keywords: *EVA, LDPE, decarbonization, GHG, solid residues, petrochemical, plastic*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Setor de transformados plásticos no Brasil	2
Figura 2: Evolução das emissões de GEE no setor de resíduos no Brasil	6
Figura 3: Esquema representativo do processo de produção tubular	17
Figura 4: Destinações utilizadas para os resíduos sólidos no primeiro semestre de 2023	18
Figura 5: Destinações utilizadas para os resíduos sólidos no Brasil	19
Figura 6: Balanço das emissões de GEE nos cenários comparados	24
Figura 7: Balanço total das emissões de GEE nos cenários comparados	25
Figura 8: Balanço das emissões de GEE nos cenários comparados	28
Figura 9: Balanço total das emissões de GEE nos cenários comparados	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cenários de gerenciamento dos resíduos gerados na planta.....	14
Tabela 2: Cenários de gerenciamento de resíduos das resinas pós consumo	16
Tabela 3: Análise TOC.....	20
Tabela 4: Categorias de resíduos da planta adaptados para as categorias da calculadora	21
Tabela 5: Composição dos resíduos sólidos gerados na planta.....	22
Tabela 6: Emissões de GEE nos cenários comparados	23
Tabela 7: Emissões dos cenários comparados.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

EVA – Etileno acetato de vinila

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GEE – Gases de efeito estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

kt - Quilotoneladas

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

PEBD – Polietileno de baixa densidade

SIRENE - Sistema de Registro Nacional de Emissões

TGA – Análise Termogravimétrica

TOC – Carbono Orgânico Total

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂eq – dióxido de carbono equivalente

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Setor petroquímico	2
2.2	Fontes de matéria prima	3
2.3	PEBD e EVA	3
2.3.1	Processo de produção	4
2.4	Descarbonização	4
2.4.1	Emissões do setor de resíduos	5
2.5	Gerenciamento de resíduos sólidos	6
2.5.1	Gerenciamento de resíduos sólidos industriais	6
2.5.2	Reutilização	7
2.5.3	Reciclagem	7
2.5.4	Recuperação	8
2.5.5	Compostagem	8
2.5.6	Aproveitamento energético	8
2.5.7	Aterro	10
2.5.8	Incineração	11
3	Materiais e Métodos	12
3.1	Coleta das amostras	12
3.2	Análise TOC	12
3.3	Calculadora de emissões	12
3.3.1	Considerações	13
3.4	Cenários	14
3.4.1	Resíduos gerados na planta	14
3.4.2	Resíduos de resina pós consumo	16
4	Estudo de Caso	17
4.1	Resíduos gerados e destinação	18
4.1.1	Resíduos gerados dentro do espaço industrial	18
4.1.2	Resina pós consumo	18
5	Resultados e discussões	20
5.1	Análise de TOC	20
5.2	Calculadora de emissões	20

5.2.1	Resíduos gerados na planta	20
5.2.1.1	Considerações	20
5.2.1.2	Discussão dos cenários	23
5.2.2	Resíduo de resinas pós consumo	27
6	Conclusões	31
	REFERÊNCIAS	32
	ANEXO A	34

1 Introdução

Nos últimos trinta anos o volume de lixo produzido no mundo aumentou três vezes mais que a população (MENEZES et al., 2005). Muitos problemas ambientais e de saúde pública são gerados a partir do manejo incorreto de resíduos sólidos (SANCHES et al., 2006). Com o agravamento de mazelas ambientais, dentre elas o aquecimento global e o efeito estufa, começaram a ser discutidas formas de descarbonização em diversas esferas, entre elas a de descarte e destinação de resíduos sólidos.

O PEBD e o EVA são polímeros termoplásticos majoritariamente provenientes de matéria prima não renovável (nafta) e de difícil decomposição na natureza - sabe-se que os plásticos demoram mais de 100 anos para se decompor no ambiente, pois apresentam alta massa molar e hidrofobicidade, características presentes que dificultam o ataque dos microrganismos ao polímero (LEE, 1998; ROSA, 2003). Após seu consumo, alto volume dessas resinas é descartado em lixões, acarretando grande impacto ambiental em decorrência de emissões de GEE, com destaque para o metano, que possui potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o dióxido de carbono emitido pela combustão.

Além disso, durante o processo produtivo são gerados diversos tipos de resíduos sólidos. Na planta estudada, esses resíduos são enviados a aterro industrial, coprocessamento e reciclagem. Com a finalidade de reduzir as emissões de GEE, o presente trabalho irá discutir e comparar diversas formas de gerenciamento dos resíduos gerados no ambiente industrial e o gerenciamento das próprias resinas pós consumo. Para isso, será utilizada uma calculadora de emissões de GEE disponibilizada pelo Governo Federal. Com a finalidade de validar as considerações feitas na calculadora, foram coletadas amostras das resinas produzidas em uma planta industrial na cidade de Triunfo, Rio Grande do Sul, que posteriormente foram submetidas à análise de TOC com o intuito de determinar a concentração de carbono total.

2 Revisão Bibliográfica

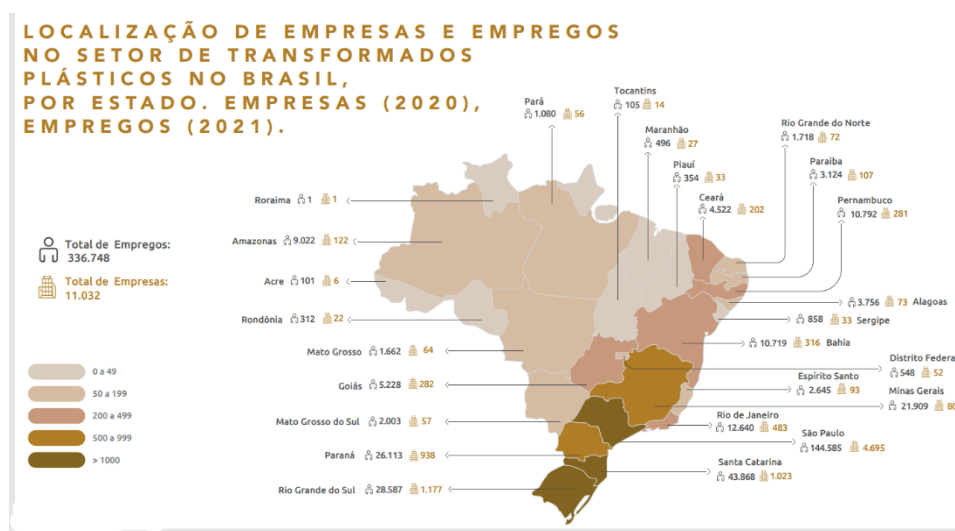
2.1 Setor petroquímico

O setor petroquímico envolve indústrias que, através de processos como craqueamento e reforma, têm como objetivo quebrar moléculas complexas de hidrocarbonetos e transformá-las em produtos de valor comercial, tais como eteno, propeno, benzeno e polímeros (EPE/Ministério de Minas e Energia, 2018).

Conforme dados do Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos (DIEESE, 2021), o ramo petroquímico responde por cerca de 55% dos produtos de uso industrial no Brasil, correspondendo a aproximadamente 11% do PIB industrial brasileiro.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2022) o setor de transformados plásticos emprega cerca de 350 mil pessoas no Brasil em 12 mil empresas, o que representou um faturamento de R\$127 bilhões e aproximadamente 7 milhões de toneladas de plástico produzidas em 2021. O Rio Grande do Sul desempenha papel importante frente ao cenário nacional, representando cerca de 8,5% do setor e empregando 28 mil pessoas, conforme mostra o gráfico abaixo.

Figura 1: Setor de transformados plásticos no Brasil



Fonte: Portal RAIS e Caged/Ministério da Economia, 2022

2.2 Fontes de matéria prima

A principal matéria-prima utilizada na produção de resinas termoplásticas é a nafta, subproduto da destilação do petróleo bruto. A nafta é composta por hidrocarbonetos alifáticos como os alcanos (parafinas) e os alcenos (olefinas). A partir do craqueamento da nafta é possível obter eteno e propeno, principais matérias-primas das resinas poliméricas. O processo mais utilizado nas indústrias petroquímicas é o craqueamento pirolítico, que consiste na quebra das moléculas através do aquecimento da nafta a temperaturas superiores a 500°C. Através desse processo são obtidos o eteno e o propeno, que posteriormente serão polimerizados e transformados em resinas de polietileno e polipropileno, respectivamente, entre outras (Pereira et al., 2007).

