

# 7º CONRESOL

7º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

CURITIBA/PR - 14 a 16 de Maio de 2024

## POTENCIAL DE DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTOS: ESTUDO DE CASO DE IMBITUBA/SC

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.7.24.IV-011>

**Joana Zanette Crema, Adilson Geraldo Machado, Elise Sommer Watzko, Silvia Layara Floriani Andersen, Elaine Virmond (\*)**

\* Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá - Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, Departamento de Energia e Sustentabilidade, Núcleo de Desenvolvimento de Processos de Produção de Energia (NUDAPE), [elaine.virmond@ufsc.br](mailto:elaine.virmond@ufsc.br)

### RESUMO

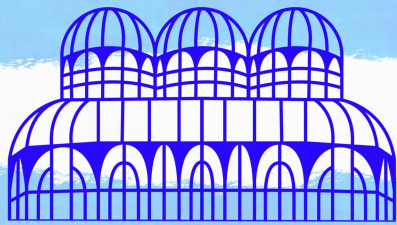
O desenvolvimento e a aplicação de tratamentos alternativos ao aterramento de resíduos sólidos urbanos (RSU) de forma integrada aos demais níveis da hierarquia de gestão de resíduos sólidos (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar, aterrar) gera benefícios sociais, econômicos e ambientais. A utilização de combustíveis derivados de RSU é uma opção para reduzir a quantidade de resíduos destinada a aterro sanitário e oferecer tratamento alternativo com foco no aproveitamento de frações não recicláveis, ou com processo de reciclagem ainda não disponível ou acessível atualmente (rejeitos), aliado à recuperação energética. Neste contexto analisou-se físico-quimicamente os rejeitos resultantes da triagem de resíduos sólidos urbanos de um município ao Sul do Brasil para produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), com foco na aplicação para indústria de cimento como alternativa aos combustíveis fósseis para produção de energia térmica. No presente estudo, as amostras de rejeitos coletadas foram classificadas em diferentes tipos de frações, analisadas gravimetricamente e caracterizadas em laboratório para análises imediata e elementar de poder calorífico. Como resultado, obteve-se um combustível possível de ser utilizado em fornos de cimenteiras, com alto poder calorífico (PCS: 26,56 MJ/kg; PCI: 24,55 MJ/kg), baixo teor de umidade (7,33%), baixo teor de cloro (0,13%) e baixo teor de cinzas (4,69%), parâmetros em base seca. A expectativa é a de que a produção de CDR se expanda como forma de valorização de RSU e que a utilização de CDR como combustível alternativo contribua para a redução das emissões de gases poluentes da indústria de cimento para a atmosfera. Dessa forma, aliam-se ações que podem contribuir para alcance dos seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): 6) Água potável e saneamento, 7) Energia limpa e acessível, 11) Cidades e comunidades sustentáveis, 12) Consumo e produção sustentável e 13) Ação contra a mudança global do clima.

**PALAVRAS-CHAVE:** recuperação energética; coprocessamento; combustível alternativo.

### ABSTRACT

The development and application of alternative treatments to the landfill of municipal solid waste (MSW) in an integrated manner with the other levels of the solid waste management hierarchy (reduce, reuse, recycle, recover, landfill) generates social, economic and environmental benefits. The use of fuels derived from MSW is an option for reducing the amount of waste going to landfill and offering alternative treatment with a focus on the use of non-recyclable fractions, or with a recycling process that is not currently available or accessible (tailings), combined with energy recovery. In this context, the tailings resulting from the sorting of municipal solid waste in a municipality in the south of Brazil were physically and chemically analyzed for the production of Refuse Derived Fuel (RDF), with a focus on application to the cement industry as an alternative to fossil fuels for the production of thermal energy. In this study, the tailings samples collected were classified into different types of fractions, analyzed gravimetrically and characterized in the laboratory for immediate and elemental analyses of calorific value. As a result, a fuel was obtained that could be used in cement kilns, with high calorific value (PCS: 26.56 MJ/kg; PCI: 24.55 MJ/kg), low moisture content (7.33%), low chlorine content (0.13%) and low ash content (4.69%), parameters on a dry basis. The expectation is that CDR production will expand as a way of recovering MSW and that the use of CDR as an alternative fuel will help to reduce emissions of polluting gases from the cement industry into the atmosphere. This will combine actions that can contribute to achieving the following Sustainable Development Goals (SDGs): 6) Drinking water and sanitation, 7) Clean and affordable energy, 11) Sustainable cities and communities, 12) Sustainable consumption and production and 13) Action against global climate change.

