

Análise do Ciclo de Vida da Produção do Combustível Derivado de Resíduos Urbanos (CDRU) em Aterro Sanitário para Coprocessamento

Flávio Leôncio Guedes ¹
Doutorando, UFPE, Recife-PE, Brasil, f_l_guedes@hotmail.com

José Fernando Thomé Jucá ¹
Doutor, UFPE, Recife-PE, Brasil, jucah@ufpe.br

Soraya Giovanetti El-Deir ²
Doutora, URFPE, Recife-PE, Brasil, sorayaeldeir@gmail.com

RESUMO: A eficiente gestão de resíduos permite a redução da emissão Gases de Efeito Estufa (GEE) à atmosfera. Os resíduos dispostos em aterros sem tratamento contribuem significativamente para a intensificação da emissão de GEE. O combustível derivado de resíduos (CDR), é um termo aplicado a materiais que possuem valor calorífico elevado que não são aproveitados durante o processo de reciclagem. Na indústria de cimento, o CDR é aplicado como permuta aos combustíveis fósseis como o coque de petróleo, representando a segunda principal alternativa do setor. O estudo buscou a quantificação das emissões a partir da produção de CDR, considerando para a quantidade CO_{2-eq} por produção mensal de CDR. A comparação entre dois casos de combustíveis utilizados nos fornos de produção de cimento, foi realizada pelo método internacionalmente padronizado de ACV. O processo de produção se destacou por apresentar os maiores impactos positivos na categoria relacionada às mudanças climáticas devido às emissões evitadas na substituição do combustível fóssil e à redução da exploração de petróleo. O objetivo dessa pesquisa foi verificar o impacto da emissão de carbono para atmosfera do ciclo processual do CDR e realizar uma análise comparativa dos impactos ambientais nos ciclos de vida do CDR e do Coque de Petróleo.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Sólidos, Combustível, CDR, ACV, Energia Térmica.

ABSTRACT: Among Efficient waste management allows the reduction of Greenhouse Gases (GHG) emissions into the atmosphere. Waste disposed of in untreated landfills significantly contributes to the intensification of GHG emissions. Waste-derived fuel (RDF) is a term applied to materials that have a high calorific value that are not used during the recycling process. In the cement industry, CDR is applied as an exchange for fossil fuels such as petroleum coke, representing the second main alternative in the sector. The study sought to quantify emissions from RDF production, considering the amount of CO_{2-eq} per monthly CDR production. The comparison between two combustible cases used in cement production furnaces was carried out using the internationally standardized LCA method. The production process stood out for presenting the greatest positive impacts in the category related to climate change due to the emissions avoided when replacing fossil fuels and the reduction in oil exploration. The objective of this research was to verify the impact of carbon emissions into the atmosphere from the RDF process cycle and to carry out a comparative analysis of the environmental impacts on the life cycles of RDF and Petroleum Coke.

KEYWORDS: Solid Waste, Fuel, RDF, ACV, Thermal Energy.

1 INTRODUÇÃO

O desafio do aumento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) está presente em todas as cidades brasileiras. Uma gestão eficaz dos RSU permite à municipalidade reduzir a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, especialmente no que se refere às abordagens tecnológicas a serem adotadas antes da disposição final (Luiz e Suski, 2021; Juca, 2014). Os resíduos descartados sem tratamento em aterros sanitários contribuem significativamente para o aumento da emissão de GEE, da contaminação do ar, da poluição das águas, bem como para o agravamento de problemas de saúde pública (Thakur et al., 2018).

Entre as diversas maneiras de disposição de RSU, o aterro sanitário é atualmente o método mais prevalente e amplamente empregado (Fugii, 2019). No entanto, de acordo com as orientações da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), os aterros são uma alternativa para a disposição final dos rejeitos. A legislação também estipula uma hierarquia para as formas de destinação de resíduos, que engloba reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético, além de outras opções aprovadas pelos órgãos ambientais (Juca et al., 2020; Silva et al., 2020; Costa, 2020).

