

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (ACV) DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

NOGUEIRA, H. S.¹; RIBEIRO, B. N.¹; CORDEIRO, V. N.¹; FREITAS, G. G.¹; CONCEIÇÃO, G. N.¹;
DANGELO, J. V. H.²

¹Grupo PET-EQ, Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP; ²Tutor do Grupo PET-EQ, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Cidade Universitária Zeferino Vaz. E-mails: h242305@dac.unicamp.br, petfeq@unicamp.br, dangelo@unicamp.br.

RESUMO No Brasil, em termos de reciclagem de resíduos sólidos urbanos (RSU) apenas 4% dos 82,5 milhões de toneladas geradas em 2022 foram recicladas, em contraste com índices significativamente mais elevados em países como a Alemanha, que recicla 67% de seus resíduos. O Projeto Comunidade do Grupo PET-EQ da UNICAMP é uma iniciativa em parceria com a *startup* Catalog, que visa analisar o ciclo de vida de materiais recicláveis - como plásticos, vidro, papel e alumínio - para quantificar as emissões de CO₂ ao longo de suas cadeias produtivas. Através de análises laboratoriais e ferramentas digitais, são calculadas as emissões de gases de efeito estufa em diversos cenários de reciclagem. Os resultados esperados visam contribuir para o desenvolvimento de um aplicativo que automatiza os cálculos de pegada de carbono, promovendo a conscientização sobre a reciclagem e incentivando a colaboração entre consumidores e empresas. As conclusões almejam reforçar a responsabilidade compartilhada na gestão de resíduos e a importância de políticas públicas eficazes para a reciclagem.

Palavras-chave: reciclagem; resíduos sólidos urbanos; ciclo de vida; emissões de CO₂.

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF URBAN SOLID WASTE (USW)

ABSTRACT: In Brazil, only 4% of the 82.5 million tons of urban solid waste (USW) generated in 2022 was recycled, in contrast to significantly higher rates in countries like Germany, which recycles 67% of its waste. Projeto Comunidade is a project of Grupo PET-EQ from UNICAMP which is an initiative in partnership with the startup Catalog, aiming to analyze the life cycle of recyclable materials - such as plastics, glass, paper and aluminum - in order to quantify CO₂ emissions throughout their production chains. Through laboratory analysis and digital tools, greenhouse gas emissions are calculated in various recycling scenarios. The expected results aim to contribute to the development of an application that automates carbon footprint calculations, promoting awareness of recycling and encouraging collaboration between consumers and companies. The conclusions aim to reinforce shared responsibility in waste management and the importance of effective public policies for recycling.

Keywords: recycling; urban solid waste; life cycle; CO₂ emissions.

1. INTRODUÇÃO

A reciclagem de resíduos sólidos é um tema central na busca por um futuro sustentável, especialmente em um cenário global marcado por mudanças climáticas severas e a crescente escassez de recursos naturais. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2023), em 2022, apenas 4% das 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no Brasil foram reciclados. Este índice é alarmante, especialmente quando comparado a outros países em desenvolvimento, como Chile

e Argentina, que registram taxas de reciclagem próximas a 16%. Países desenvolvidos, como a Alemanha, atingem impressionantes 67%, o que demonstra que o Brasil ainda pode avançar muito na gestão desse tipo de resíduos.

Nesse contexto, o Projeto Comunidade do Grupo PET-EQ da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, em colaboração com a *startup* Catalog, busca desenvolver soluções inovadoras focadas na logística reversa e em práticas sustentáveis para empresas de embalagens pós-consumo. A extensão universitária, um dos pilares do Programa de Educação Tutorial da UNICAMP, tem o objetivo de desenvolver projetos e parcerias com a sociedade, disseminando o conhecimento acadêmico, devolvendo à sociedade os investimentos realizados nas instituições de ensino públicas, gerando impactos positivos, tanto sociais como ambientais.

O projeto envolve um estudo abrangente do ciclo de vida de diversos materiais, como plásticos, vidro, papel, papelão e alumínio, com o objetivo de quantificar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas a cada etapa do ciclo de vida, desde a aquisição pelo consumidor até a destinação final em cooperativas de reciclagem. A análise leva em conta não apenas as emissões diretas, mas também o impacto da degradação anaeróbia em aterros, que produz metano e CO_2 , ambos potentes gases de efeito estufa (FERNANDES, 2010).