**KEY WORDS:** energy recovery; co-processing; alternative fuels.



# 7º CONRESOL

## 7º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

CURITIBA/PR - 14 a 16 de Maio de 2024

**ATENÇÃO:** A área que está sombreada (em amarelo) é a que poderá ser livremente editada pelo autor do trabalho. Isto é feito para proteger o cabeçalho e o rodapé de eventuais deformações. Posteriormente, a Comissão Organizadora retirará este sombreado e transformará o texto em arquivo PDF.

### INTRODUÇÃO

Um problema muito grande relacionado ao saneamento básico é a geração desenfreada de resíduos sólidos urbanos (RSU) e sua disposição inadequada no meio ambiente. O crescimento acelerado da geração de RSU se deve principalmente ao aumento da população e ao consumo de produtos industrializados, integrados aos novos hábitos culturais e alimentares da sociedade moderna. Por outro lado, a crescente demanda por energia tem promovido a busca por fontes alternativas e renováveis de energia, sendo possível recuperar energia de RSU e combustíveis derivados desses.

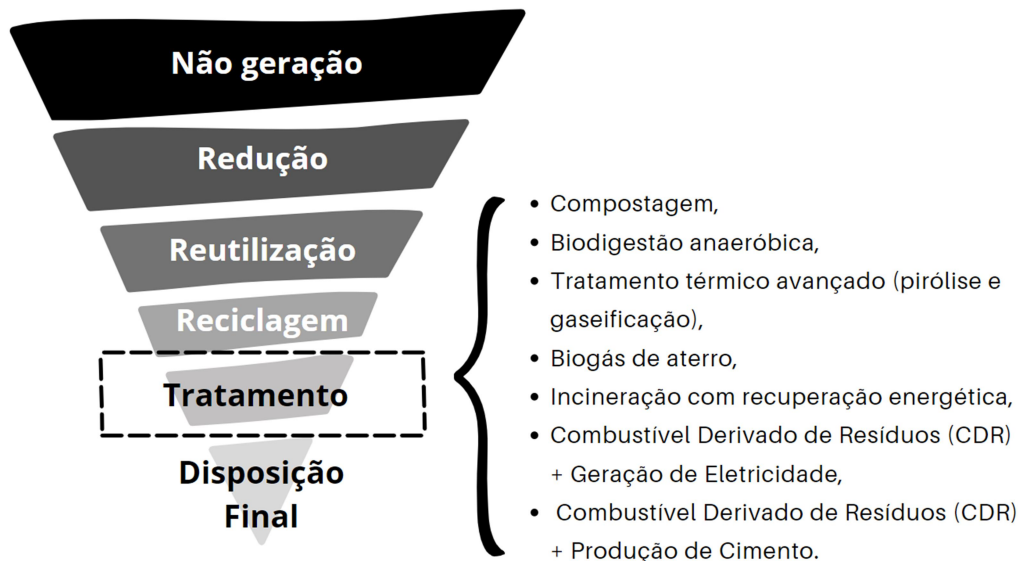
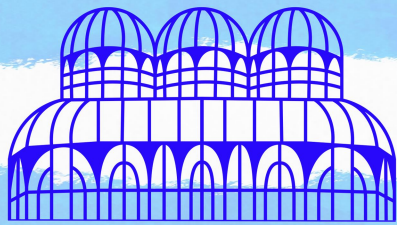
No Brasil, a massa coletada *per capita* em 2022 foi de 1,04 kg/(hab.dia), totalizando 211.000 t/dia, e 77.076.428 t/ano necessitando de gerenciamento adequado (ABREMA, 2023), com previsão de chegar a 100.000.000 t/ano em 2033 e a 120.900.000 t/ano em 2050. A disposição inadequada de RSU aumentou mais de 16% entre 2010 e 2019 (ABRELPE, 2020). Em 2022, apenas 61,1% dos RSU coletados foram destinados a aterros sanitários, prática considerada ambientalmente correta pela Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (BRASIL, 2010), e 38,9% (27.917.624 t) tiveram destinação inadequada (aterros controlados e lixões).