Conforme apontado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2006), o aumento da disposição de RSU em aterros sanitários é responsável pelo crescimento das emissões de GEE. Um aterro sanitário pode ser caracterizado como um reator biológico, no qual a decomposição da matéria orgânica resulta na emissão de vários gases, incluindo o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), sendo esses gases originados da decomposição anaeróbica dos compostos biodegradáveis presentes nos resíduos orgânicos (Gama et al., 2019).

Segundo Jucá et al. (2014), uma solução para essa problemática seria o uso de resíduos não utilizados durante o processo de reciclagem, porém com valor energético, por meio da conversão destes em Combustível Derivado de Resíduo (CDR), a fim de serem utilizados, por exemplo, nas indústrias de produção de cimento. Nesse contexto, o CDR emerge como uma alternativa sustentável para a indústria do cimento, oferecendo uma abordagem ecologicamente consciente para a gestão de resíduos e ao mesmo tempo contribuindo para a redução das emissões de GEE associadas à queima de combustíveis fósseis.

Assim, a análise de emissão de GEE por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta fundamental para orientar a seleção da melhor alternativa no tratamento RSU e compreender os impactos potenciais associados ao uso de combustíveis alternativos, como o CDR. Ao quantificar e analisar os GEE emitidos ao longo do ciclo de vida de produtos, é possível avaliar os impactos ambientais desde a fabricação até o consumo, incluindo etapas como manufatura, uso, distribuição, reciclagem e tratamentos pós-consumo. A ACV permite comparar e estimar os potenciais impactos ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva, conforme destacado por (Dutra et al., 2019).

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi verificar o impacto da emissão de carbono para atmosfera do ciclo processual do CDR e realizar uma análise comparativa dos impactos ambientais nos ciclos de vida do CDR e do Coque de Petróleo.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da área de Estudo

O município do Paulista (Figura 1) está localizado a 15,5 km ao norte da capital de Pernambuco, sendo pertencente à Região Metropolitana de Recife (RMR), sob as coordenadas geográficas: Latitude $7^{\circ}56'24''$ Sul e Longitude $34^{\circ}52'20''$ Oeste. Esta ocupa uma área territorial de 96,979 km², com população estimada para 2020 de 334.376 habitantes. O Produto interno bruto (PIB) municipal per capita é de 12.240,33, estando o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) no valor de 0,732 (IBGE, 2020).

