



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS URBANOS UTILIZADOS NO COPROCESSAMENTO EM FORNOS DE CIMENTO

* Flávio Leôncio Guedes¹
José Fernando Thomé Jucá¹
Soraya Giovanetti El-Deir²

ASSESSMENT OF THE LIFE CYCLE OF PRODUCTION OF REFUSE DERIVED FUEL URBAN WASTE USED IN CO-PROCESSING IN CEMENT FURNACES

Recibido el 15 de enero de 2024. Aceptado el 11 de octubre de 2024

Abstract

The increase in urban solid waste generation in Brazil requires efficient solutions. Thermal treatment stands out for significantly reducing the volume of waste, and this study analyzed the environmental impact of Waste-Derived Fuel when replacing fossil fuels in the cement industry. The results show that the use of this alternative fuel can reduce greenhouse gas emissions by up to 85.98% throughout the supply chain, avoiding 1.781,46 tCO_{2-eq}.year⁻¹. This contributes to the mitigation of climate change, being an important benefit in the context of the transition to a more sustainable economy. Regarding calorific value, the variations observed between scenarios do not compromise energy efficiency, which presents an average value of 4.932 kcal.kg⁻¹, which makes it competitive in relation to conventional fuels. The greatest environmental benefits are the reduction in oil exploration and carbon emissions into the atmosphere, while the negative impacts are related to the use of fuels in transportation and the consumption of electricity during manufacturing, in addition to the ecotoxicity generated by burning in cement kilns. This study reinforces the technical and environmental feasibility of thermal waste treatment, highlighting it as an effective alternative in waste management and in replacing fossil fuels.

Keywords: thermal energy, life cycle, solid waste, fuel.

¹ Centro de Tecnologia e Geociencias, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

² Departamento de Tecnologia Rural, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

* *Autor correspondente:* Centro de Tecnologia e Geociencias, Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, CEP 50670-901, Brasil. Email: f_l_guedes@hotmail.com

Resumo

O aumento da geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil exige soluções eficientes. O tratamento térmico destaca-se por reduzir significativamente o volume de resíduos, e este estudo analisou o impacto ambiental do Combustível Derivado de Resíduos ao substituir combustíveis fósseis na indústria cimenteira. Os resultados mostram que o uso desse combustível alternativo pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 85,98% em toda cadeia de suprimento, evitando 1.781,46 tCO_{2-eq}.ano⁻¹. Isso contribui para a mitigação das mudanças climáticas, sendo um benefício importante no contexto da transição para uma economia mais sustentável. Em relação ao poder calorífico, as variações observadas entre cenários não comprometem a eficiência energética, que apresenta um valor médio de 4.932 kcal.kg⁻¹, o que o torna competitivo em relação aos combustíveis convencionais. Os maiores benefícios ambientais são a redução na exploração de petróleo e nas emissões de carbono na atmosfera, enquanto os impactos negativos estão relacionados ao uso de combustíveis no transporte e ao consumo de energia elétrica durante a fabricação, além da ecotoxicidade gerada pela queima nos fornos das cimenteiras. Este estudo reforça a viabilidade técnica e ambiental do tratamento térmico de resíduos, destacando-o como uma alternativa eficaz na gestão de resíduos e na substituição de combustíveis fósseis.

Palavras-chave: energia térmica, ciclo de vida, resíduos sólidos, combustível.

Introdução

A problemática do aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) está presente em todos os municípios brasileiros. A eficiente gestão de RSU permite ao município reduzir a emissão Gases de Efeito Estufa (GEE) à atmosfera, especialmente no que diz respeito às rotas tecnológicas a serem adotadas antes da disposição final (Luiz e Suski 2021; Juca, 2014). Os resíduos dispostos sem tratamento em aterros sanitários contribuem significativamente para a intensificação da emissão de GEE, da poluição do ar, da poluição das águas, bem como o aumento problemas de saúde pública (Thakur; Ganguly; Dhulia 2018).

O tratamento térmico de resíduos, dentre os tratamentos existentes, possui o maior índice de redução de volume dos resíduos, podendo variar entre 80 e 90% (Lombardi; Carnevale; Corti 2015). O processo se dá pela queima controlada e devidamente preparada dos resíduos para diminuir o seu volume e gerar energia. Em relação às emissões de GEE, o CO₂ é o principal GEE emitido pelos incineradores de RSU. Já o CH₄ não é gerado durante as operações normais da incineração (Johnke, 2002).

Dessa forma, a recuperação energética aplicado aos RSU utilizam tecnologias que neutralizam as características negativas, e agrega valor, através de matéria-prima secundária produzida. Para Machado *et al.* (2021), diversos métodos vêm sendo aplicados para promover o reaproveitamento de resíduos e minimizar os riscos ambientais causados pela disposição inadequada.

O combustível derivado de resíduos (CDR), é um termo aplicado a materiais que possuem valor calorífico elevado, normalmente por volta de 18 MJ.kg^{-1} , recuperado da coleta de resíduos. Segundo Sampaio (2014), este procedimento é utilizado para um melhor rendimento do resíduo, no qual torna o combustível com um tamanho mais uniforme.

Na indústria de cimento, o CDR é aplicado como permuta aos combustíveis fósseis não renováveis, como o coque de petróleo, representando a segunda principal alternativa do setor (Visedo e Pecchio, 2019). Segundo Araújo (2020), a indústria cimenteira é fundamental para a economia mundial, porém o processo produtivo consome grandes quantidades de combustíveis e de eletricidade, sendo responsável por até 7% das emissões de CO_2 .

A utilização do CDR diminui a área ocupada por aterros sanitários, através da transformação dos RSU em combustível, evitando a disposição em extensas áreas de terra, as quais necessitariam de cuidados adicionais após o encerramento da vida útil, tornando vantajosa a alternativa desta recuperação energética (Piaia, 2021).

Todo produto possui um ciclo de vida, com possíveis impactos associados, tanto na fabricação quanto no consumo. Para uma análise mais completa através de fluxos de matéria e energia, é empregada a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Segundo Firmo (2019), a ACV apresenta uma visão integrada, onde são consideradas todas as emissões de GEE decorrentes do gerenciamento dos resíduos, independentemente do local ou momento temporal em que estas ocorreram. Para Luiz e Suski (2021), através da ACV é possível quantificar não apenas os impactos gerados pela decomposição de resíduos, como também realizar um balanço de toda cadeia produtiva.