Com o passar dos anos e o avanço da preocupação mundial com os impactos ambientais da extração do petróleo, foi desenvolvido o processo de obtenção de eteno através da desidratação do etanol da cana-de-açúcar. O polietileno produzido a partir dessa fonte é chamado de “polietileno verde”, mas isso não significa que ele seja biodegradável. Apesar de derivar de fonte renovável, o eteno obtido é idêntico ao advindo do processo de craqueamento da nafta, bem como o processo de polimerização do PE e do PE verde (Werneck et al., 2012).

2.3 PEBD e EVA

O EVA, material plástico derivado do petróleo, inicialmente era utilizado na indústria calçadista através da fabricação de solas de calçados devido a sua durabilidade e capacidade de amortecimento. Na década de 70, o EVA passou a ser utilizado na fabricação de brinquedos. Hoje em dia, esse polímero é utilizado em diversas aplicações, dentre elas materiais esportivos, indústria automobilística e painéis solares. Entre suas principais vantagens está sua flexibilidade, baixo custo e versatilidade que permite ser modelado em diversas formas e cores (Zattera et al., 2005).

O PEBD, material plástico também derivado do petróleo, possui uma estrutura molecular ramificada, o que contribui para sua baixa densidade. É um termoplástico amplamente utilizado na fabricação de embalagens flexíveis, tais como sacolas plásticas, filmes plásticos para alimentos e embalagens de produtos químicos. O PEBD possui como principais

características flexibilidade, baixa permeabilidade a gases e vapor de água, boas resistências ao impacto e química, além de alta capacidade de moldagem por sopro (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003).

2.3.1 *Processo de produção*

Tanto o EVA quanto o PEBD podem ser obtidos através de processos envolvendo reatores autoclave ou tubular. O estudo de caso abordado nesse trabalho envolverá reator tubular para ambos os produtos (Silva, 2012).

2.4 **Descarbonização**

Diante do agravamento das mudanças climáticas e do aquecimento global, a necessidade de descarbonização surge devido ao papel significativo que as emissões de gases de efeito estufa desempenham ao aumentar as concentrações desses gases na atmosfera, o que leva ao aumento da temperatura média do planeta e a uma série de impactos ambientais e socioeconômicos. A descarbonização envolve uma série de estratégias e medidas que tem como objetivos reduzir as emissões de GEE em setores chave como energia, indústria, transporte, agricultura e construção (Instituto E+ Transição Energética, Rio de Janeiro, 2022).

As principais medidas de descarbonização incluem, entre outras (Instituto E+ Transição Energética, Rio de Janeiro, 2022):

- transição energética para fontes renováveis (substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia limpa como solar, eólica e biomassa);
- eletrificação (substituição de veículos movidos a combustíveis fósseis por veículos elétricos);
- eficiência energética (melhoria na eficiência de processos industriais e no consumo de energia em diversas atividades humanas);
- captura e armazenamento de carbono (desenvolvimento de tecnologias de captura de carbono que visam remover o CO₂ da atmosfera com foco em emissões provenientes de usinas de energia a carvão e indústrias intensivas em carbono, a exemplo da indústria termoplástica);

- mudanças no uso da terra (adoção de práticas de manejo florestal sustentável, conservação de ecossistemas naturais e reflorestamento).

A descarbonização aplicada em indústrias termoplásticas envolve:

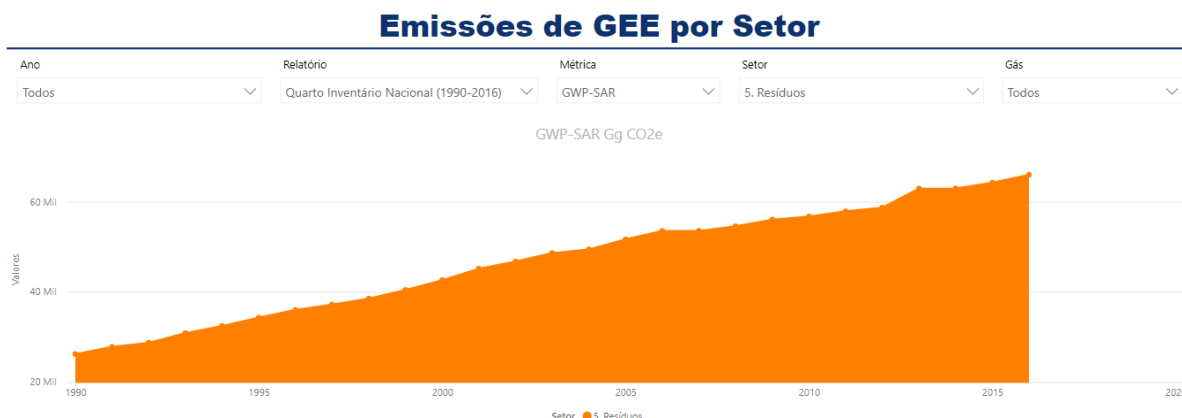
- uso de fontes de energia renovável (substituição gradual de fontes de energia provenientes de combustíveis fósseis para fontes renováveis),
- melhoria da eficiência energética nos processos de produção (utilização de equipamentos eficientes, sistemas adequados de recuperação de calor e isolamento térmico),
- processos de reciclagem e reutilização de resíduos do processo,
- inovação tecnológica através de investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que visem reduzir as emissões dos GEE,
- uso de matérias-primas renováveis, a exemplo da cana de açúcar utilizada na produção de alguns *grades* de PE na Braskem de Triunfo.

2.4.1 Emissões do setor de resíduos

No Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa divulgado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações em 2021 foram consideradas no setor de resíduos as emissões decorrentes principalmente ao processo de degradação anaeróbia pela destinação de resíduos sólidos em aterros sanitários e vazadouros (lixões), bem como do despejo de águas residuárias que passaram ou não por algum processo de tratamento.

No Brasil, as emissões decorrentes de resíduos vêm crescendo ao longo dos anos, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2: Evolução das emissões de GEE no setor de resíduos no Brasil



A métrica utilizada no cálculo das emissões é em equivalentes de CO₂ (CO₂eq) e é calculado os valores de Potencial de Aquecimento Global (GWP, no acrônimo em inglês) para um horizonte de 100 anos, publicado no Segundo Relatório de Avaliação do IPCC, 1996 (SAR, no acrônimo em inglês).

O aumento das emissões desse setor está associado com o crescimento do uso de materiais descartáveis e a baixa taxa de reaproveitamento e reciclagem dos resíduos, cerca de 4% de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), sendo que 40% dos resíduos produzidos no Brasil são destinados a aterros controlados ou lixões a céu aberto, duas das destinações de maior impacto no que diz respeito a emissões de GEE (Panorama Abrelpe 2018/2019).

2.5 Gerenciamento de resíduos sólidos

2.5.1 Gerenciamento de resíduos sólidos industriais

Os resíduos industriais são aqueles gerados nos processos produtivos e em suas instalações. No Brasil, o gerenciamento desses resíduos é regido pela resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002, que dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais – conjunto de informações sobre a geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias do país.

A destinação dos resíduos industriais deve estar de acordo com o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) redigido por órgão de controle ambiental integrante do Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama).

A melhoria da gestão dos resíduos sólidos urbanos deve se constituir de um ciclo virtuoso de atividades que observe, em ordem de prioridade, conforme regulamentado pela Lei 12.305/10, a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Roteiro para redução de emissões de gases de efeito estufa no manejo de RSU, Brasília, 2021). A seguir, serão discutidas as principais técnicas de destinação dos resíduos sólidos.

2.5.2 Reutilização

Na indústria são gerados resíduos diversos que podem ser reutilizados no mesmo ou em outro processo produtivo. A reutilização de resíduos gerados em processos industriais permite não apenas uma redução no impacto ambiental causado por esse setor, mas também a redução de custos de operação e o aumento de lucro e competitividade das empresas (CPMRS-RMB, 2020).

2.5.3 Reciclagem

A reciclagem pode ser classificada em primária, secundária, terciária e quaternária. A reciclagem primária consiste na reintrodução de materiais industriais no processo de produção, como por exemplo a reciclagem de aparas de polímeros. A reciclagem secundária, a mais utilizada no Brasil, abrange os resíduos urbanos que podem ser processados e transformados em produtos que possuam menor exigência que os produzidos por matéria-prima não reciclada, um exemplo é a reciclagem de embalagens de PP para a produção de sacos de lixo. A reciclagem terciária envolve um processo tecnológico que permite a produção de combustíveis ou insumo químicos a partir de resíduos. A reciclagem quaternária, por sua vez, consiste na incineração controlada de resíduos que tem como finalidade a recuperação energética (Chinelatto, São Paulo, 2023).