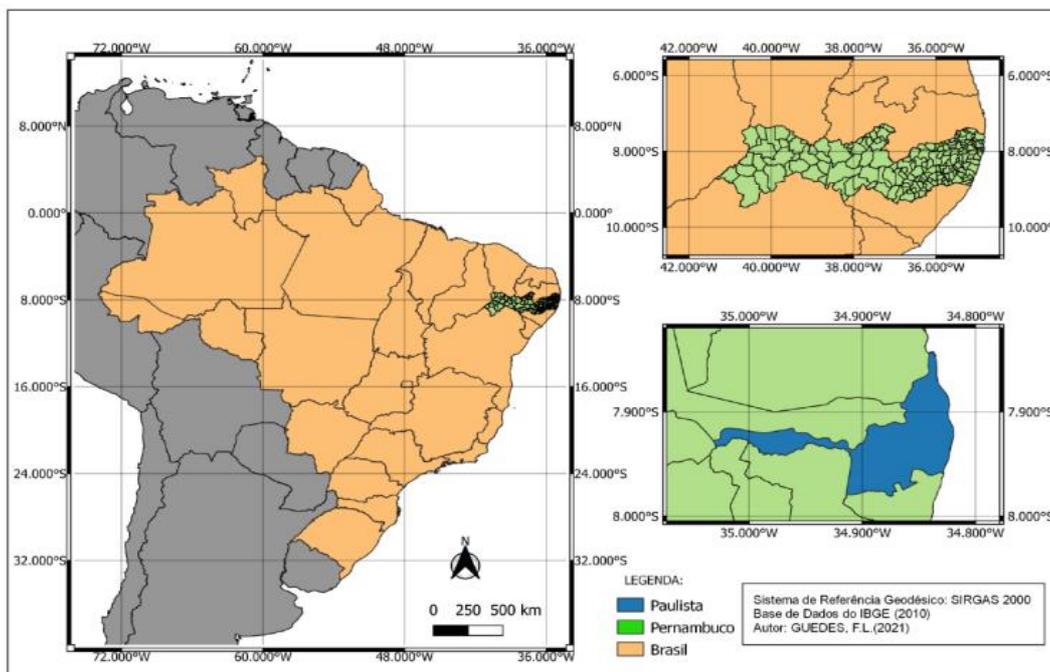


Figura 1. Mapa de Localizaõa do Município de Pulista-PE

2.2 Avaliação de Ciclo de Vida

Para obter uma compreensão completa dos impactos ambientais resultantes de práticas produtivas, foi conduzida uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Este estudo seguiu as diretrizes das normas ISO NBR 14040 (ABNT, 2014a) e ISO NBR 14044 (ABNT, 2014b), conforme estabelecido pela norma ISO NBR 14067 (ABNT, 2018), que regula estudos de Pegada de Carbono (PC) para avaliação do impacto das Mudanças Climáticas. Para calcular a PC, aplicou-se uma equação para converter as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em toneladas de CO₂ equivalente, onde as emissões de GEE são a soma das emissões de cada gás multiplicadas pelo seu Potencial de Aquecimento Global. A realização de estudos de ACV é recomendada para quantificar a Pegada de Carbono associada aos processos de produção (Melquíades et al., 2019). A técnica de ACV compreende quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados (Figura 2).

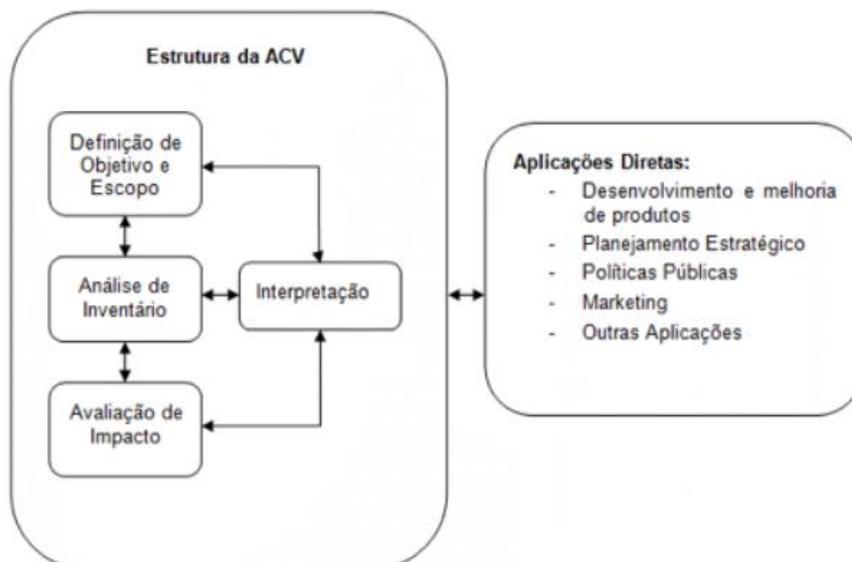


Figura 2. Fases da avaliação do ciclo de vida.

O escopo deste estudo abrange um sistema de tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) para a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), englobando as etapas de transporte, triagem, tratamento e utilização. A unidade funcional refere-se ao processo produtivo de CDR por tonelada por mês, a partir dos RSU coletados em Paulista-PE, utilizando dados do ano base de 2019 e análise gravimétrica realizada em 2018 (Tavares, 2018).