Um dos focos principais é avaliar quanto das emissões de gases de efeito estufa (GEE) poderia ser evitado com a adoção da plataforma Catalog. Para isso, a pesquisa utiliza dados das condições atuais do Brasil, ferramentas de cálculo disponíveis no mercado e recursos laboratoriais da universidade para caracterização e pesagem dos resíduos. Informações detalhadas sobre peso, tipo de material, volume e distância de transporte até os centros de distribuição e tratamento de resíduos (CDTR) também são coletadas.

Além disso, o projeto busca não apenas promover a reciclagem, mas também recompensar os consumidores pelo cumprimento de suas responsabilidades cívicas, promovendo um senso de coletividade e responsabilidade compartilhada com as empresas produtoras.

2. METODOLOGIA

O projeto está estruturado em três etapas principais: geração e segregação na residência, coleta seletiva e logística reversa. As duas últimas etapas são o foco principal, onde serão analisadas as emissões de CO_2 , além do consumo de água e energia elétrica. A metodologia é baseada na Análise de Ciclo de Vida (ACV), proporcionando uma avaliação detalhada do impacto ambiental dos materiais.

Na primeira etapa, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica para reunir informações sobre os componentes das embalagens estudadas. Em seguida, foram realizados balanços de massa com o intuito de quantificar as emissões de CO_2 em cada etapa do ciclo de vida desses materiais. Além disso, foram levantados dados referentes ao consumo de água e energia durante o processo de reciclagem mecânica das embalagens, abrangendo as etapas de lavagem, pré-

secagem, secagem, aglutinação, extrusão e transformação. Para complementar, procedeu-se à caracterização física das embalagens, analisando sua massa, volume e cor, visando facilitar o processo de reciclagem e otimizar a cadeia de valor associada a essas embalagens. Dessa forma, foram obtidos resultados e respostas esperadas para o projeto de ACV (MOTTA, 2013). Ao fim desse processo, obteve-se uma base concreta para o início das pesquisas laboratoriais e computacionais.

Na segunda etapa do projeto, foi elaborada uma análise detalhada da composição física e química dos resíduos sólidos. Esses materiais foram analisados em laboratório, com foco na obtenção de valores precisos de massa e volume, levando em consideração as incertezas inerentes às medidas. Com base tanto nas pesquisas laboratoriais quanto nas pesquisas bibliográficas, foi feita também a caracterização completa dos materiais que compõem as embalagens, incluindo o rótulo e a tampa, que possuem constituições diferentes.

Na terceira etapa do projeto, foi conduzida uma análise das emissões geradas durante a produção e o descarte desses resíduos, utilizando tanto ferramentas de *software* quanto planilhas eletrônicas. O *software* OpenLCA, um programa *open source* especializado em *Life-Cycle Assessment* (LCA), foi empregado para desenvolver um processo detalhado do ciclo de vida das embalagens. Esse processo incluiu desde a matéria-prima, representada pelos resíduos gerados nas residências, até sua segregação e envio ao Centro de Distribuição e Tratamento de Resíduos (CDTR). Foram criados modelos para cada etapa da produção dos materiais, incluindo os reagentes e produtos envolvidos, permitindo a geração de um sistema completo do ciclo de vida. A partir desse modelo, o OpenLCA forneceu relatórios detalhados com as emissões de CO₂ e consumo de energia.

Em paralelo, foi utilizada a “*Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil*”, disponibilizada no *site* do Ministério das Cidades (2024) a qual é uma ferramenta de simulação de emissões de GEE desenvolvida primeiramente na Alemanha em 2009 pelo Ifeu-Institut, que posteriormente foi adaptada para o Brasil, comissionado pelo projeto ProteGEEr. Por meio dessa ferramenta, foram realizados cálculos detalhados de emissões de CO₂ e consumo de energia.

Quatro cenários distintos foram analisados nesta etapa. No cenário base, foi utilizado um índice de reciclagem de resíduos sólidos no Brasil, de 4%, conforme dados da ABRELPE. No Cenário 1, foi utilizado um índice de 15%, enquanto no Cenário 2, foi utilizado um índice de 25%, que é a meta projetada para o Brasil até 2025. No Cenário 3, utilizou-se um índice de 50%, que corresponde à previsão de reciclagem do país para o ano de 2042. Cada cenário incluiu dois tipos de cálculo: um que simula o processo de segregação assumindo a coleta seletiva, e outro que modela o processo de reciclagem para cada material. Não obstante, vale ressaltar que foi adotada no estudo, uma estimativa de 5 quilômetros de distância entre o gerador e o CTDR. Esse valor adotado se dá devido às novas formas de mobilidade adotadas pelas cidades, chamada de “cidade de 15 minutos”, que incentiva o uso de transporte público não poluente e a oferta de serviços distribuídos estrategicamente pelas cidades.