2.5.4 *Recuperação*

A recuperação, ou coprocessamento, de resíduos sólidos se dá através do processamento do resíduo visando recuperação da matéria e o processamento como subproduto (Montenegro, Belo Horizonte, 2007).

2.5.5 *Compostagem*

Compostagem é um processo aeróbio de decomposição biológica da matéria orgânica através de controle de temperatura e umidade que gera um produto estável denominado adubo orgânico. O processo de compostagem pode ser dividido em duas fases: fase ativa ou de bioestabilização e fase de maturação ou cura. Como produtos da compostagem, são obtidos gás carbônico, água e biomassa (Demetrio, Londrina, 2014).

O aumento das populações de bactérias e fungos ocorre na fase de bioestabilização. Nessa fase a temperatura chega a 60°C e ocorre o consumo da maior parte dos ingredientes dos substratos além do processo de sanitização de microrganismos patogênicos. Na fase de cura, operando entre 30 e 45°C, a matéria oxidada forma um produto rico em matéria orgânica que pode ser aplicado ao solo sem causar danos. É importante que a maturação seja adequadamente conduzida para evitar impacto à flora em virtude de intensa atividade microbiológica (provocando diminuição de oxigênio e do nitrogênio nas raízes das plantas) (Herbets et al., 2005).

Algumas das grandes vantagens da compostagem são o exercício de efeito controlador sobre pragas de plantas, auxílio na retenção de nutrientes e assistência no crescimento das plantas (Higa; Parr, 1994).

No Brasil, prevista como uma técnica de destinação final ambientalmente adequada na Lei de Resíduos Sólidos, a compostagem aparece como alternativa sustentável e econômica de destinação de resíduos (Padial, 2020).

2.5.6 *Aproveitamento energético*

O aproveitamento energético de resíduos orgânicos é um tema de extrema relevância para o país que busca o desenvolvimento de uma matriz energética mais eficiente e sustentável. Essa abordagem contribui para a minimização do descarte de resíduos em

aterros, mitigação das emissões de GEE e ampliação do uso de energias renováveis (Lins et al., 2022).

Dentre as principais rotas de aproveitamento energético é possível destacar a combustão, pirólise e digestão anaeróbia.

2.5.6.1 Combustão

A combustão direta de resíduos se enquadra no aproveitamento energético uma vez que o calor gerado pela queima direta destes pode ser usado no aquecimento de caldeiras, que por sua vez move uma turbina e um gerador, gerando energia elétrica. É possível também obter energia térmica, através do vapor e do próprio calor gerado na combustão como subproduto (ANEEL, 2005).

As usinas de combustão de resíduos produzem tipicamente entre 550 e 600 kWh de energia elétrica por tonelada de resíduo sólido (Bastos, 2013).

A preocupação ambiental em relação à emissão de poluentes na atmosfera fez com que se estabelecessem processos rígidos de técnicas de limpeza dos gases produzidos a partir da combustão. Algumas das medidas adotadas em usinas de combustão são a utilização de carvão ativado, estabilização da temperatura de combustão, emprego de depuradores de gases (neutralização de gases ácidos), uso de filtros (remoção de partículas da corrente), utilização de precipitadores eletrostáticos, redução não-catalítica seletiva (injeção de amônia ou ureia na fornalha a fim de reagir com os óxidos de nitrogênio para formar gás nitrogênio), superoxigenação da fornalha (aumento da eficiência do processo), entre outros. Um ponto positivo a ser destacado dessa tecnologia é a redução das emissões de metano associado as emissões de resíduos destinados a aterros, GEE com potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o dióxido de carbono emitido pela combustão. Em geral, usinas modernas não têm impacto ambiental significativo e resultam em um balanço positivo em termos de emissões de GEE (Quaresma Bastos, Rio de Janeiro, 2013).

2.5.6.2 Pirólise

A pirólise é um processo endotérmico, que ocorre na ausência de oxigênio, resultando em produtos de valor agregado como bio-óleo, gases e finos de carvão. Devido à ausência de

oxigênio, o bio-óleo apresenta alto poder calorífico, e por esse motivo pode ser empregado como biocombustível. Os gases, por sua vez, também possuem alto poder calorífico e são compostos por hidrocarbonetos, hidrogênio, dióxido de carbono e monóxido de carbono. Já o carvão obtido pode ser empregado no tratamento de efluentes industriais, uma vez que atua na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas. Além disso, por possuir alto poder calorífico, o carvão pode ser usado em caldeiras e fornos (Vieira et al., 2009; Pedroza et al., 2014).

2.5.6.3 Digestão anaeróbia

A partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, é produzido principalmente gás carbônico, metano e lodo através de atividade microbiana e escassez de oxigênio. Esse gás produzido é denominado biogás. Além de metano e gás carbônico, são gerados alguns gases inertes e compostos sulfurados. Já o lodo é um material parcialmente degradado, rico em matéria orgânica nitrogenada e nutrientes (Neper, 2021).

A grande vantagem desse método é a redução da destinação de resíduos para aterros. O biogás pode ser aplicado na indústria química, na geração de energia elétrica em grupos motogeradores, na geração de energia térmica (em caldeiras e fogão doméstico) ou refinado e transformado em biometano para abastecimento de veículos a GNV. O lodo gerado, por sua vez, passa por um pós-tratamento e pode ser utilizado diretamente no solo como biofertilizante.

Esse processo possui eficiência de 35% no que diz respeito a conversão de energia térmica em energia elétrica, sendo possível obter entre 50 e 150kWh por tonelada de resíduo sólido, dependendo de sua composição (Verma, 2002). Ademais, vale destacar que os processos anaeróbios tratam um número maior de substratos, devido ao fato de os microrganismos anaeróbios apresentarem características especiais, dentre as quais se pode citar a pequena taxa de utilização de energia para conversão em massa celular, sendo que grande parte se destina à formação de biogás (De Jaboticabal; Barbosa da Cunha; Cardoso, 2013).

2.5.7 Aterro

Aterros industriais e sanitários representam a mais importante fonte de emissão de GEE no setor de resíduos, uma vez que o processo de degradação nesses ambientes é

descontrolada e apresenta alta formação de metano liberado diretamente na atmosfera (Falcão de Sá et al., 2018).

A disposição dos resíduos em aterros industriais é feita por compactação e sobreposição de camadas. Diferentemente dos aterros sanitários comuns, o aterro industrial conta com duas camadas de impermeabilização, uma superior e uma inferior. Além disso, esse tipo de aterro conta com estação de tratamento de gases e sistemas de drenagem.

Apesar da regulamentação mais rigorosa em relação aos aterros sanitários, o aterro industrial ainda apresenta risco de geração de passivo ambiental, além de desperdiçar matéria-prima que pode ser reaproveitada e transformada em energia e insumos para outros processos.

2.5.8 Incineração

A incineração de resíduos é um processo bastante utilizado nas metrópoles brasileiras e consiste na combustão completa e controlada dos resíduos, e sua conversão em cinzas inertes e gases. Os sistemas de limpeza das emissões desse processo são compostos, em sua maioria, por lavagem e filtragem, que têm como finalidade a remoção de gases ácidos (HCl, HF, SO₂) (Paulo et al., 2005).

No processo de incineração, é necessário um controle que garanta a combustão completa dos resíduos a fim de evitar a geração de monóxido de carbono, dioxinas e furanos, esses dois últimos sendo compostos de alta toxicidade (Corrêa de Melo, 2017).

A incineração sem aproveitamento energético não é uma destinação interessante aos resíduos, tendo em vista que, da mesma forma que o aterro industrial, desperdiça matéria-prima que pode ser reaproveitada e transformada em energia e insumos para outros processos.

No estado do Rio Grande do Sul, conforme a Resolução Consema nº 009/2000, fica estabelecida apenas a incineração de resíduos de estabelecimentos de serviços da saúde.

3 Materiais e Métodos

3.1 Coleta das amostras

Com a finalidade de determinar o carbono orgânico total presente em pellets de PEBD e EVA, foram coletadas amostras com a engenharia de produção da planta. A amostra de EVA coletada é produzida através de eteno verde, todavia suas propriedades não diferem da resina “petro” (advinda da nafta). Nesse trabalho, foram desconsiderados os créditos de emissões derivados da cana-de-açúcar, matéria-prima do eteno verde.