As despesas municipais com limpeza urbana (varrição de vias e limpeza de áreas públicas, coleta, transporte, tratamento e disposição final) somaram R\$29,154 bilhões em 2022, desses, R\$3,143 na região sul, com custo per capita médio nacional de R\$11,96 por habitante por mês. Em 2018, apenas 259 dos 295 municípios de Santa Catarina informaram dados ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Os dados mostram que foram gastos mais de R\$607 milhões com serviços administrativos de coleta e destinação de RSU, numa média de R\$139,36/(habitante.ano), sendo que do total gasto, 74% foram despesas somadas de apenas 16 municípios. Criciúma, Araranguá, Laguna e Tubarão juntos gastaram mais de R\$28 milhões, cerca de 5% da despesa total do estado (BRASIL, 2019).

O mercado de limpeza urbana como um todo movimentou (gastos municipais e privados) aproximadamente R\$31,2 bilhões (ABREMA, 2023), mas tendo-se a destinação em aterros como a que ainda prevalece, à qual têm-se diversos impactos ambientais negativos associados. A gestão e o gerenciamento de RSU têm grande peso nas finanças das administrações municipais, que são responsáveis por esse serviço, sendo imprescindível que se busque novas alternativas para viabilizar a sustentabilidade financeira.

Centros de triagem de RSU ainda são escassos no estado de Santa Catarina e, quando presentes, o desafio da administração municipal é conscientizar a população para separação de resíduos nas residências, facilitando o trabalho na triagem e ampliando a possibilidade de reciclagem de materiais, tal como indicado no Mapeamento da cadeia de reciclagem em Santa Catarina realizado pela Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina em 2018 (FIESC, 2018). A Lei 14.026, de 15 de julho de 2020 (BRASIL, 2020), atualizou o marco legal do saneamento básico no Brasil e os prazos da PNRS para disposição final ambientalmente adequada de rejeitos, mas o país ainda tem quase dois mil lixões ativos.

A gestão de resíduos sólidos indica uma ordem de preferência de ações para reduzir e gerenciar os resíduos, chamada de hierarquia dos resíduos (Figura 1). Esse conceito foi definido pela PNRS e tem como objetivo tornar a gestão dos resíduos mais eficiente e criar novas oportunidades de negócios envolvendo a otimização do processo de tratamento dos resíduos (BRASIL, 2010). As etapas de não geração, redução, reutilização e reciclagem de materiais devem ter prioridade sobre a recuperação, ou tratamento, de resíduos para que apenas o resíduo recusado (rejeito) seja utilizado na etapa de tratamento térmico em sistemas *Waste-to-Energy* - WtE (PILISSÃO et al., 2021). A conversão de RSU em CDR é uma opção de tratamento dentro do gerenciamento integrado de resíduos que pode reduzir esse custo como também é uma opção de fonte alternativa e, em parte, renovável de energia.