O efeito direto ou indireto da emissão de GEE oriundos de processo ou produto pode ser representado através da análise da Pegada de Carbono (Bongiovanni e Tuninetti 2021). Esta pode ser considerada uma aplicação especial da ACV, no qual foca em específico nas emissões de GEE, cuja principal vantagem em comparação a uma ACV completa é a facilidade de sua comunicação (Araújo *et al.*, 2018).

Para auxiliar na seleção da melhor alternativa para o tratamento dos RSU e para compreender os possíveis impactos gerados na utilização de combustíveis alternativos como o CDR, a análise de emissão de GEE pode-se ser utilizada através da ACV. 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.

Materiais e métodos

Avaliação do Ciclo de Vida do CDR

Para que se obter uma visão sistêmica dos impactos ambientais provocados por métodos produtivos, é recomendável à realização de uma ACV. Esta análise foi realizada de acordo com as normas ISO NBR 14040 (ABNT, 2014a), ISO NBR 14044 (ABNT, 2014b), seguindo as recomendações da norma ISO NBR 14067 (ABNT, 2018), que padroniza os estudos de Pegada de Carbono (PC) para a utilização da categoria de impacto de Mudanças Climáticas. Assim, para o cálculo da PC foi utilizada a Equação para conversão das emissões de GEE em toneladas de CO₂ equivalente. Estudos sobre ACV são indicados para quantificar a Pegada de Carbono associada processos de produção (Melquíades *et al.*, 2019). A técnica da ACV possui quatro fases: objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados.

Âmbito da Análise

O escopo do estudo perfaz um sistema de tratamento RSU para a produção de CDR, que inclui as etapas de transporte, triagem e tratamento e utilização. A unidade funcional utilizada foi de 1 t.mês⁻¹ do processo de produção de a partir de RSU coletados em Paulista-PE, considerando ano base 2019 e análise gravimétrica realizada em 2018 (Tavares, 2018).

Os processos de transporte de Município de Paulista-PE à Central de Tratamento de Resíduos, de triagem (manual e automática) e de produção de CDR, configuram-se na fronteira da primeira fase do estudo (Figura 1), na qual se analisa o impacto processual. Dessa forma, nesta fase se avaliou a Pegada de Carbono do gerenciamento de RSU para produzir CDR, onde foi realizado um Inventário de Ciclo de Vida (ICV), definição de objetivo e escopo e análise do inventário. Quando a realização do ICV é restrita ao processo dentro das companhias, é realizado um estudo “do berço ao portão da indústria” (Verschoor e Reijnders 1999). Assim, este estudo considerou a ACV do berço ao portão, quantificando a carga ambiental do CDR desde o transporte do RSU que entra no sistema de produção (berço) ao produto produzido pronto para comercialização (portão).

A segunda fase do estudo constitui-se de uma análise da cadeia de produção e consumo, desde a extração de recursos até a disposição final, tendo como destino final a queima em fornos das fábricas de produção de cimento. Além disso, para fins de comparação, também teve lugar um ICV do coque de petróleo, combustível fóssil mais utilizado para queima na indústria cimenteira. Nessa fase, considerou a ACV do berço ao túmulo, no qual foi utilizado o procedimento proposto por D'agosto e Ribeiro (2002), para analisar as entradas e os aspectos ambientais do Ciclo de Vida de um produto para o caso da cadeia de suprimentos de combustíveis de transporte, através da: fase 1 - definição da abrangência e das dimensões, fase 2 - coleta de dados para a análise do inventário, fase 3 - avaliação da qualidade dos dados e por fim, fase 4 - comparação dos resultados obtidos (Figura 2).

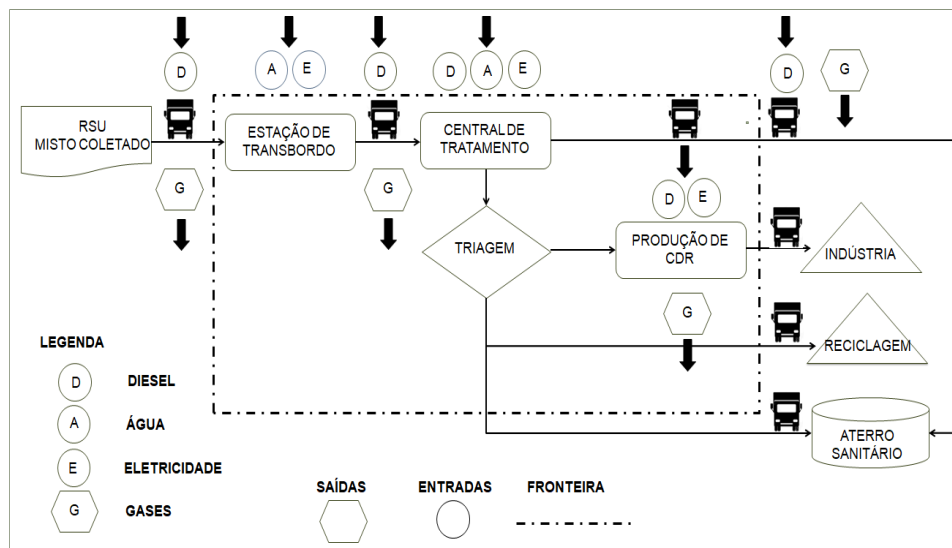


Figura 1. Fronteira do sistema produto (primeira fase). Fonte: elaboração própria (2021).

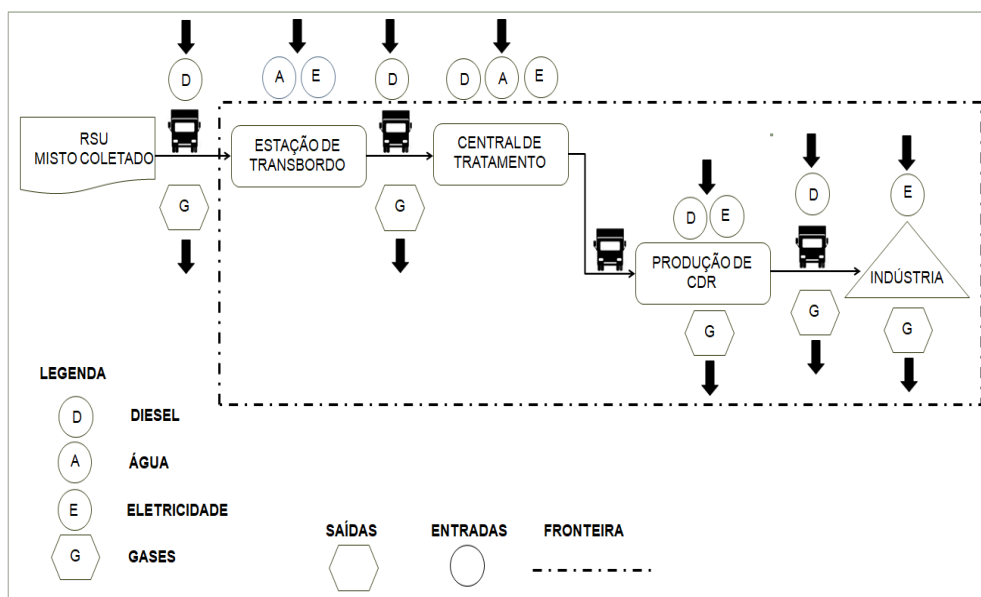


Figura 2. Fronteira do sistema produto (segunda fase). Fonte: elaboração própria (2021).