3.2 Análise TOC

Amostras de EVA e PEBD foram analisadas em analisador de carbono total de sólidos da Central Analítica do Departamento de Engenharia Química da UFRGS. A unidade de combustão para amostras sólidas do Analisador de Carbono Orgânico total utiliza o método de oxidação por combustão catalítica na temperatura de 900°C. Todo carbono presente na amostra é oxidado a dióxido de carbono (CO₂), que é detectado no detector de infravermelho não dispersivo (NDIR). A área do pico de CO₂ detectada é proporcional à concentração de carbono total na amostra, de acordo com uma curva de calibração. O equipamento é capaz de analisar carbono total (TC), carbono inorgânico (IC) e carbono orgânico total (TOC) em amostras sólidas ou aquosas com elevado grau de material suspenso. O IC se refere ao carbono contido no dióxido de carbono dissolvido em água e o encontrado em carbonatos e bicarbonatos. A amostra é acidificada e oxidada em um leito catalítico a 200°C. Todo CO₂ gerado é detectado no NDIR. O TOC é obtido por meio da subtração do IC do conteúdo total de carbono presente na amostra, determinados isoladamente, conforme a Eq. 1

$$\text{TOC} = \text{TC} - \text{IC} \quad (1)$$

(“Analisador de Carbono Orgânico Total de Sólidos – Central Analítica”,2023).

3.3 Calculadora de emissões

Para o cálculo das emissões, foi utilizada uma calculadora disponível em https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/FerramentaGRSGEECalculadoraparaBrasil_09.07.xlsx,

que é uma ferramenta elaborada pelo Ministério do Desenvolvimento Regional por meio do Projeto de Cooperação para Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (ProteGEEr) financiado pelo Ministério do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear da Alemanha (BMU). A calculadora permite a quantificação das emissões, medida importante na qualificação de projetos de mitigação destas.

A ferramenta segue o método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), onde diferentes estratégias de gestão de resíduos podem ser comparadas através do cálculo das emissões de GEE. A Calculadora analisa as emissões de todos os fluxos dos resíduos para reciclagem, tratamento e disposição final respectivamente, e calcula as emissões totais de GEE de todas as etapas do processo em CO₂ equivalente. As emissões calculadas também incluem todas as emissões futuras causadas por uma determinada quantidade de resíduos tratados. Isso significa que quando os resíduos são enviados para o aterro, por exemplo, as emissões calculadas de GEE (toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de resíduo) incluem as emissões acumuladas que essa quantidade de resíduos gerará durante a sua degradação futura (Manual da Ferramenta de GEE, 2021).

Os parâmetros utilizados para estimar as emissões de cada processo de destinação dos resíduos estão estabelecidos no Manual da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos, disponível em [copy_of_ManualdaFerramentadeGEE_02.08.2021.pdf](#) (www.gov.br).

3.3.1 Considerações

No cálculo de gás de aterro formado, a calculadora considera que apenas o carbono regenerativo, proveniente de resíduos orgânicos, contribui para a formação de metano. Todavia, sabemos que ao ser exposto aos raios solares, o carbono fóssil também contribui para emissões de gases de efeito estufa, como o metano (Royer et al., 2018). Dessa forma, foi feita uma modificação na fórmula com a finalidade de considerar o carbono total na formação de gás de aterro, e não apenas o carbono regenerativo.

3.4 Cenários

3.4.1 Resíduos gerados na planta

A fim de comparar os impactos de emissões de GEE gerados por cada destinação, serão analisados três cenários hipotéticos, além do cenário base do caso estudado.

Tabela 1: Cenários de gerenciamento dos resíduos gerados na planta

Reciclagem	Cenário base (percentual de resíduo reciclado)	Cenário 1 (percentual de resíduo reciclado)	Cenário 2 (percentual de resíduo reciclado)	Cenário 3 (percentual de resíduo reciclado)
Papel, papelão	95%	95%	95%	95%
Plásticos	94%	94%	94%	94%
Vidros	84%	84%	84%	84%
Metais ferrosos	48%	48%	99%	99%
Destinação de resíduos não reciclados	Cenário base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Lixão		41%		
Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás	18%	60%	18%	
CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro	82%		82%	100%

Fonte: [A autora]

O cenário base diz respeito ao gerenciamento de resíduos que é feito pela planta atualmente, que está representado na Figura 4. No cenário 1 foi considerado o cenário padrão de destinação de resíduos sólidos urbanos no Brasil (Abrelpe, 2020). No cenário 2 foi analisada a mesma destinação do cenário base, todavia foi considerado que o resíduo de granalha, atualmente destinado para coprocessamento, é reciclado, destinação viável para esse resíduo (Caumo, 2020). No cenário 3, foi considerado que todo o resíduo não reciclado é destinado para coprocessamento.

Nos cenários que possuem disposição em aterro sanitário, foi considerado este possui coleta de gás com eficiência de 30%, sendo que metade desse gás é destinado para a geração de energia elétrica e a outra metade para produção de biometano. Já nos cenários que possuem envio para coprocessamento, foi considerado que metade do biogás gerado também é destinado para a produção de energia elétrica, e a outra metade para a produção de biometano.

Na recuperação, a planta destina os resíduos para coprocessamento em fornos de clínquer. Resíduos que possuem alto poder calorífico podem ser coprocessados em fornos de clínquer, substituindo parcialmente as matérias-primas e/ou combustíveis convencionais desse processo. Esse tipo de processo possui emissões de impacto similar ao da incineração, além de apresentar baixo custo, economia de combustível convencional do processo e a grande vantagem em relação à incineração convencional ao incorporar as cinzas geradas na combustão ao clínquer, eliminando a necessidade de disposição desses resíduos.

Na calculadora, o forno de coprocessamento foi considerado como sendo produção de CDR (combustível de resíduo) a partir de resíduos secos como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira e todo o resto destinado a aterro.

Na destinação para coprocessamento, o resíduo após a reciclagem é encaminhado para o tratamento mecânico que conta com tambor rotativo para separar o CDR seco dos orgânicos. Em seguida, o CDR é preparado por meio de outros equipamentos para substituir o coque de petróleo na indústria de cimento. A parte orgânica é encaminhada a uma instalação de biodigestão anaeróbia. As emissões de GEE da etapa de tratamento consistem nas emissões de CH_4 e N_2O da fase aeróbia pós-digestão e no consumo de energia para operar as unidades de biodigestão e pós-digestão. Nenhum dado confiável de emissão foi encontrado para essa opção de tratamento. Como a fase de pós-digestão é um tratamento aeróbio como na opção de compostagem, decidiu-se trabalhar com o mesmo fator de emissão de GEE de 35 kg CO_2eq /tonelada de resíduo. Para atividades de compostagem, a Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU relatou uma demanda de eletricidade de 100 kWh/Mg residual, resultando em 9,3 kg CO_2eq /Mg de resíduo, adotando o fator de emissão da rede elétrica brasileira definido em 93 g CO_2eq /kWh. A biodigestão anaeróbia fornece um rendimento de biogás dependendo do conteúdo calculado de carbono orgânico no fluxo de resíduos após a reciclagem, uma taxa de decomposição de 35% e uma parcela de metano de 60%. De acordo com os dois produtos feitos a partir do biogás, o conteúdo energético é calculado e as emissões evitadas são determinadas pela substituição da quantidade de energia equivalente da rede elétrica brasileira ou diesel para o transporte. Os resíduos tratados biologicamente podem ser usados como camada de aterro. Assim, não ocorre uma

substituição de matéria primária e os benefícios dessa etapa evitam emissões do metano pela disposição final no aterro (Manual da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos, ProteGEEr, 2021).

3.4.2 Resíduos de resina pós consumo

A fim de comparar os impactos de emissões de GEE gerados por cada destinação, serão analisados três cenários hipotéticos, além do cenário base do caso estudado.

Tabela 2: Cenários de gerenciamento de resíduos das resinas pós consumo

	Cenário base (percentual de resíduo reciclado)	Cenário 1 (percentual de resíduo reciclado)	Cenário 2 (percentual de resíduo reciclado)	Cenário 3 (percentual de resíduo reciclado)
Resíduos reciclados				
Plásticos	1%	38%	38%	20%
Descarte de resíduos não reciclados	Cenário base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Lixão	31%	31%		15%
Aterro sanitário	69%	69%	50%	30%
CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro			50%	55%

Fonte: [A autora]

No cenário base foi considerada a destinação dada aos resíduos plásticos urbanos pós consumo no Brasil (WWF, 2019).