Os procedimentos de transporte do Município de Paulista-PE até a Central de Tratamento de Resíduos, juntamente com as fases de triagem (manual e automática) e produção de CDR, compõem a fronteira da primeira fase do estudo, onde se examina o impacto do processo. Nesta etapa, uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) parcial foi realizada, focalizando na análise da Pegada de Carbono da gestão de RSU para a produção de CDR. Optou-se por elaborar um Inventário do Ciclo de Vida (ICV), composto pelas duas primeiras etapas da ACV: definição de objetivo e escopo, e análise de inventário. Quando o ICV é limitado ao processo dentro das empresas, é denominado um estudo "do berço ao portão da indústria" (Verschoor; Reijnders, 1999). Portanto, este estudo considerou a ACV do berço ao portão, quantificando o impacto ambiental do CDR desde o transporte do RSU até o produto final pronto para comercialização.

A segunda fase deste estudo aborda uma análise da cadeia de produção e consumo, desde a extração de recursos até a disposição final, com a queima nos fornos das fábricas de produção de cimento como destino final. Além disso, para efeitos de comparação, também foi realizado um ICV do coque de petróleo, o combustível fóssil mais utilizado na indústria cimenteira para queima. Nesta etapa, foi considerada a ACV do berço ao túmulo, utilizando o procedimento proposto por Rocha et al. (2009) para analisar as entradas e os aspectos ambientais do Ciclo de Vida de um produto na cadeia de suprimentos de combustíveis de transporte. Isso envolveu as seguintes fases: definição da abrangência e dimensões, coleta de dados para a análise do inventário, avaliação da qualidade dos dados e, por fim, comparação dos resultados obtidos.

O estudo considerou três níveis de detalhamento: macro, meso e micro estágios (Figura 3). Essa abordagem permite refinamentos sucessivos à medida que há um maior detalhamento dos estágios e dos processos. As comparações entre os ciclos de vida do CDR e do Coque foram realizadas no nível meso-estágio, pois os processos na fase de micro-estágio são específicos para cada ciclo de vida (Rocha et al., 2014). A análise comparativa seguiu os passos descritos por Rocha et al. (2014), utilizando os valores obtidos da ACV do Coque de Petróleo, com adaptação na estimativa de emissões de tCO₂ na etapa de transporte da fonte de energia para a área de estudo.