Foram considerados três níveis de detalhamento para o comprimento do estudo: macro, meso e micro estágios (Figura 3). Por meio desta abordagem, pode se realizar refinamentos sucessivos à medida que se disponha de um maior detalhamento dos estágios e dos processos (D'agosto, e Ribeiro, 2002). Assim, as comparações entre os ciclos de vida do CDR e do Coque com os níveis de detalhamento foram realizadas por meso-estágio, uma vez que os processos da fase de micro-estágio são específicos para cada ciclo de vida (Rocha, 2014). A análise comparativa foi realizada seguindo os passos de Rocha (2014), através dos 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.

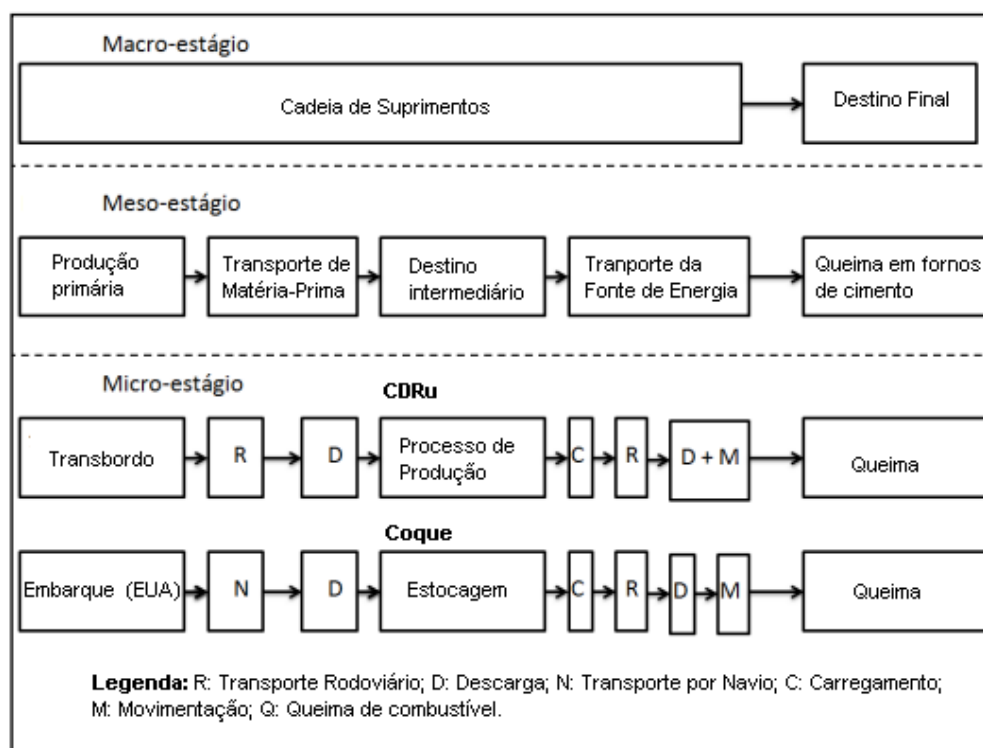


Figura 3. Níveis de detalhamento do modelo de ciclo de vida. Fonte: Adaptado a partir de (Rocha, 2014).

De acordo com estimativas do PCI dos principais componentes do CDR de três rotas analisadas e do PCI do coque, foi possível calcular a quantidade de combustível fóssil substituída, permitindo estimar a diminuição nas emissões atmosféricas no ano (Equação 1). A variação do PCI nos componentes principais do CDR (plástico, papel e resíduos têxteis), em função da composição gravimétrica e a Equação apresenta a expressão utilizada para calcular as emissões evitadas com a substituição do coque (Soares, 2011; Tavares, 2018; Silva, 2021).

$$[Es = r * QCDR * (PCI\ cdr / PCI\ coque)]$$

Equação (1)

Onde:

Es: São as emissões evitadas pela substituição do coque por CDR (kg CO₂.ano⁻¹)

r: é o fator de redução específico de emissões (kg CO₂ kg.CDR⁻¹)

QCDR: é a quantidade de CDR utilizada nos fornos (kg.ano⁻¹)

PCI CDR: é o poder calorífico inferior do CDR (kcal.kg⁻¹)

PCI Coque: é o poder calorífico inferior do coque

Análise de Inventário do processo produtivo de CDR

Os processos utilizados no inventário incluem desde o transporte, triagem e produção, bem como o consumo de energia e combustível nessas etapas (Rocha 2014). Os dados de entrada referentes ao sistema produtivo foram obtidos de literatura, manuais técnicos e dados públicos. Já as informações relacionadas à produção dos insumos e transporte foram obtidas na base de dados do Ecoinvent 3 (Frischknecht *et al.*, 2007).

A ACV do berço ao túmulo do CDR e do Coque de petróleo foi quantificada para a análise comparativa, através dos fatores de emissão obtidos na última etapa do ciclo e vida referente à disposição final, a qual é atribuída à queima dos combustíveis nos fornos das cimenteiras. Como as tecnologias de processamento, transporte e produção, tanto do CDR como do Coque, não sofreram alterações significativas recentemente, foram considerados dados dos últimos 10 anos.

O CDR foi gerenciado como um resíduo, sendo disposto corretamente, e reaproveitado como combustível em destino adequado. Por isso, não foram quantificadas as emissões provenientes do processo produtivo e logístico do RSU em sua vida útil.

Avaliação dos Impactos

Essa fase tem a finalidade de compreender e analisar o impacto ambiental causado pelo consumo de matéria-prima e a emissão dos rejeitos identificados no momento do inventário. O mais importante nessa fase é a redução da poluição originada por um determinado processo em que um dos fatores responsáveis para tal é a utilização indiscriminada de elementos ecológicos, implicando em um alto grau de degradação ambiental (Giannetti e Almeida, 2006).