No que diz respeito à reciclagem, nos cenários 1 e 2 foi considerado o cenário alemão, onde cerca de 38% dos resíduos plásticos são reciclados (WWF, 2019). No cenário 1, a destinação dos resíduos não reciclados foi considerada a mesma do cenário base, a fim de comparar o impacto apenas no volume reciclado. No cenário 2 foi considerado que metade dos resíduos não reciclados é destinada a aterro sanitário e a outra metade a CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro. No cenário 3 foi considerado um cenário mais conservador, onde 20% dos resíduos são reciclados, e 15% do restante é destinado a lixão, 30% a aterro sanitário e 55% a coprocessamento em CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro.

O aterro sanitário, em todos os cenários, foi considerado como tendo eficiência de 30% na coleta de gás, sendo que 50% são destinados à geração de eletricidade e 50% à produção de biometano.

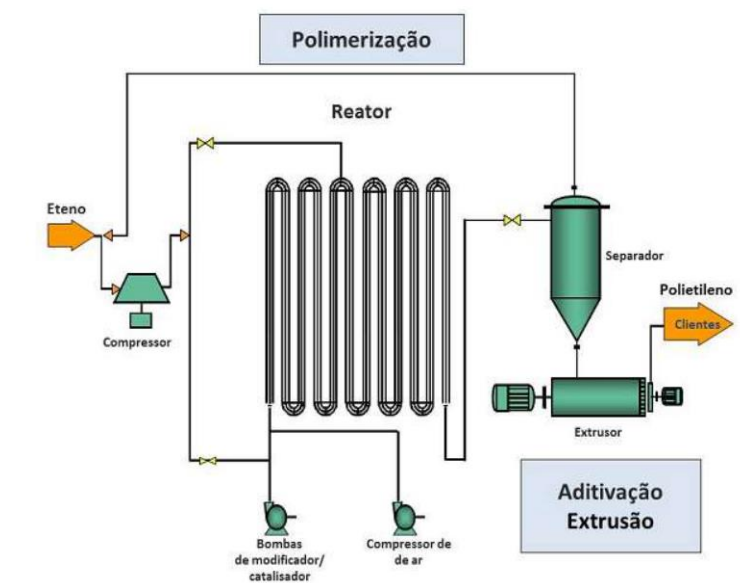
4 Estudo de Caso

O caso estudado diz respeito a uma planta de produção de PEBD e EVA através de reator tubular localizada em Triunfo – RS.

No processo tubular, o eteno é comprimido em um pré-compressor a cerca de 300 bar, em seguida passa pelo compressor secundário onde a pressão é elevada a aproximadamente 3000 bar, que é a pressão de reação do processo. É no compressor secundário que são adicionados os comonômeros (no caso da produção de EVA).

O reator tubular consiste em um trocador de calor duplo tubo, onde o tubo interno é o reator e o tubo externo consiste na jaqueta de resfriamento, já que a temperatura da reação gira em torno de 300°C. O etileno e os iniciadores são injetados em diversos pontos ao longo do reator. Com um tempo de residência de 20 a 60s, o reator tubular promove uma conversão de cerca de 40%. O polímero fundido obtido através da reação é transportado para a extrusora, e após resfriamento, silagem, ensaque e estocagem.

Figura 3: Esquema representativo do processo de produção tubular



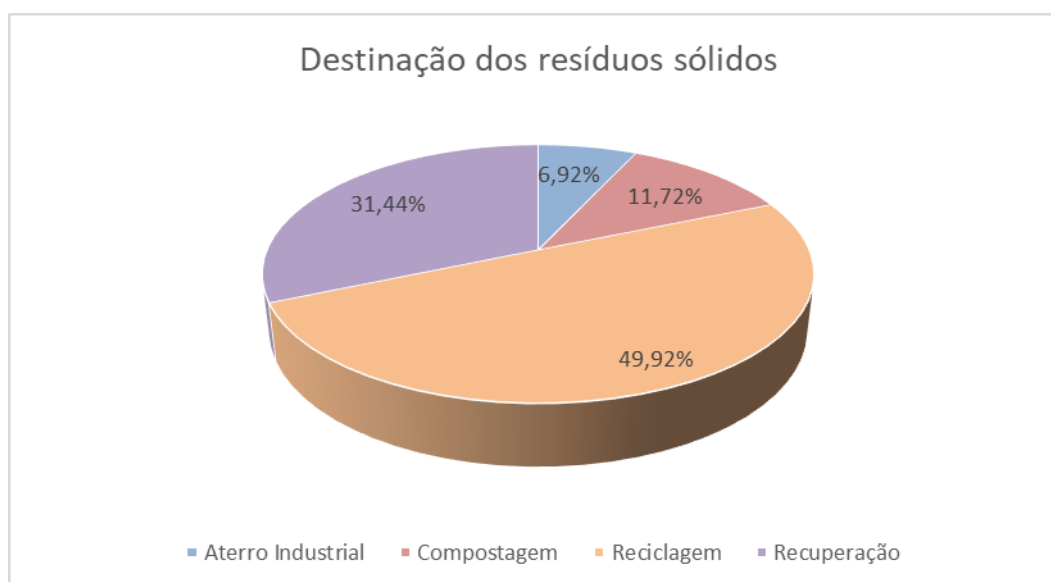
Fonte: [FARREL, L.M./Low Density Polyethylene PERP Program]

4.1 Resíduos gerados e destinação

4.1.1 Resíduos gerados dentro do espaço industrial

Os resíduos considerados no estudo não são apenas aqueles gerados no processo de produção, mas também os resíduos comuns gerados dentro do espaço industrial, desconsiderando os resíduos reutilizados. Os principais resíduos gerados, por ordem decrescente de volume de geração no primeiro semestre de 2023, são: lodo da bacia de emergência, resíduo de granalha, sucata metálica, sucata de bobina plástica, plásticos, papel/papelão, resíduo sólido comum, e diversos contaminados. As destinações utilizadas são: reciclagem, aterro industrial, recuperação (coprocessamento) e compostagem, conforme figura 4.

Figura 4: Destinações utilizadas para os resíduos sólidos no primeiro semestre de 2023



Fonte: [A autora]

4.1.2 Resina pós consumo

Além dos resíduos gerados no espaço industrial, o volume de produção de resinas será considerado nesse estudo como resíduo, já que ao final do seu ciclo de vida se tornará um resíduo sólido.

Como cenário base de destinação dos resíduos de resina pós consumo foi adotado o gerenciamento de resíduos plásticos do Brasil, de acordo com estudo conduzido pela WWF em 2019, ilustrados na Figura 5.

Figura 5: Destinações utilizadas para os resíduos sólidos no Brasil



Fonte: [WWF, 2019]

5 Resultados e discussões

5.1 Análise de TOC

O valor padrão de carbono total para plásticos utilizado na calculadora é de 75% (IPCC, 2006), referência que considera resíduos plásticos compostos de polietileno, polipropileno, polietileno tereftalato (PET), poliestireno e policloreto de vinila (PVC). A fim de obter um cenário mais próximo da realidade, foi realizada análise de TOC e adotado um percentual de carbono total médio das amostras de 84%, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 3: Análise TOC

Amostra	Carbono Total	Carbono Inorgânico	Carbono Orgânico
EVA	82,1%	0%	82,1%
PEBD	86,1%	0,3%	86,0%

Fonte: [A autora]

5.2 Calculadora de emissões

5.2.1 Resíduos gerados na planta

5.2.1.1 Considerações

Como a calculadora não possui todas as categorias necessárias para a classificação dos resíduos, foram feitas algumas aproximações, como consta na Tabela 4.

Tabela 4: Categorias de resíduos da planta adaptados para as categorias da calculadora

CATEGORIA PLANTA	CATEGORIA CALCULADORA
Resíduo Sólido Comum	Distribuído de acordo com o padrão do Brasil
Telhas de amianto	Resíduos minerais
Resíduo de Sobras de Alimentos	Resíduos de alimentos
Óleo Vegetal Usado	Resíduos de alimentos
Lâmpadas	Outros
Madeira	Madeira
Óleo Lubrificante Usado	Plásticos
Papel/Papelão	Papel/Papelão
Plásticos	Plásticos
Resíduo de Vidro	Vidro
Resíduo Eletrônico Contaminado	Outros
Resíduo Eletrônico Não Contaminado	Outros
Sucata de Bobina Plástica	Papel/Papelão
Sucata Metálica	Metais ferrosos
Diversos Contaminados	Outros
Isolamento Térmico	Outros
Lodo da Bacia de Emergência	Resíduos minerais
Resíduo de Granalha	Metais ferrosos

Fonte: [A autora]

A distribuição dos resíduos foi feita de acordo com os dados da planta, e está representada na Tabela 5.