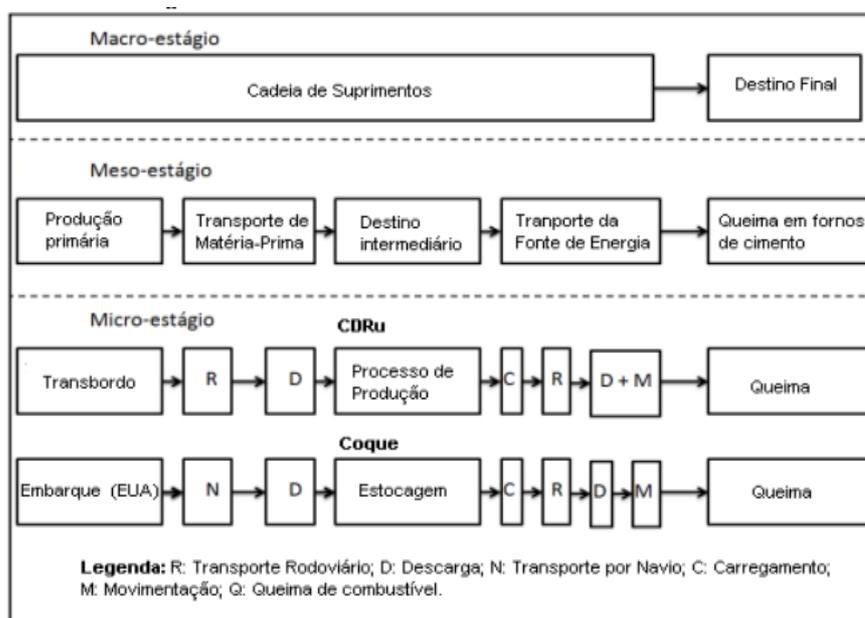


Figura 3. Níveis de detalhamento do modelo de ciclo de vida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de produção de CDR no CTR-PE, foram examinados os fluxos de matéria e energia em diversas etapas, incluindo transporte, triagem manual e processos automáticos na planta. Estes processos abrangem trituração primária, peneiramento, remoção magnética de materiais ferrosos e não ferrosos, classificação com uso de sensores óticos, trituração secundária e armazenamento. Como resultado, obtém-se uma fração de combustível com alto poder calorífico e composição livre de contaminação ou substâncias orgânicas, resultando em um composto de alta qualidade (Jucá et al., 2014).

Os dados reais sobre o processo de produção do CDR foram estimados com base em informações quantitativas dos RSU do município, os quais foram inventariados de acordo com suas frações valorizadas para a produção de CDR. Assim, por meio da análise gravimétrica dos RSU, determinou-se o percentual responsável pela composição principal do CDR, destacando-se a mistura de resíduos de papel, plástico e têxteis. Notavelmente, constatou-se que a maior parte dos materiais utilizados na preparação do CDR consiste em plásticos não recicláveis, os quais representam aproximadamente 70% da amostra (Figura 4).

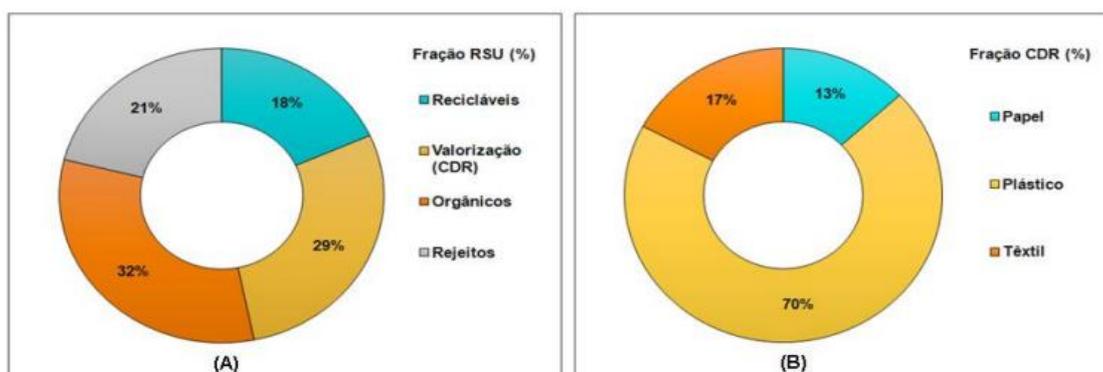


Figura 4. Proporção por tipologia dos RSU do Município de Paulista-PE: (a) Percentual de RSU por gerenciamento; (b) Percentual de Resíduos valorizados para produção de CDR

A análise comparativa entre os combustíveis indicou uma emissão total de 28.953,6 tCO_{2-eq}.ano⁻¹ no ciclo de vida do coque de petróleo e uma emissão de 28.321,1 tCO_{2-eq}.ano⁻¹ no ciclo de vida do CDR, indicando que os resíduos quando utilizados como substituto dos combustíveis fósseis na indústria de cimento evita a emissão de Carbono para a atmosfera (Figura 5). De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), a indústria do cimento consumiu 3.163.218,39 m³ de Coque de Petróleo, o que equivale a 70,6% das fontes de combustível para o Setor (EPE, 2020).

Dada à diferença na ordem de grandeza das emissões no processo de queima no forno de clínquer, última etapa do ciclo de vidas dos combustíveis analisados, julgou-se adequado analisar a cadeia do processo isoladamente, pelo método Usetox2, devido à contribuição de emissões de CO_{2-eq} mais significativa em toda cadeia produtiva (Figura 5).