Por fim, foi elaborado um memorial de cálculo, no qual todos os passos metodológicos adotados foram detalhadamente descritos, culminando com a apresentação dos resultados finais obtidos ao longo do estudo.

Ao final do estudo, foram gerados uma planilha e um documento explicativo que serviram como ferramentas de apoio para decisões relacionadas à economia circular e à redução das emissões de gases de efeito estufa. Esse esforço foi particularmente relevante devido à escassez de dados precisos sobre resíduos, um dos desafios enfrentados na gestão ambiental.

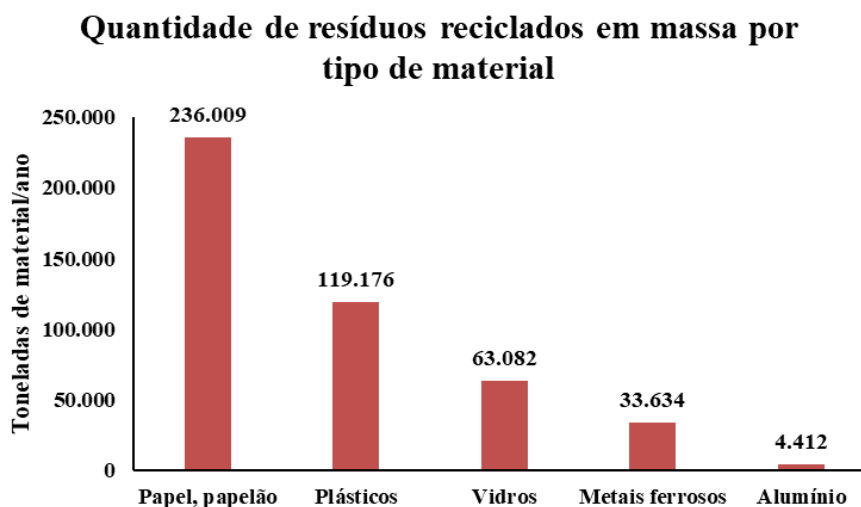
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos dados coletados e analisados, foi possível estimar as emissões de GEE associadas ao descarte e à reciclagem de resíduos no estado de São Paulo, em 2023. Das 748,9 mil toneladas de recicláveis descartados, cerca de 61% são efetivamente reciclados, o que corresponde a aproximadamente 456,8 mil toneladas. No entanto, uma quantidade significativa de resíduos recicláveis é desperdiçada, o que representa uma oportunidade valiosa de desenvolvimento da economia circular.

Através da análise granulométrica dos resíduos sólidos descartados no estado de São Paulo é possível obter a emissão líquida de GEE por material, dada por toneladas de CO₂ por ano. A partir disso, é possível extrair informações como qual material seria mais benéfico de ser reciclado e qual material é mais reciclado em massa.

Na Figura 1 é apresentado o total de massa reciclada em toneladas, por tipo de material. Esses dados são referentes às 456,8 mil toneladas recicladas no Estado de São Paulo em 2023, com a maior fração composta por papel, seguido pelo plástico.

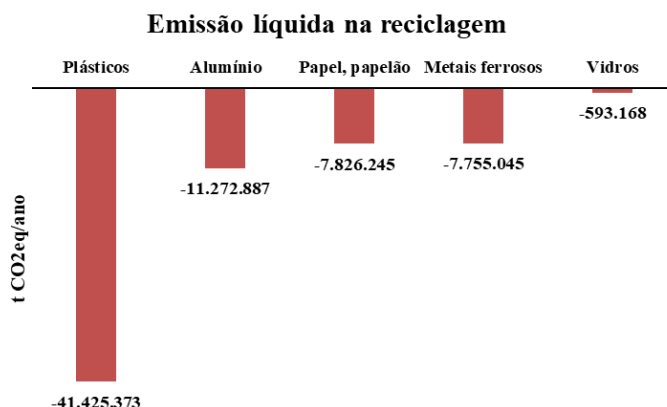
Figura 1 - (a) Gráfico de massa reciclada por tipo de material. (b) Gráfico de Emissões líquidas (tCO₂eq/ano).



Fonte: Autoria própria. (Grupo PET-EQ UNICAMP/2024)

Já na Figura 2, evidencia-se uma análise da emissão líquida de CO₂, em toneladas por ano, para os mesmos materiais, representando a diferença entre as emissões geradas e evitadas. A partir disso, pode-se inferir que os polímeros plásticos apresentam uma vantagem significativa em termos de créditos de carbono. Embora não sejam reciclados em maior quantidade em termos de massa, evitam uma maior quantidade de emissões de CO₂ para a atmosfera. Portanto, a partir dessa análise de dados, é possível depreender que uma maior quantidade de massa reciclada não necessariamente equivale a uma maior efetividade na mitigação de GEE.