Tabela 5: Composição dos resíduos sólidos gerados na planta

Componentes	em % de resíduos úmidos
Resíduos de alimentos	15%
Resíduos de jardins e parques	0%
Papel, papelão	16%
Plásticos	13%
Vidros	1%
Metais ferrosos	24%
Alumínio	0%
Têxteis	0%
Borracha, couro	0%
Fraldas (descartáveis)	0%
Madeira	11%
Resíduos minerais	16%
Outros	5%
Total	100%

Fonte: [A autora]

5.2.1.2 Discussão dos cenários

Tabela 6: Emissões de GEE nos cenários comparados

Cenário base (em t CO ₂ eq/ano)	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos
Resíduos reciclados			
Resíduos de alimentos	3	-1	2
Papel, papelão	46	-57	-11
Plásticos	12	-56	-44
Vidros	1	-1	0
Metais ferrosos	2	-47	-46
Tratamento e disposição final de resíduos			
Aterro sanitário	19	-1	18
CDR seco + rejeito aterro	11	-39	-27
Total	94	-202	-108

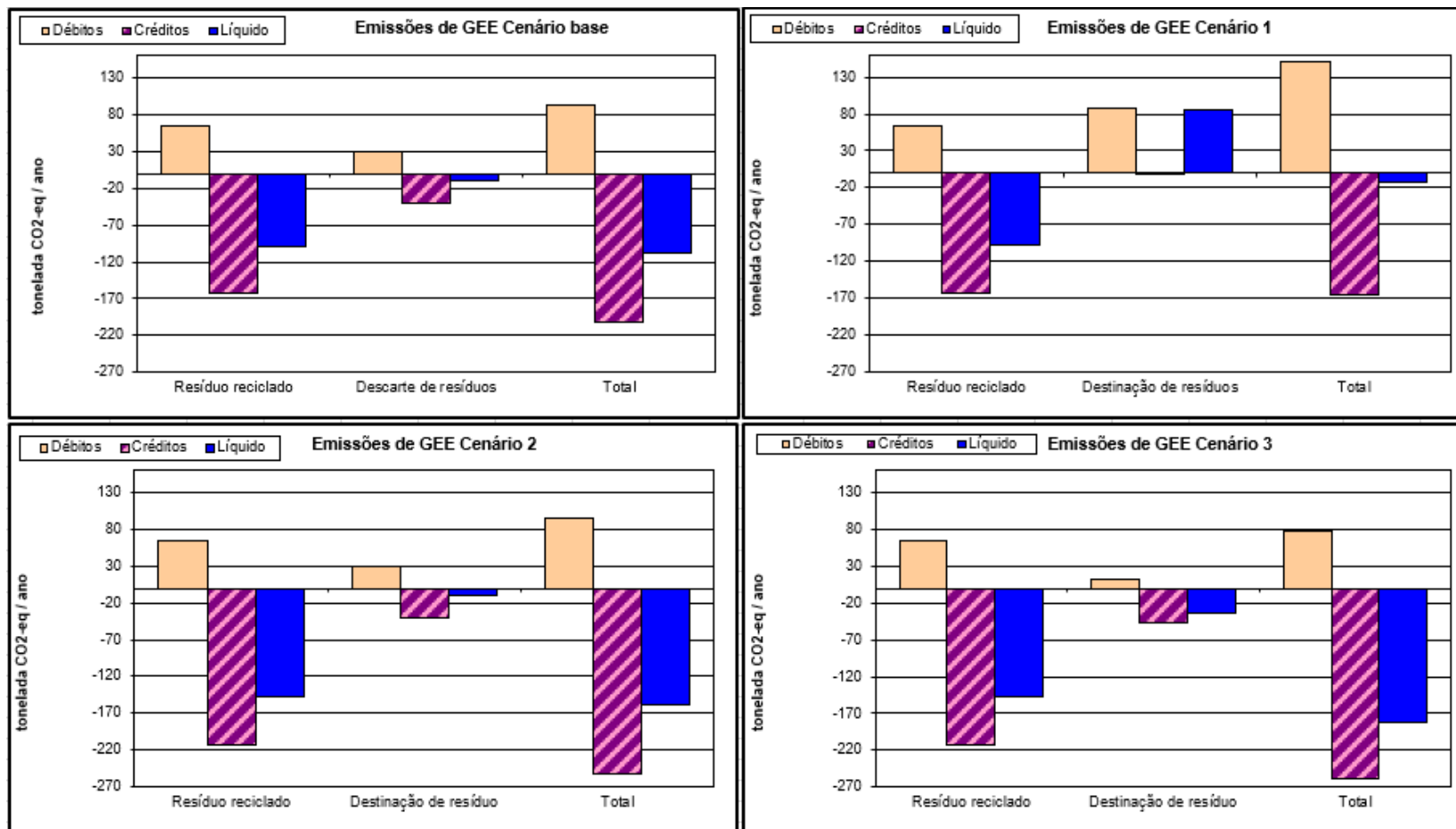
Cenário 2 (em t CO ₂ eq/ano)	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos
Resíduos reciclados			
Resíduos de alimentos	3	-1	2
Papel, papelão	46	-57	-11
Plásticos	12	-56	-44
Vidros	1	-1	0
Metais ferrosos	4	-98	-94
Tratamento e disposição final de resíduos			
Aterro sanitário	18	-1	18
CDR seco + rejeito aterro	10	-39	-28
Total	95	-252	-158

Cenário 1 (em t CO ₂ eq/ano)	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos
Resíduos reciclados			
Resíduos de alimentos	3	-1	2
Papel, papelão	46	-57	-11
Plásticos	12	-56	-44
Vidros	1	-1	0
Metais ferrosos	2	-47	-46
Tratamento e disposição final de resíduos			
Lixão	26	0	26
Aterro sanitário	61	-3	59
Total	151	-165	-13

Cenário 3 (em t CO ₂ eq/ano)	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos
Resíduos reciclados			
Resíduos de alimentos	3	-1	2
Papel, papelão	46	-57	-11
Plásticos	12	-56	-44
Vidros	1	-1	0
Metais ferrosos	4	-98	-94
Destinação de resíduos			
CDR seco + rejeito aterro	13	-47	-34
Total	78	-260	-181

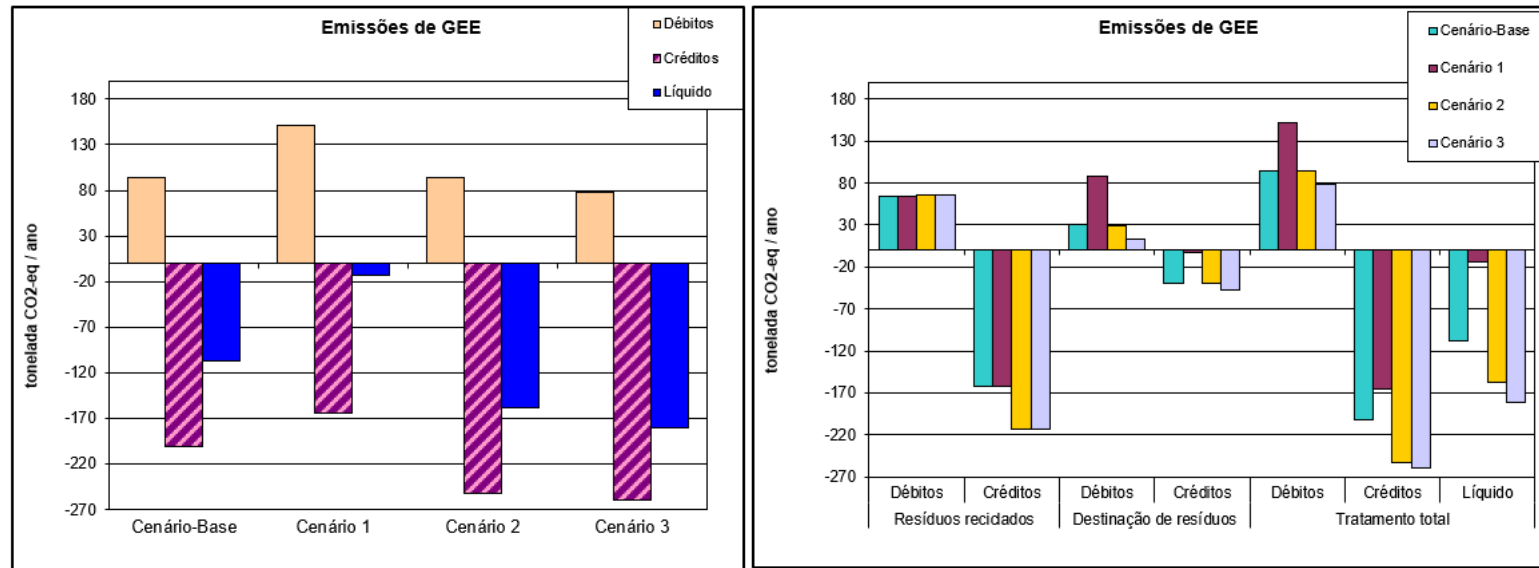
Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021)

Figura 6: Balanço das emissões de GEE nos cenários comparados



Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021)

Figura 7: Balanço total das emissões de GEE nos cenários comparados



Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021)

É possível notar que os resíduos de granalha reciclados contribuem para a redução das emissões de GEE, como mostrado no gráfico nos cenários 2 e 3, reduzindo o balanço líquido em cerca de 46%.