O processamento dos dados coletados através dos cálculos e modelagem foram realizados com auxílio do software Simapro, na versão 9.2.0.2 (Goedkoop *et al.*, 2016). O Simapro oferece diversos métodos para o cálculo de impactos ambientais, dentre os quais foi selecionado o método para a quantificação das contribuições de emissões atmosféricas para o problema das mudanças climáticas, proporcionando a Pegada de Carbono.

A determinação do impacto ambiental potencial do processo de produção do CDR foi realizada pelo do método Single Issue na categoria IPCC 2013 GWP 100a. Este é utilizado para impactos com abrangência de aplicação global de mudanças climáticas (GWP), sendo um dos mais usados para tal fim, expressado em kg CO₂-eq. Este método utiliza os fatores de conversão atualizados do IPCC para a quantificação das contribuições de emissões atmosféricas e caracteriza as diferentes emissões de GEE, de acordo com o potencial de aquecimento global em 100 anos. Além da metodologia do IPCC 100a, para o impacto ambiental referente à queima dos componentes do CDR na indústria do cimento, foi utilizado o método USEtox2, que avalia as categorias de ecotoxicidade e seus efeitos desestabilizadores no ambiente e suas consequências para a saúde humana e segurança alimentar.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade permite verificar os resultados considerando uma variável, de acordo com a modificação de suas quantidades, o que facilita as tomadas de decisões (Blank e Tarquin, 2008). Esta foi realizada para examinar diferentes cenários de composição gravimétrica do RSU. Para tanto, foram analisadas as variações dos componentes principais do CDR em três rotas distintas, no município estudado. Dessa maneira, foram estudados os percentuais da composição gravimétrica, a fim de verificar a influência dessas variantes no poder calorífico e nas emissões de Carbono emitida por esses materiais no processo de queima nos fornos das cimenteiras.

Resultados e discussão

Estudo de Caso

O estudo teve como objeto principal a quantificação das emissões de GEE a partir da produção de CDR, considerando para a quantidade CO₂-eq por produção mensal de CDR. Para tanto, a área de estudo da pesquisa foi o CTR – PE, localizado em Igarassu – PE, sob as coordenadas -07 43' 14,6"E e -34 56' 34,5"W, que dispões de Aterro Sanitário para resíduos classes I, II-A e II-B. Possui uma área de 106 hectares e estimativa de uma vida útil de 22 anos, o empreendimento recebe aproximadamente 1.500 t.dia⁻¹ de RSU gerados em dez municípios de Pernambuco, no qual, para este estudo, foi escolhido os RSU coletados em Paulista-PE. Assim, metade dos RSU que o CTR-PE recebe diariamente são destinadas para a usina de triagem de RSU. Dessas 750 t, aproximadamente 30%, sendo um volume superior a 220 t, são comercializados como materiais recicláveis e CDR, de acordo com dados da Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (ABLP, 2019).

Durante o processo de produção de CDR no CTR-PE (Figura 4), foram analisados os fluxos de matéria e energia nos processos de transporte, triagem manual e processos automáticos da planta que inclui trituração primária, peneiramento, remoção magnética de materiais ferrosos e

não ferrosos, classificação com uso de sensores óticos, trituração secundária e armazenamento. Esse processo resulta numa fração de combustível com maior poder calorífico e composição livre de contaminação ou substâncias orgânicas críticas, tornando um composto de boa qualidade (Jucá *et al.*, 2014).



Figura 4. Planta de triagem e produção de CDR em Igarassu-PE. Fonte: autoria própria (2021).

Foram consideradas as estimativas de consumo de combustíveis fósseis aplicadas à rota do produto, desde o transporte da matéria-prima (RSU) até o produto final (CDR). Dessa forma, o percurso perfaz 17.1 km na etapa de transporte de RSU da Estação de Transbordo ao CTR-PE e 45.1 km na segunda etapa de comercialização do CTR à indústria (Figura 5).

Os dados utilizados sobre a tipologia de resíduos selecionados para o processo de produção do CDR foram estimados através de dados quantitativos dos RSU coletados no município e inventariados por frações de resíduos valorizados para produção de CDR. Dessa forma, de acordo com a análise gravimétrica dos RSU, foi considerado o percentual responsável pela composição principal do CDR, sendo formado pelo composto da mistura de resíduos de papéis, plásticos e resíduos têxteis (Figura 6). Foi observado que o percentual de materiais usados na preparação de CDR é composto, principalmente, por plásticos não valorizados na reciclagem, com cerca de 70% da amostra.

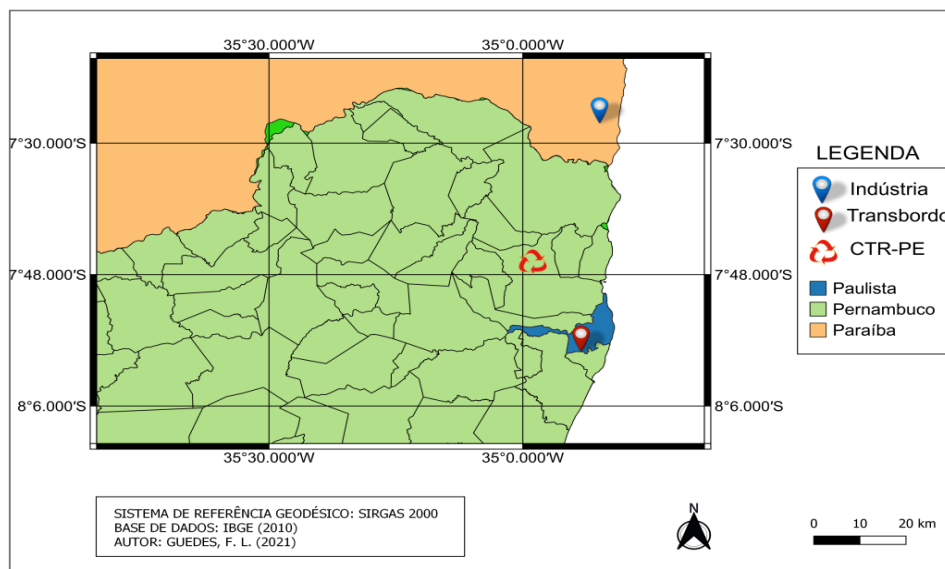


Figura 5. Rota do CDR Produzido em Paulista-PE. Fonte: elaboração própria (2021).