**Figura 1: Hierarquia do gerenciamento de resíduos com destaque para opções de tratamento. Fonte: Autores do Trabalho.**

O CDR pode ser empregado na geração de energia no setor industrial e energético, com potencial para proporcionar uma conversão térmica eficiente e de baixo custo; minimizar a destinação inadequada de resíduos e os consequentes passivos ambientais; reduzir a quantidade de resíduos aterrados, aumentando a vida útil de aterros sanitários; e de agregar valor à cadeia de resíduos, contribuindo para se avançar no desenvolvimento do setor de gerenciamento de RSU em Santa Catarina. Buscar alternativas para otimizar o gerenciamento de RSU e integrá-lo ao setor energético pode contribuir não apenas para melhorar as práticas de saneamento básico no estado de Santa Catarina e no país (consonantes aos ODS 6 e 11) e à formas alternativas e mais sustentáveis de geração de energia (ODS 7), como também em termos de destinação de rejeitos da triagem de RSU com menor impacto ambiental comparada ao cenário atual de disposição em aterro sanitário que incorre na emissão de gases de efeito estufa (ODS 13). Esse tratamento alternativo poderá ser integrado a práticas atuais de tratamento de RSU por centros de triagem ou empresas de saneamento (aterros sanitários), possibilitando ampliar o gama de processos e produtos, tal como o CDR, que pode ser comercializado, gerando receita adicional a partir do que antes era simplesmente aterrado, ou o CDR pode ser produzido por usinas termelétricas, que podem atuar como co-processadoras de resíduos, tal como já ocorre no setor cimenteiro. Oportuniza-se, assim, a oferta de novo combustível para o setor energético, com potencial impacto positivo por meio da substituição de combustíveis fósseis por combustível em parte renovável, com potenciais ganhos de eficiência energética e redução da emissão de poluentes. Assim, desenvolve-se novo elo entre o setor de tratamento de resíduos e o setor energético, com vantagens para ambos os lados.

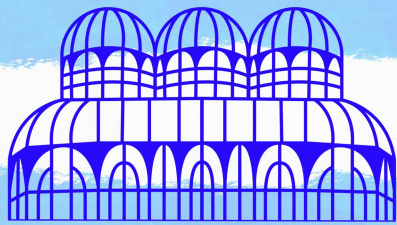
## OBJETIVOS

Neste trabalho, o rejeito resultante da triagem de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de um município do sul do Brasil, Imbituba/SC, foi caracterizado visando ao desenvolvimento e à aplicação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) na indústria de cimento.

## METODOLOGIA

### Objeto de estudo

O município de Imbituba está localizado no litoral sul de Santa Catarina (SC), a 90 km de Florianópolis, possui área de 184,79 km<sup>2</sup> e população de 52.579 habitantes. A Cooperativa de Trabalho dos Catadores de Material Reciclável (COOPERZIMBA) desenvolve atividades de coleta, triagem e reciclagem de resíduos no município. Dados sobre a COOPERZIMBA foram coletados e analisados para descrever a situação da gestão de resíduos em Imbituba/SC.



### Determinação da composição gravimétrica do rejeito da triagem de RSU

Machado (2022) coletou três amostras de rejeito da triagem de RSU da COOPERZIMBA em 2021: 07/04/2021, 24/07/2021 e 06/11/2021. Os materiais da última coleta foram utilizados no presente estudo. Para a atividade de coleta foram utilizados equipamentos de proteção individual (macacões impermeáveis, luvas, óculos de proteção e máscaras), quatro contentores de 240 L cada, lona plástica preta, balança, pás para manipulação do lixo, estufa com regulagem de temperatura, bandejas metálicas e grelha. A metodologia utilizada por Soares (2011) foi aplicada na coleta, adaptando-se a parcela de quarteamento de duas para uma parte amostrada. O ponto inicial foi escolher quatro pontos de amostragem no container de rejeito da triagem de recicláveis, seguido do preenchimento dos quatro contentores com o material que seria destinado encaminhado para aterro sanitário. Posteriormente, foi realizado o espalhamento do material amostrado sobre uma lona plástica e seu quarteamento. O total de RSU coletado foi de 960 L (MACHADO, 2022). A coleta está ilustrada na Figura 2.