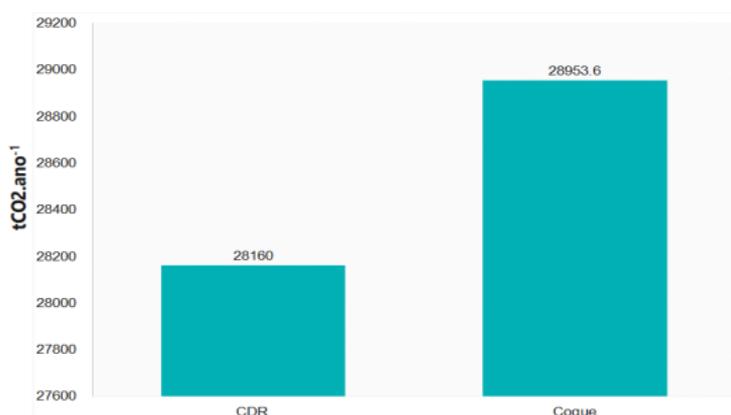


Figura 5. Emissões de CO_{2-eq} do CDR e Coque no processo de Queima

Na análise do impacto ambiental relacionado à queima dos componentes do CDR na indústria, conduzida pelo método USEtox2, que avalia as categorias de ecotoxicidade e ecotoxicidade humana (câncer e não câncer), observou-se que a queima dos componentes têxteis, seguida pelos plásticos, representa a maior contribuição para as emissões de CO₂-eq na atmosfera (Figura 6).

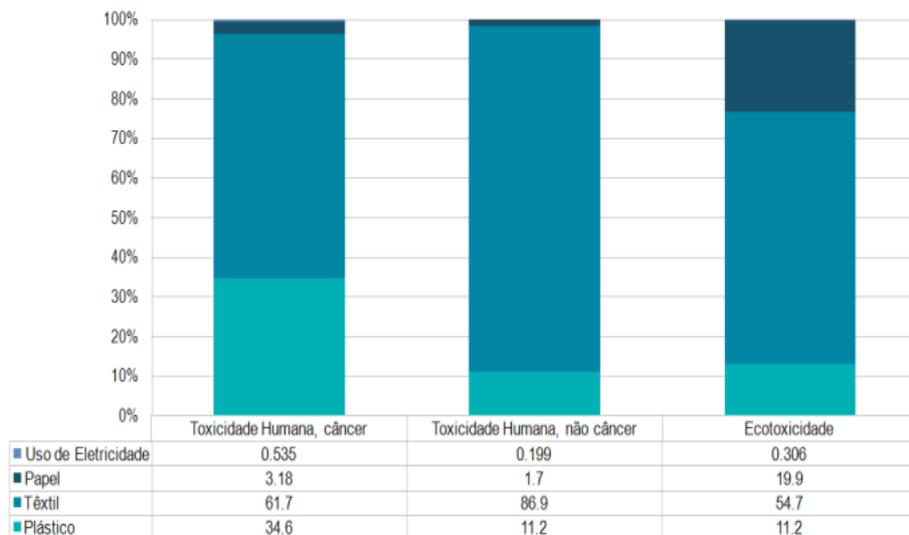


Figura 6. Análise de impacto utilizando a categoria Usetox 2.

Na análise comparativa nos meso-estágios, observou-se a emissão de 161,1 tCO₂.ano⁻¹ na cadeia de suprimentos do CDR e 1.148,96 tCO₂.ano⁻¹ na do Coque (Figura 7). Percebe-se que os principais processos que contribuem para essa diferença significativa são o transporte da matéria-prima, devido à longa distância percorrida via transporte marítimo para a importação do coque, bem como o transporte até a fonte de energia, considerando que o CDR é originado de um município próximo à fonte de energia. É importante destacar a diferença nas emissões de CO₂ no estágio de destino intermediário, que ocorre porque o coque é apenas armazenado nessa etapa, enquanto o CDR é processado, passando pela unidade da planta de produção. Já na etapa de produção da matéria-prima, devido ao CDR ser originado do resíduo, a emissão foi considerada zero.