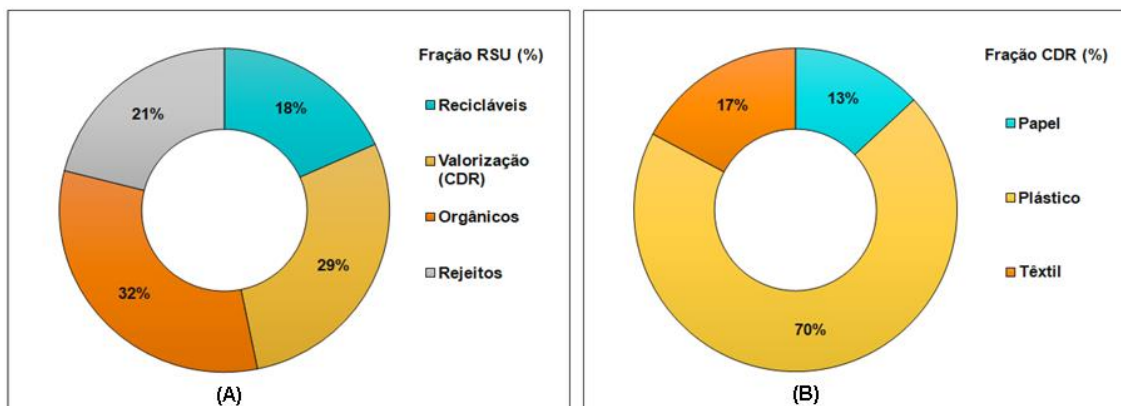


Figura 6. Proporção por tipologia dos RSU do Município de Paulista-PE. Figura 6a. Percentual de RSU por gerenciamento. Figura 6b. Percentual de Resíduos valorizados para produção de CDR. Fonte: elaboração própria (2021).

Inventário e Análise dos Impactos

Para fins de ACV, foi considerado o percentual de RSU, de acordo com a caracterização gravimétrica, referente ao material não aproveitado na reciclagem e valorizado na produção de CDR. Assim, para uma tonelada de RSU produzido no município, 290 kg de resíduos tem potencialidades para a transformação em CDR. O balanço de entradas e saídas do ciclo produtivo

do CDR foi realizado através da confecção do ICV, sendo a proporção do fluxo do sistema de materiais e energia analisado e estimado de acordo com a unidade funcional adotada do gerenciamento de 1 t de CDR.mês⁻¹ (Tabela 1).

Tabela 1. ICV do processo do ciclo de vida do CDR

Processo	Fluxo	Unidade Funcional	Quantidade	Unidade
Transbordo - CTR	Entradas	RSU	8100	t
		Diesel	17928	L
		Eletricidade	4617	kWh
	Saídas	RSU	8100	t
		GEE	0.00135	kg CO ₂ -eq
Triagem Manual e Automática	Entradas	RSU	8100	t
		Diesel	4536	L
		Eletricidade	9091	kWh
	Saídas	CDR	2349	t
		Recicláveis	1458	t
		Rejeitos	1701	t
		Orgânicos	2592	t
		GEE	0.00287	kg CO ₂ -eq
		CDR	2349	t
Produção/Refino CDR	Entradas	Eletricidade	340	kWh
	Saídas	CDR	2349	t
		GEE	7.64E-05	kg CO ₂ -eq
CTR – Indústria Cimenteira	Entradas	CDR	2349	t
		Diesel	20369	L
	Saídas	GEE	0.00412	kg CO ₂ -eq
Queima	Entradas	Plástico	1644.30	t
		Papel	305.37	t
		Têxtil	399.33	t
		Eletricidade	7222.22	kWh
	Saídas	GEE	1644.30	CO ₂ -eq
		Cinzas	0	t

O início do ciclo de vida do CDR foi definido como sendo o carregamento dos caminhões na Estação de Transbordo que fazem o transporte para o CTR-PE, onde o RSU é processado e transformado em CDR. O destino do CDR é a indústria de cimento, onde é utilizado em fornos como combustível, gerando energia térmica. Dessa forma, o inventário refere-se à produção de mensal do produto, considerando um mês com 30 dias.

O transporte da matéria-prima do berço ao portão representa a distância percorrida de 62.2 km em cada ciclo berço-túmulo e um consumo de diesel de 42833 L.mês⁻¹. Essa segregação na etapa de transporte deve ser realizada devido às diferenças nas características dos caminhões utilizados em cada trecho, que implicam em fatores de consumo diferentes (Merrild; Larsen; Christensen, 2012). Foi contabilizado as emissões referentes ao uso de Diesel de caminhões carretas de capacidade entre 29 e 35 m³ e escavadeiras hidráulicas utilizadas no processo.

O consumo de energia elétrica na Sede da Estação de transbordo e no CTR-PE foram inventariados no processo, bem como a energia utilizada na Planta de triagem e produção de CDR, o que contabilizou 21270.22 kwh.mês⁻¹.

Na análise do impacto processual berço ao portão, foi verificado que nas etapas referentes ao processo de fabricação de CDR, o maior impacto na categoria de mudanças climáticas refere-se ao consumo de combustível, com uma contribuição de 14.3 tCO_{2-eq.} mês⁻¹. Este é seguido pelo uso de energia elétrica com 5.46 tCO_{2-eq.}, que somando toda cadeia produtiva do processo é responsável por um total de 19.77 tCO_{2-eq.} emitidos ao ano (Figura 7).