Na parte de destinação dos resíduos não reciclados, ao analisarmos o cenário 3, onde todo o resíduo não reciclado é enviado para coprocessamento, é notável que essa é a melhor destinação no que diz respeito à redução das emissões de GEE, correspondendo a uma redução de 15% das emissões de GEE em relação às destinações do cenário 2. De forma geral, o cenário 3 promoveu uma redução de 68% no balanço líquido de emissões em relação ao cenário base.

Como esperado, a disposição de resíduos em lixão é o maior contribuinte para as emissões de GEE. Ao analisarmos as emissões do cenário 1, que corresponde ao cenário nacional de destinação de resíduos sólidos urbanos, podemos observar um aumento de 88% das emissões de GEE em comparação com o cenário base.

5.2.2 Resíduo de resinas pós consumo

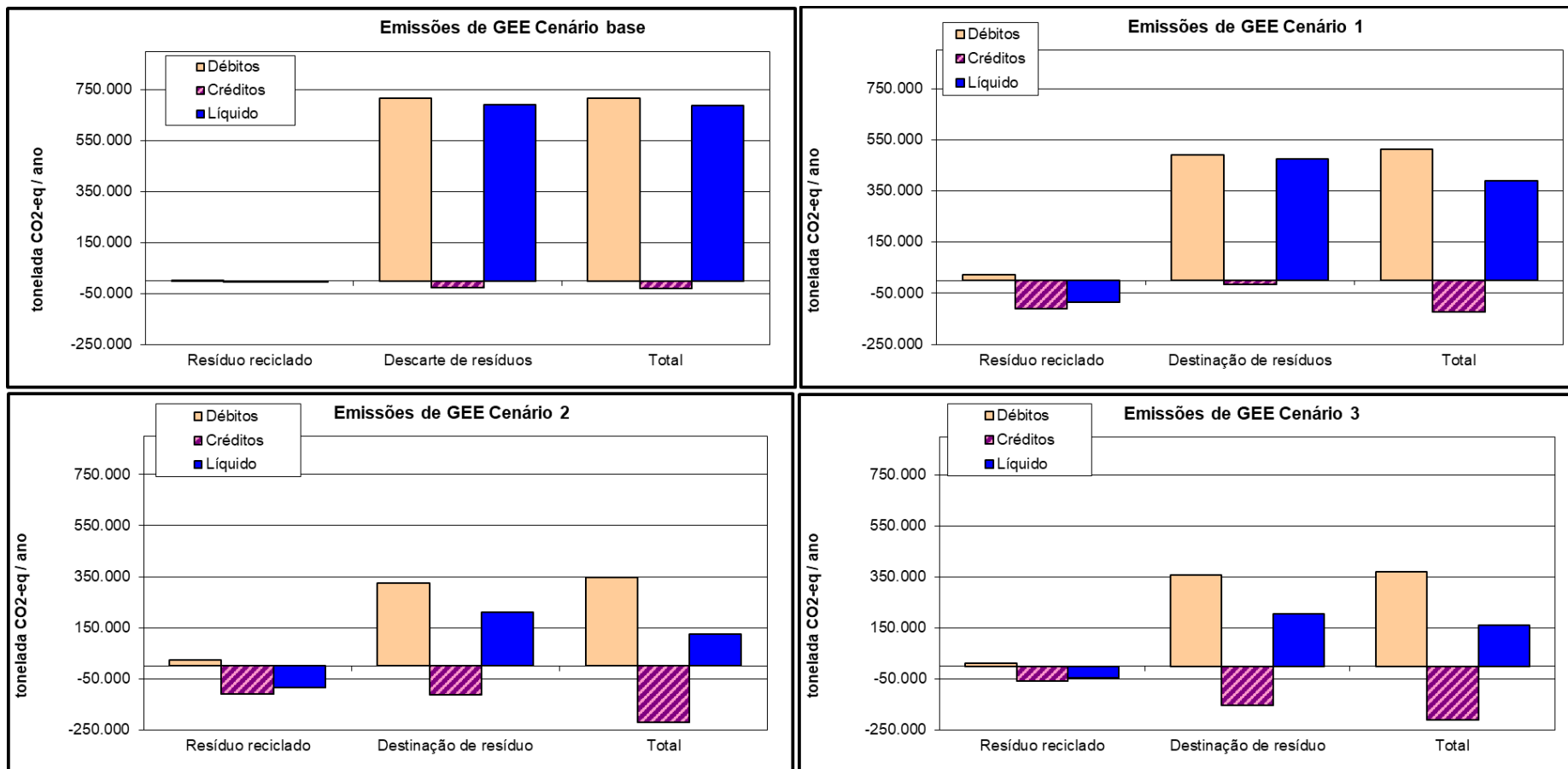
5.2.2.1 Discussão dos cenários

Tabela 7: Emissões dos cenários comparados

Cenário base (em t CO ₂ eq/ano)	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos	Cenário 1 (em t CO ₂ eq/ano)	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos
Resíduos reciclados				Resíduos reciclados			
Plásticos	789	-3.677	-2.888	Plásticos	23.400	-108.999	-85.599
Tratamento e disposição final de resíduos				Tratamento e disposição final de resíduos			
Lixão	158.794	0	158.794	Lixão	99.825	0	99.825
Aterro sanitário	557.663	-24.303	533.360	Aterro sanitário	389.502	-15.278	374.224
Total	717.246	-27.981	689.265	Total	512.728	-124.278	388.450
Cenário 2 (em t CO ₂ eq/ano)	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos	Cenário 3 (em t CO ₂ eq/ano)	Emissões	Emissões evitadas	Resultados líquidos
Resíduos reciclados				Resíduos reciclados			
Plásticos	23.400	-108.999	-85.599	Plásticos	12.335	-57.459	-45.123
Tratamento e disposição final de resíduos				Tratamento e disposição final de resíduos			
Aterro sanitário	253.946	-11.067	242.879	Lixão	62.316	0	62.316
CDR seco + rejeito aterro	70.635	-101.391	-30.756	Aterro sanitário	196.413	-8.560	187.853
Total	347.981	-221.457	126.524	CDR seco + rejeito aterro	100.159	-143.770	-43.612
				Total	371.224	-209.789	161.434

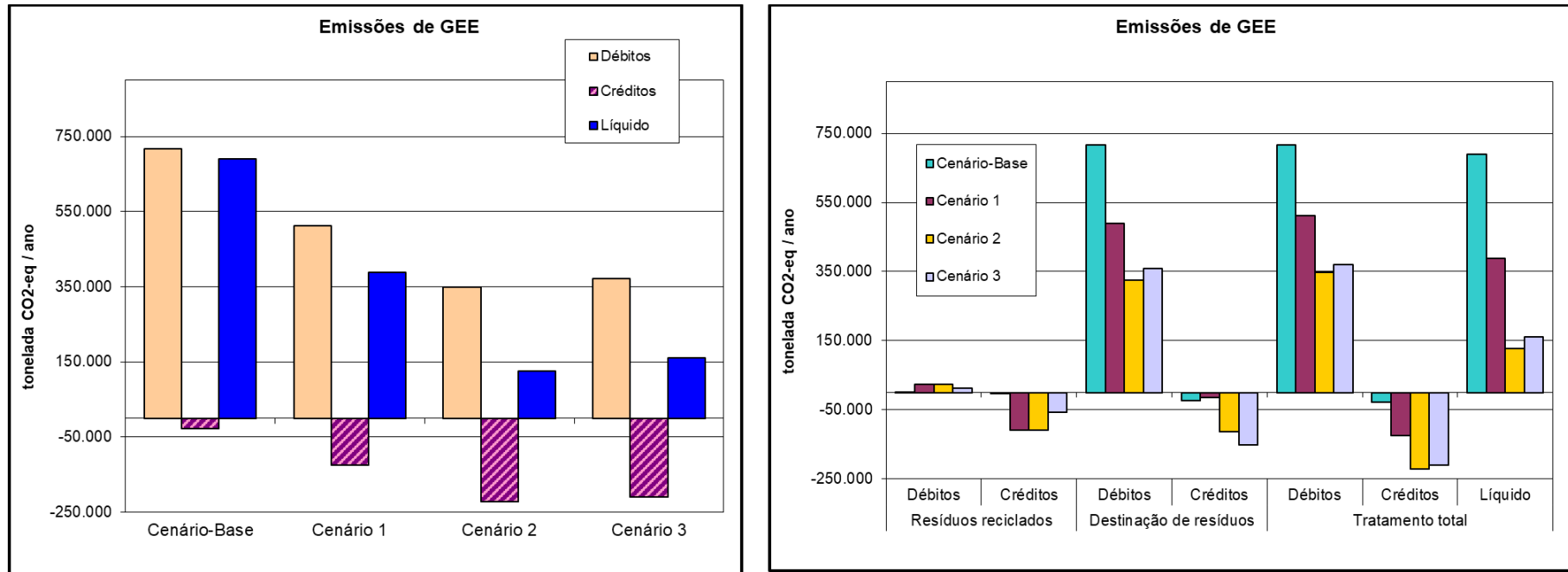
Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021)