Figura 2 - Gráfico de Emissões líquidas em tCO₂eq/ano.

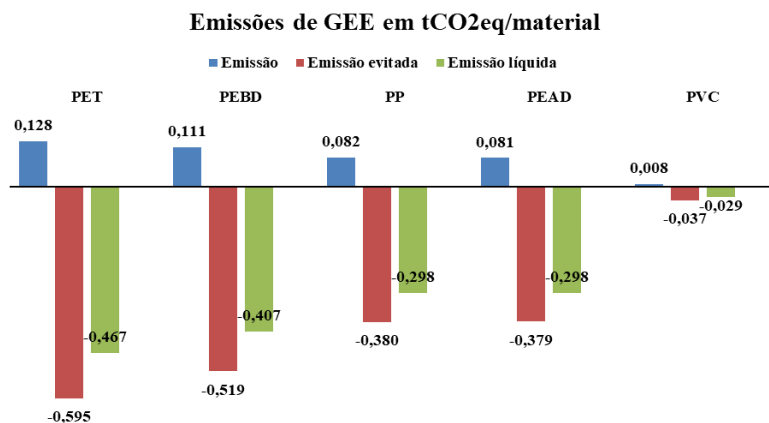


Fonte: Autoria própria. (Grupo PET-EQ UNICAMP/2024)

Embora os estudos realizados comprovem que há uma reciclagem eficiente dos outros tipos de materiais (vidros e metais), estes não foram abordados nesse trabalho, uma vez que o volume desses materiais reciclados, em comparação com a quantidade de créditos de carbono adquiridos, é significativamente menor que observada nos plásticos.

Seguindo agora com a avaliação das emissões de CO₂ equivalente, em toneladas, em cinco tipos diferentes de polímeros: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno tereftalato (PET), polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC), a Figura 3 mostra uma comparação entre as emissões para produzir o material; aquelas que são evitadas com a reciclagem e a emissão líquida (diferença entre as duas anteriores).

Figura 3 - Emissões de GEE em tCO₂eq/material.



Fonte: Autoria própria. (PET -EQ Unicamp/2024)

O polímero com melhor retorno quando reciclado é o PET, apresentando uma emissão líquida de -0,467 tCO₂eq/ano, seguido pelo PEBD. Considerando que esses polímeros têm as maiores frações de reciclagem realizadas — 31% para o PET e 27% para o PEBD —, ambos desempenham um papel importante na eficácia da reciclagem de materiais.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou a situação crítica da reciclagem de resíduos sólidos urbanos no Brasil, onde apenas uma pequena fração dos resíduos gerados é efetivamente reciclada. A análise de ciclo de vida (ACV) realizada pelo Grupo PET-EQ da UNICAMP, em colaboração com a *startup* Catalog, revela a importância de identificar quais materiais oferecem maior potencial para a mitigação das emissões por meio da reciclagem.

Os dados obtidos mostram que embora o papel apresente o maior índice de reciclagem em massa, os polímeros plásticos (PET e PEBD) apresentam maior vantagem em termos de créditos de carbono. Isso destaca a necessidade de estratégias de gestão de resíduos que priorizem a reciclagem desses materiais, dada sua importância na redução das emissões de CO₂.

Os resultados obtidos reforçam a necessidade de políticas públicas eficazes que incentivem a reciclagem e a responsabilidade compartilhada na gestão de resíduos. A implementação de tais políticas pode contribuir significativamente para a construção de uma economia circular mais robusta e para o avanço do Brasil rumo a um futuro mais sustentável. Acredita-se que as informações geradas contribuirão para uma maior conscientização sobre práticas de reciclagem e sustentabilidade, beneficiando consumidores, empresas e prefeituras, e fortalecendo a colaboração entre os setores público e privado.

5. REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Anuário da reciclagem 2023*. São Paulo: ABRELPE, 2023.

FERNANDES, L.F.R. **Determinação do Balanço Energético e de Gases do Efeito Estufa (GEE) em função do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

MINISTÉRIO DAS CIDADES – Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer/calculadora-de-200bemissoes-de-gases-de-efeito-estufa-gee-no-manejo-de-rsu>. Acessado em 27 de setembro de 2024.

MOTTA, H.W. *Análise do Ciclo de Vida e Logística Reversa*. **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, out. 2013.