Figura 2: Coleta de amostras de rejeitos da triagem de RSU de Imbituba/SC. Fonte: Autores do Trabalho.

Do quarteamento restaram cerca de 10 kg de RSU, com o qual se fez novamente o espalhamento e separação nas seguintes frações: orgânicos - OR (restos de alimentos e folhas de vegetais); papel/papelão - P/P; plástico rígido - PR (plásticos com maior resistência e densidade, tais como polietileno de alta densidade, garrafas PET, PVC, entre outros); plástico macio - PM (plásticos com alta maleabilidade e baixa densidade, tais como polietileno de baixa densidade, polipropileno, entre outros); poliestireno expandido - EPS; madeira - MD; trapos - TR; metais - MT; vidro - VD; outros - OU. As frações separadas foram colocadas em sacos plásticos identificados e pesadas em balança de solo (KA-120, Exacta) para determinação da composição gravimétrica (% em massa de cada componente da mistura).

### Caracterização físico-química das frações combustíveis do rejeito da triagem de RSU

A caracterização físico-química incluiu a determinação do teor de umidade, análises imediata e elementar, determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) e do Poder Calorífico Inferior (PCI) das frações combustíveis do rejeito da triagem: P/P, PM, PR, EPS, MD, OR, TR e OU. O teor de umidade foi determinado a partir dos procedimentos descritos pela norma brasileira NBR 6457/86 em estufa (SSDcr 480 L, Solidsteel) a temperatura de 105 °C por cerca de 24 h. Após constância de massa, o teor de umidade foi calculado. As amostras secas de cada uma das frações do rejeito foram trituradas e encaminhadas para análise (Quadro 1).



**Quadro 1: Metodologias empregadas nas análises imediata e elementar. Fonte: Elaborado pela autora (2022).**

**Metodologia**

<i>Análise Imediata</i>	
Umidade (U)	PO-158/ ASTM D 7582-15/ PO-158/ ASTM D 7582-15 (TGA)
Matéria volátil (MV)	PO-061/ ASTM D 3175/ PO-158/ ASTM D 7582-15 (TGA)
Cinzas (CZ)	PO-060/ ASTM D 3174/ PO-158/ ASTM D 7582-15 (TGA)
Carbono fixo (CF)	PO-068/ ASTM D 3172/ PO-158/ ASTM D 7582 (TGA)
<i>Análise Elementar</i>	
Carbono (C)	PO-197/ PO-197
Hidrogênio (H)	PO-197
Nitrogênio (N)	PO-197/ PO-197
Enxofre (S)	ASTM D 4239/18 E <sup>1</sup> Método A/ PO-064
Oxigênio (O)	por diferença
Cloretos (Cl)	ABNT NBR 9917:2009 / SMWW, 23ª Edição, Método 4500-Cl-B / PO-082

O PCS foi determinado em calorímetro (AC500, Leco) empregando-se o método PO-063/ASTM D 5865-13. O PCI foi estimado a partir do PCS por meio da equação de Dulong:  $PCI = PCS - 2,43(9H + U)$ , onde: PCS e PCI são dados em MJ.kg<sup>-1</sup>; H é a fração mássica do hidrogênio na amostra, determinada na análise elementar; U é o teor de umidade da amostra em % em massa, determinado na análise imediata. A análise elementar e a determinação de PCS de PM e EPS não puderam ser realizadas devido às suas características, que impossibilitaram a inserção da quantidade mínima de amostra no compartimento de análise dos equipamentos empregados. Para análise elementar da fração de PM, foram utilizados valores aproximados de plásticos PEBD e PP, e na análise elementar do EPS, valores aproximados de PS. Para a fração de PM utilizou-se a média do poder calorífico de plásticos PEBD e PP, e para EPS, valores de OS. O CDR1 incluiu as oito frações combustíveis encontradas no rejeito. Para reduzir o teor de CZ do CDR, nova composição (CDR2) foi proposta, sem a fração OU (maior teor de CZ).