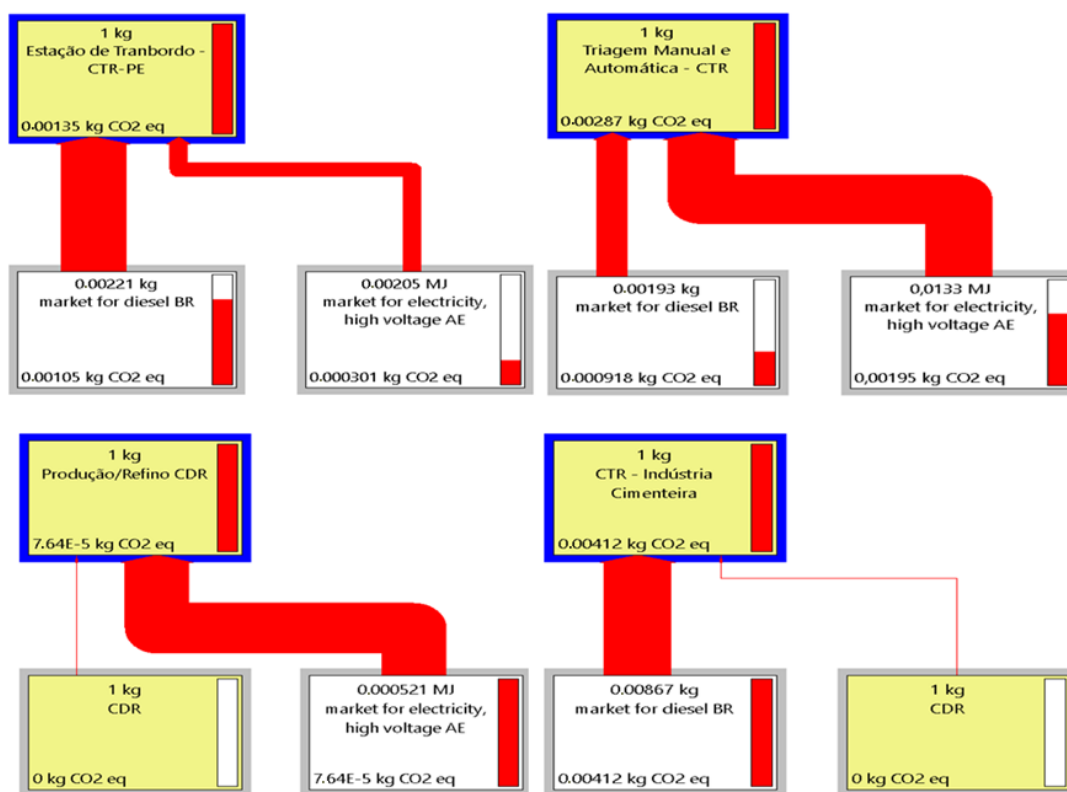


Figura 7. Etapas ICV do impacto processual. Fonte: Elaboração Própria a partir do Simapro (2021).

No processo de queima do CDR nos fornos de cimento, foi observado uma contribuição maior de CO₂-eq emitido com a queima de resíduos têxteis, com 20150 tCO₂-eq.ano⁻¹, e resíduos de plásticos, com 7360 tCO₂-eq.ano⁻¹. Tais quantitativos somam ao processo uma emissão de 27990 tCO₂-eq, perfazendo um total anual de 28160 tCO₂-eq.ano⁻¹ emitidos durante a queima (Figura 8).

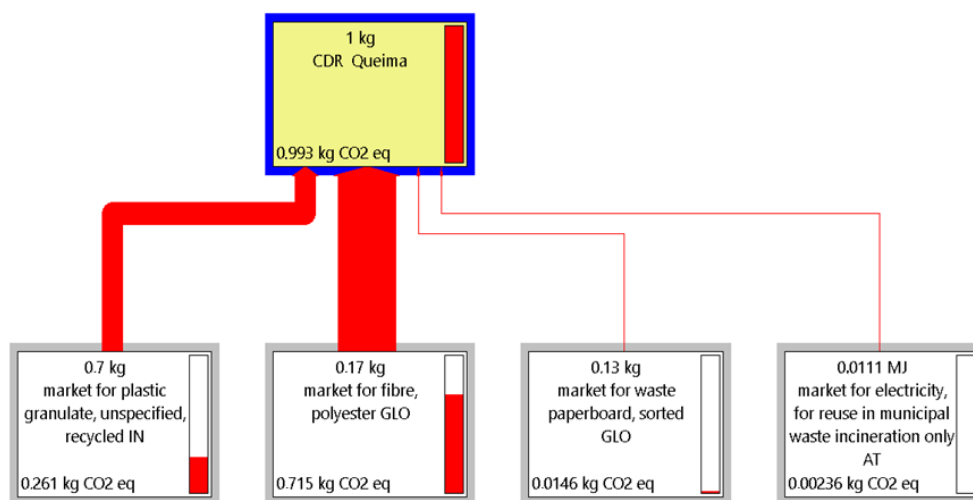


Figura 8. Processo de queima do CDR. Fonte: Elaboração Própria a partir do Simapro (2021).

Análise Comparativa

A análise indicou uma emissão total de 30102.56 tCO₂-eq.ano⁻¹ no ciclo de vida do coque de petróleo e uma emissão de 28321.1 tCO₂-eq.ano⁻¹, indicando que os resíduos quando utilizados como substituto dos combustíveis fósseis na indústria de cimento evita a emissão de Carbono para a atmosfera. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), a indústria do cimento consumiu 3163218.39 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 de o processo isoladamente, pelo método *Usetox2*, devido à contribuição de emissões de CO₂-eq mais significativa em toda cadeia produtiva.

Assim, para o impacto ambiental referente à queima dos componentes do CDR na indústria analisada através do método *USEtox2*, que avalia as categorias de ecotoxicidade e ecotoxicidade humana câncer e não câncer, foi observado que à queima dos componentes têxteis, seguido dos plásticos, contribuem mais para a emissão de CO₂-eq na atmosfera (Figura 9).

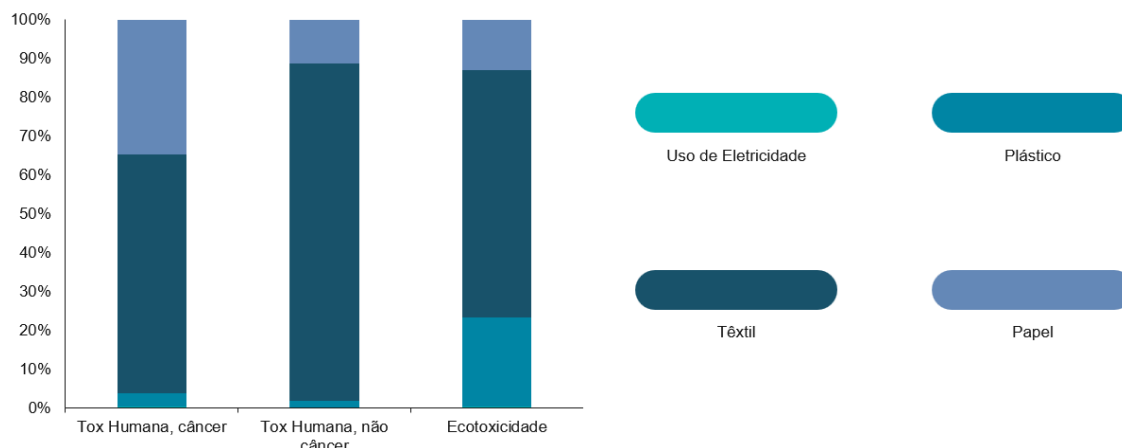


Figura 9. Análise de impacto utilizando a categoria Usetox 2. *Fonte: Elaboração Própria a partir do Simapro (2021)*