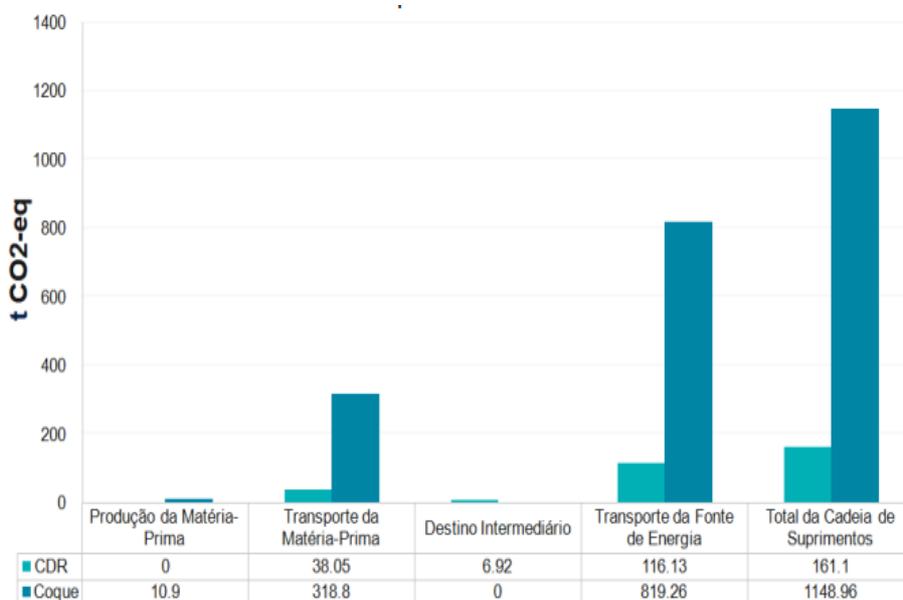


Figura 7. Comparação das emissões de CO₂-eq entre as cadeias de suprimento do CDR e Coque de Petróleo

4 CONCLUSÕES

O processo de produção dos componentes do CDR se destaca pelos significativos impactos positivos na categoria de mudanças climáticas, devido às emissões evitadas pela substituição do combustível fóssil e à redução da exploração de petróleo para a fabricação de resinas plásticas e fibras dos principais componentes. Por outro lado, os impactos negativos estão relacionados ao uso de combustível no transporte do material, à energia elétrica no processo de fabricação do CDR e à queima nos fornos das cimenteiras, com efeitos adversos na categoria de ecotoxicidade.

A comparação analítica entre o CDR e o Coque, dois combustíveis utilizados nos fornos de produção de cimento, revelou que a produção de 1 tonelada de combustível em ambos os casos resultou em emissões de gases de efeito estufa de 28.321,1 tCO_{2-eq} ao ano para o CDR e 30.102,56 tCO_{2-eq} ao ano para o Coque.

A variação dos valores no Poder Calorífico do CDR em diferentes cenários não compromete o aproveitamento da energia térmica contida nos RSU. Além disso, o ciclo do CDR mantém valores de emissão de CO₂ inferiores aos do Coque, reforçando sua vantagem técnica e ambiental nesse aspecto.