Figura 8: Balanço das emissões de GEE nos cenários comparados



Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021)

Figura 9: Balanço total das emissões de GEE nos cenários comparados



Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021)

É possível observar, no cenário 1, que o volume reciclado com base na gestão alemã é capaz de reduzir em 44% o balanço líquido de emissões. Além disso, ao analisar os gráficos é possível concluir que o cenário base é o que causa maior impacto ambiental, devido ao grande volume de plásticos destinado a lixões, e o baixo volume reciclado.

É possível observar também que o cenário 2 é o que possui menor impacto ambiental no que diz respeito a emissões de GEE, isso se deve ao fato de não possuir volume de resíduos enviados a lixões, e também ao envio para coprocessamento, que assim como na destinação dos resíduos gerados na planta, é o melhor tratamento comparado nesse estudo visando a descarbonização no gerenciamento de resíduos sólidos, sendo capaz de reduzir em 55% as emissões do cenário 1. Além disso, de modo geral, o cenário 2 reduziu em 82% as emissões do cenário base.

No cenário 3, mais conservador e realista que o cenário 2, foi possível reduzir em 77% as emissões do cenário base, com créditos de valores próximos provenientes da reciclagem e do envio a coprocessamento.

6 Conclusões

Os resultados obtidos nesse trabalho se apresentaram conforme o esperado. O descarte de resíduos em lixões é uma grande mazela ambiental e a análise na calculadora de emissões corroborou essa tese. Além disso, é evidente que o impacto causado pelas emissões do descarte das resinas pós consumo é muito maior do que aqueles referentes a destinação dos resíduos sólidos provenientes do ambiente industrial. Isso se deve ao fato de o volume de resinas produzidas ser muito maior do que o volume de resíduos gerados, demonstrando uma certa eficiência do processo tecnológico de produção.

Em relação à destinação dos resíduos não reciclados, é possível concluir tanto para os resíduos gerados no espaço industrial quanto para os resíduos da resina pós consumo que o coprocessamento é a destinação mais adequada ao visar reduzir as emissões de GEE.

Ademais, é possível perceber que o gerenciamento utilizado na planta estudada causa menor impacto ambiental no que diz respeito as emissões de GEE do que o cenário brasileiro de gerenciamento de resíduos. Isso se deve ao fato de um grande volume de resíduos ser reciclado, nenhum volume ser destinado a lixões e grande parte ser destinada a coprocessamento, demonstrando a preocupação que a empresa manifesta em reduzir o impacto ambiental inerente aos processos petroquímicos.

Em relação à ferramenta utilizada, foram feitas algumas aproximações. Dessa forma, uma oportunidade de melhoria na metodologia para trabalhos futuros é a implementação de dados mais detalhados para cada classificação de resíduos existente na planta. Além disso, poderiam ser adicionados na calculadora outros métodos de gerenciamento de resíduos sólidos, como a pirólise.

REFERÊNCIAS

Brasil é o 4o maior produtor de lixo plástico do mundo e recicla apenas 1%. Disponível em: <<https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/revitalizacao-de-bacias/brasil-e-o-4o-maior-produtor-de-lixo-plastico-do-mundo-e-recicla-apenas-1>>. Acesso em: 10 jul. 2023

CPMRS-RMB. Como e por que reaproveitar seus resíduos? Disponível em: <<https://www.cpmrsmb.ce.gov.br/informa/46/como-e-por-que-reaproveitar-seus-residuos>>. Acesso em: 10 jul. 2023

DE JABOTICABAL, C.; BARBOSA DA CUNHA, P.; CARDOSO, S. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA -UNESP FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS Avaliação de um sistema híbrido de produção de biogás. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/96513/000737516.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

FALCÃO DE SÁ, P. et al. Eng Sanit Ambient | v.23 n.1 | jan/fev. p. 101–111, 2018.

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler / RS ::... Disponível em: <http://ww3.fepam.rs.gov.br/consema/Res_009-2000_Nor_Tec_An.asp>. Acesso em: 29 jul. 2023.

Instituto E+ Transição Energética (2022): Descarbonização do Setor de Energia no Brasil. Rio de Janeiro/RJ – Brasil

LINS, L. P. et al. O aproveitamento energético do biogás como ferramenta para os objetivos do desenvolvimento sustentável. Interações (Campo Grande), p. 1275–1286, 22 dez. 2022.

MONTENEGRO, P. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS ANÁLISE PARA O ACEITE DE RESÍDUOS PARA CO-PROCESSAMENTO EM FORNOS DE CLÍNQUER. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/283M.PDF>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

NEPER. Digestão anaeróbia -. Disponível em: <<http://neper.shs.eesc.usp.br/digestao-anaerobia/>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

PAULO, J. et al. INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v17n1/v17n1_artigo4.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2023.

PEREIRA, R. et al. TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS E MERCADOLÓGICAS DOS PRINCIPAIS PRODUTOS PETROQUÍMICOS BÁSICOS: ETENO E PROPENO. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_7_3_0301-1.pdf>.

QUARESMA BASTOS, B. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9732/1/monopoli10007270.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

ROYER, S.-J. et al. Production of methane and ethylene from plastic in the environment. PLOS ONE, v. 13, n. 8, p. e0200574, 1 ago. 2018. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0200574>. Acesso em: 02 ago. 2023.

SETIC-UFSC. Espaço de Ciência e Tecnologia de Joinville. Disponível em: <<https://ect.joinville.ufsc.br/inicio/atracoes/energias/biomassa/>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

SILVA, J. L. Modelagem e simulação de reatores autoclave para produção de PEBD. www.lume.ufrgs.br, 2012.

WERNECK, R. et al. POLIETILENO VERDE. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v24n1/v24n1_artigo1.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2023

ANEXO A

Tabela A.1: Fatores de multiplicação para o potencial de aquecimento global.

	Metano fóssil	Metano renovável	Óxido nitroso	Referência
Segundo Relatório de Avaliação	21	21	310	(IPCC, 1996)
Terceiro Relatório de Avaliação	23	23	296	(IPCC, 2001)
Quarto Relatório de Avaliação	25	25	298	(IPCC, 2007)
Quinto Relatório de Avaliação	30	28	265	(IPCC, 2013)

Fonte: Manual da Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021)

Tabela A.2: Fatores de emissão específicos

kg CO ₂ eq/t Resíduo	Resíduo orgânico		Papel e papelão	Vidro	Metais ferrosos	Alumínio	Plástico
	Biodigestão	Compostagem					
Emissões (produção primária)	90	95	1.256	483	64	697	410
Emissões evitadas (reciclado)	24	24	1.548	604	1.712	9.880	1.910
Resultado líquido	66	71	-292	-121	-1.648	-9.183	-1.500

Fonte: Manual da Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021)

Tabela A.3: Teor de carbono para frações de resíduos

Fração	C total	C fóssil
Resíduos de alimentos	15,2%	0%
Resíduos de jardins e parques	19,6%	0%
Papel, papelão	41,4%	1%
Plásticos	75,0%	100%
Vidros	0%	0%
Metais Ferrosos	0%	0%
Alumínio	0%	0%
Têxteis	40,0%	20%
Borrachas, couro	56,3%	20%
Fraldas	28,0%	10%
Madeira	42,5%	0%
Resíduos minerais	0,0%	0%
Outros	2,7%	100%

Fonte: IPCC 2006