Na análise comparativa nos meso-estágios, observou-se emissão de $161.1 \text{ tCO}_2\text{.ano}^{-1}$ na cadeia de suprimentos do CDR e de $1148.96 \text{ tCO}_2\text{.ano}^{-1}$ na do Coque (Figura 10), percebe-se que os principais processos que contribuem diferença significativa são o transporte da matéria-prima, devido à longa distância percorrida via transporte marítimo para importação do coque, bem como o transporte até a fonte de Energia, levando em consideração que o CDR é oriundo do município próximo à fonte de energia. Cabe ressaltar a diferença nas emissões de CO_2 destino Intermediário, que ocorre porque o coque é apenas armazenado neste estágio, enquanto o CDR é processado, passando pela unidade planta de produção. Já na etapa de produção de matéria prima, devido o CDR ser oriundo do resíduo, a emissão foi considerada zero.

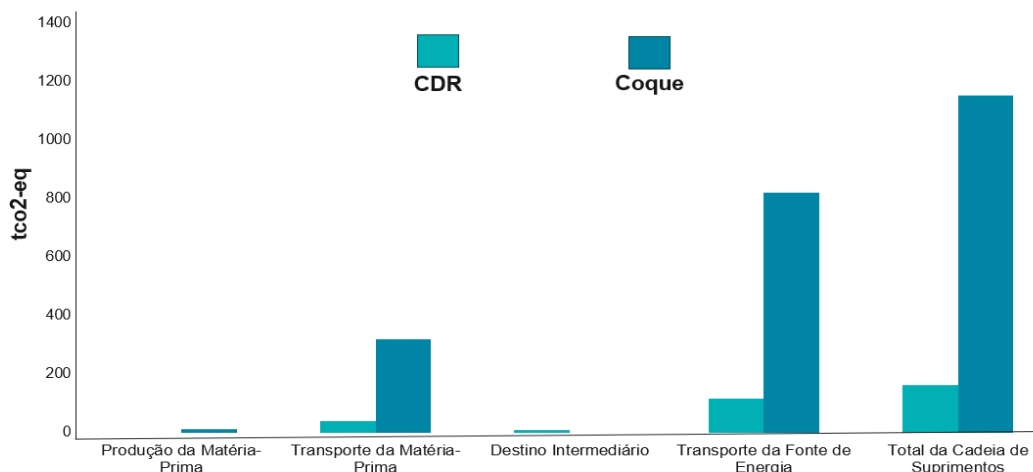


Figura 10. Comparação das emissões de $\text{CO}_2\text{-eq}$ entre as cadeias de suprimento do CDR e Coque de Petróleo. *Fonte: Elaboração Própria a partir do Simapro (2021)*

Análise de Incerteza

A partir da atribuição de valores em termos de energia aos materiais contidos na composição gravimétrica do CDR foi estimado PCI dos resíduos dos principais componentes (Ivig, 2005; Barros, 2012; REDEACV, 2017; Guedes *et al.*, 2021). Na análise, o plástico possui maior contribuição na composição gravimétrica em relação aos componentes das mostras das 3 rotas analisadas, com média de 17,86% (Figura 11), e foi levada em consideração que o PCI do plástico é maior que os outros materiais cerca de 7830 Kcal.kg⁻¹. Já os resíduos têxteis e de papéis possuem em média PCI de 4170 e 3780 Kcal.kg⁻¹, respectivamente.

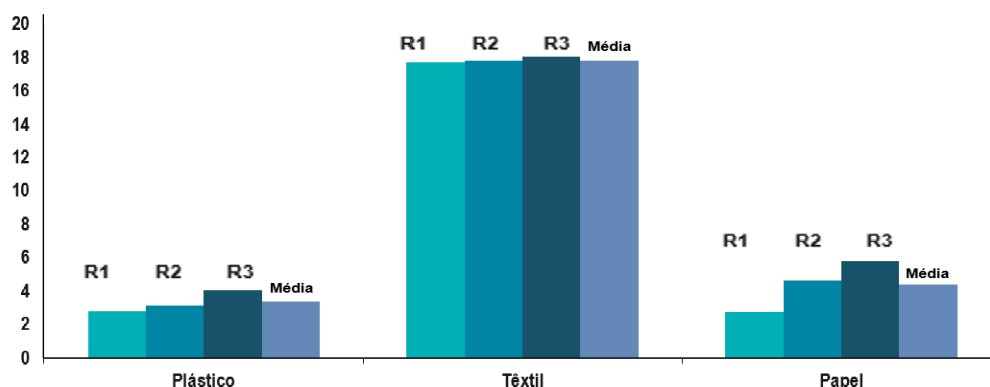


Figura 11. Média da composição gravimétrica dos componentes do CDR. Fonte: *Elaboração própria a partir de Barros (2012), Tavares (2018), Guedes et al. (2021b).*

A diferença na composição dos materiais que compõem o CDR não alterou de forma que comprometesse o uso nos fornos de clínquer, dado o resultado do poder calorífico encontrado. O resultado mínimo da análise teórica do PCI foi de 4932 kcal.kg⁻¹. Considerando que o PCI do CDR não deve ser inferior a 1675 kcal.kg⁻¹ se tratando de aproveitamento de energético. Além disso, mesmo que a classificação segundo o PCI não deva ser considerada de forma definitiva para estabelecer a destinação correta do RSU, considera-se que para um PCI > 2000 kcal.kg⁻¹ a queima é tecnicamente viável (Themelis, 2003).

Assim, ao final da análise de sensibilidade, foi verificado que, mesmo com a variação do PCI de acordo com a rota de coleta do município do estudo, os valores não comprometem o aproveitamento de energia térmica contida nos RSU e o ciclo do CDR mantém valores de emissão de CO₂ inferiores ao do Coque, reforçando sua vantagem técnica e ambiental neste parâmetro.

Conclusão

O processo de produção dos componentes do CDR se destaca 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 para fabricação de resinas plásticas e fibras dos principais componentes. Já o impacto negativo está relacionado ao uso de combustível no transporte do material, energia elétrica no processo de fabricação do CDR e queima nos fornos das cimenteiras com impactos negativos para a categoria de ecotoxicidade.