É importante destacar que a escolha do coprocessamento de CDR para esta pesquisa não implica necessariamente que seja a melhor opção para a destinação dos RSU gerados no município. Recomenda-se, portanto, que estudos futuros contemplem ACV mais abrangentes, que considerem o consumo de água exigido por cada etapa, assim como os aspectos financeiros e sociais envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14067: Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação. Rio de Janeiro, 2018.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n o 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.
- COSTA, A.R.S.; SILVA, R. C. P.; JUCÁ, J. F. T.; EL-DEIR, S.G. Aplicação da pegada ecológica na gestão de resíduos sólidos urbanos através de análise de componentes principais: Estudo da cidade de Recife, Brasil. *Revista aidis de ingeniería y ciencias ambientales*, v. 13, p. 320-333, 2020. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67115>
- DUTRA, A.C.; MEDEIROS, G.A.; GIANELLI, B.F. Avaliação do ciclo de vida como uma ferramenta de análise de impactos ambientais e conceito aplicados em programas educativos. *RBCIAMB*. n.51 p. 15-27, 2017. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190399>
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. Empresa de Pesquisa Energética. Brasil. Rio de Janeiro : EPE, 292 p. 2020.
- FUGII, G. M. Proposta de um modelo de dinâmica de sistemas aplicado à gestão de resíduos sólidos urbanos domiciliares de Curitiba. 2019. 246 f. Tese (Doutorado em Tecnologia e Sociedade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- GAMA, A. M. C.; COSTAS, V. C. B.; FIRMO, A. B. L.; JUCÁ, J. F. T. Estudo das emissões de GEE da disposição de resíduos sólidos na região metropolitana do Recife. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.6, p.163-177, 2019. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0015>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico. Cidades e Estados. Estimativas de População: 2020. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Solid Waste Disposal: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Report produced by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) on the invitation of the United Nations Framework Convention on Climate Change. Geneva: IPCC, 2006.

JUCÁ, J. F. T.; LIMA, J. D.; MARIANO, M. O. H.; FIRMO, A. L. B.; LIMA, D. G. A.; LUCENA, L. F. L.; FARIAS, P. R. R.; JUNIOR, F. H. C.; CARVALHO, E. H.; FERREIRA, J. A.; REICHERT, G. A. Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Jaboaão dos Guararapes: Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE, 2014.

JUCÁ, J. F. T.; Barbosa, K.R.M.; Sobral, M.C. M. Sustainability indicators for municipal solid waste management: A case study of the Recife Metropolitan Region, Brazil. Waste management & Research, v. 38, p. 2020. <https://doi.org/10.1177/0734242X20941088>

LUIZ, B., SUSKI, C. A. Avaliação da geração de gases de efeito estufa em diferentes tratamentos de resíduos domiciliares – Estudo de caso em Florianópolis-SC. Metodologias e Aprendizado. (4), p. 89–98. 2021. <https://doi.org/10.21166/metapre.v4i.1489>

MELQUIADES, T.F.; CARVALHO, M.; ARAÚJO, Y. R. V.; COELHO JUNIOR, L. M. Pegada de carbono associada ao processo de pausteurização de sorvetes. v. 12, n. 2, p. 609-629, Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá (PR), 2019. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p609-629>

VERSCHOOR, A. H.; REIJNDERS, L. The use of life cycle methods by seven major companies. Journal of Cleaner Production, n. 7, p.375-382. 1999.

ROCHA, M. R.; LEMME, R. F. F.; D'AAGOSTO, M. A. Inventário de ciclo de vida das emissões de CO₂ do pneu inservível como combustível em fornos de cimenteiras. Anais. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA). 2014.

SILVA, R. C. P. ; A.R.S. COSTA ; EL-DEIR, S.G. ; JUCÁ, J. F.T. Setorização de rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares por técnicas multivariadas: estudo de caso da cidade do Recife, Brasil. Engenharia sanitária e ambiental (online), v. 25, p. 72-84, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020200205>

TAVARES, G. S. C. Contribuição para a sustentabilidade na gestão dos resíduos sólidos urbanos nos municípios da Região Metropolitana. 2018. 124f. Dissertação. Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

THAKUR, P., GANGULY, R., DHULIA, A. Occupational Health Hazard Exposure among municipal solid waste workers in Himachal Pradesh, India. Waste Management, (78), p. 483-489. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.020>