A comparação analítica entre o CDR e o Coque, dois casos combustíveis utilizados nos fornos de produção de cimento, foi realizada pelo método internacionalmente padronizado de ACV. A produção de 1 t de combustíveis de ambos os casos contribuiu com a Emissão de GEE para o caso do CDR de $28321.1 \text{ tCO}_2\text{-eq.ano}^{-1}$, e para o caso do Coque de $30102.56 \text{ tCO}_2\text{-eq.ano}^{-1}$, sugerindo que os RSU quando utilizados como substituto dos combustíveis fósseis na indústria de cimento reduz a emissão de Carbono para a atmosfera. Os resultados mostram que o uso desse combustível alternativo pode reduzir as emissões em até 85,98% em toda a cadeia de suprimento, evitando $1.781,46 \text{ tCO}_2\text{-eq.ano}^{-1}$.

A variação dos valores nos resultados do Poder Calorífico do CDR em diferentes cenários não compromete o aproveitamento de energia térmica contida nos RSU e o ciclo do CDR mantém valores de emissão de CO_2 inferiores ao do Coque, reforçando sua vantagem técnica e ambiental neste parâmetro.

Vale ressaltar que o fato do coprocessamento de CDR ter sido escolhido para a pesquisa não significa que seja a melhor opção para destinação dos RSU gerados no município. Sugere-se, ainda, em estudos futuros, a realização de ACV mais abrangentes, que englobem o consumo de água demandados por cada etapa, bem como os aspectos financeiros e sociais.

Referencias bibliográficas

- ABLP, Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (2019) *Revista Limpeza Pública*. Ed. nº 102. Publicação trimestral da 3ª trimestre. São Paulo-SP.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014a) *NBR 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro-RJ.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014b) *NBR 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro-RJ.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018) *NBR 14067: Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação*. Rio de Janeiro-RJ.
- Araújo, Y. R. V., Góis, M. L., Coelho Junior, L. M., CARVALHO, M. (2018) Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(2), 863-1868. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p609-629>
- Barros, R. T. DE V. (2008) *Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos*. 1.ed. Belo Horizonte: Tessitura, 2012

- Blank, L., Tarquin, A. (2008) *Engenharia Econômica*. 6ª ed. McGraw-Hill, Porto Alegre, Brasil.
- Bongiovanni, R. G., Tuninetti, L. (2021) Huella de Carbono de la cadena de trigo de Argentina. *LALCA: R. Latino-Amer. Aval. Ciclo Vida*. (4), 1-38. <https://doi.org/10.18225/lalca.v4i0.5206>
- D'agosto, M. A., Ribeiro, S. K. (2002) Sistema de gestão da ecoeficiência energética: modelo para frotas de transporte rodoviário, *COPPE/UFRJ*, Rio de Janeiro-RJ.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. (2020) Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. Empresa de Pesquisa Energética. Brasil. Rio de Janeiro-RJ, 292 p.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., Wernet G. (2007) Overview and Methodology. ecoinvent report Nº. 1. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, Dübendorf.
- Giannetti, B. F., Almeida, C. M. V. B. (2006) Ecologia Industrial: Conveitos, Ferramentas e Aplicações. *Editora Edgard Blucher*, São Paulo-SP.
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer, E. (2016) Introduction to LCA with SimaPro. *Pré Consultants*. Netherlands.
- Guedes, F. L., Juca, J. F. T., Oliveira Júnior, A. I., Aragão Júnior, W. R., Araujo, J. A. R. (2021) Potencial energético do combustível derivado de resíduo produzido em Pernambuco, Brasil. *XIX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SILUBESA*. Recife.
- IVIG, Instituto Virtual Internacional de Mudanças - COPPE. (2005) Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ. *Rotas Tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU*. Rio de Janeiro. 237 pp.
- 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. (2014) Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. *Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE*, Recife-PE.
- Johnke, B. (2002) Emissions from waste incineration: good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 455-468.
- Lombardi, L., Carnevale, E., Corti, A. (2015) A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, (37), 26-44. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>
- Luiz, B., Suski, C. A. (2021) Avaliação da geração de gases de efeito estufa em diferentes tratamentos de resíduos domiciliares – Estudo de caso em Florianópolis-SC. *Metodologias e Aprendizado*. (4), 89–98. <https://doi.org/10.21166/metapre.v4i.1489>
- Machado, F. L. O., Magalhães, G. V. V., Lima, A. C. A., Albuquerque, P. C., stefanutti, R., Albuquerque, L. (2021). Valorização dos resíduos orgânicos através da biodigestão anaeróbica com a utilização da análise multivariada. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, **7**(1), p.4893-4903.
- Melquíades, T.F., Carvalho, M., Araújo, Y. R. V., Coelho Junior, L. M. (2019) Pegada de carbono associada ao processo de pasteurização de sorvetes. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá-PR. **12**(2), 609-629. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p609-629>
- Piaia, E., Castilhos Júnior, A. B., Nadaleti, W. C., Silva, C. S., Haertel, P. L. (2021) Potencialidades do uso energético de combustíveis derivados de resíduos sólidos urbanos (CDRU) na indústria brasileira. *Anais. IV Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos – CONRESOL*. Gramado-RS.
- REDEACV. Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida. (2017) Combustível Derivado de Resíduos: ACV Comparativa. *Estudos e Casos Empresariais*. Votorantim Cimentos. São Paulo-SP.
- Rocha, M. R., Lemme, R. F. F., D'agosto, M. A. (2014) 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)*.

- Sampaio, R. P. (2014) *Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana*. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 162 pp.
- Soares, E.L.S.F. (2011) *Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos*. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro-RJ. 133 pp.
- SIMAPRO, PRé Consultants. (2021) *Software Simapro, versão 9.2.0.2*. About SimaPro: The world's leading LCA software chosen by industry, research institutes, and consultants in more than 80 countries.
- Silva, V. A. O. (2021) *Aplicação de Avaliação de Ciclo de Vida na estimativa das emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao consumo de alimentos: Estudo de caso em Brasília*, DF. Dissertação. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília-DF, 289pp.
- Tavares, G. S. C. (2018) *Contribuição para a sustentabilidade na gestão dos resíduos sólidos urbanos nos municípios da Região Metropolitana*. Dissertação. Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 124pp.
- Thakur, P., Ganguly, R., Dhulia, A. (2018) Occupational Health Hazard Exposure among municipal solid waste workers in Himachal Pradesh, India. *Waste Management*, (78), 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.waSiMAAn.2018.06.020>
- Verschoor, A. H., Reijnders, L. (1999) The use of life cycle methods by seven major companies. *Journal of Cleaner Production*, (7), 375-382.
- Visedo, G., Pecchio, M. (2019) ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 64 pp.