### **Análise de aplicabilidade do CDR na indústria de cimento**

Após a caracterização das frações componentes do rejeito da triagem de RSU, as frações combustíveis foram selecionadas para a composição do CDR: P/P, PM, PR, EPS, MD, OR, TR, OU (média ponderada pelo % mássico de cada material na composição dessa mistura). Os resultados foram comparados com a legislação brasileira (NBR 16.849/2020) e europeia (UNE-EN 15359/2012), e também com a literatura. Além disso, foram tomadas como referência as especificações básicas para recebimento de CDR de uma indústria de cimentos nacional.

## **RESULTADOS**

### **Composição gravimétrica do rejeito da triagem de RSU**

A determinação da composição gravimétrica do rejeito (10 frações) resultou nos dados ilustrados na Figura 3: 23,96% P/P, 17,58% VD, 16,90% PM, 11,40% OR, 11,08% OU, 7,86% TR, 4,63% PR, 2,39% EPS, 2,16% MT e 2,03% MD. Parte significativa da umidade dos rejeito estava concentrada nas frações de PM (12,91%) e MD (11,32%), seguido de EPS (9,60%), OR (6,04%), OU (5,87%), TR (5,35%), P/P (4,71%), PR (1,65%), VD (0,98%), MT (0,88%).

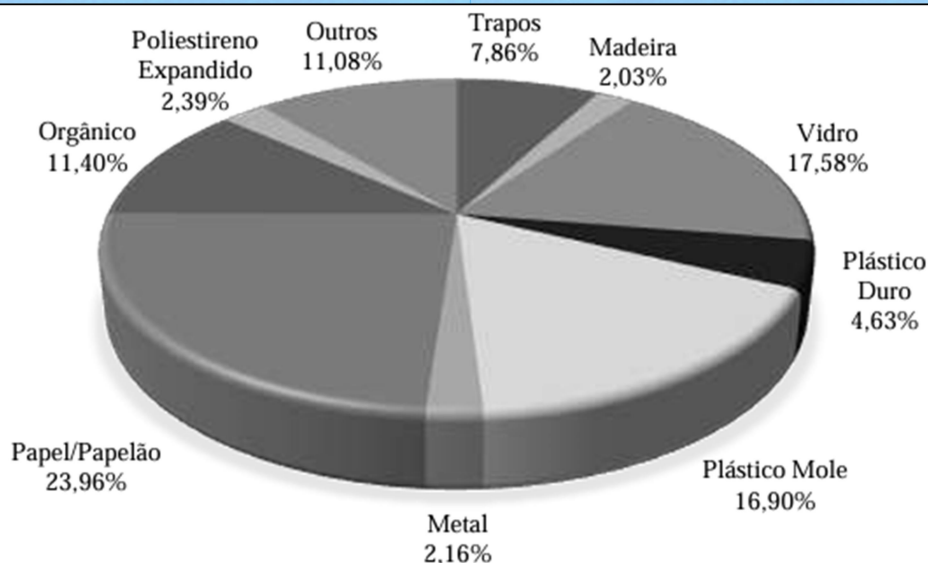
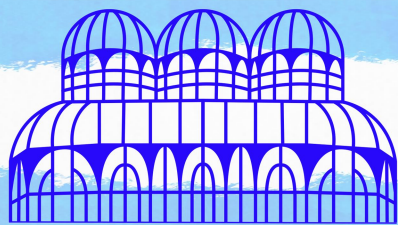


Figura 3: Coleta de amostras de rejeitos da triagem de RSU de Imbituba/SC. Fonte: Autores do Trabalho.

### Composição imediata, análise elementar e poder calorífico

Na Tabela 1 foram apresentados os resultados das análises imediata e elementar, e de PCS e PCI das frações selecionadas (combustíveis) para a composição do CDR. Os valores de cada parâmetro da Tabela 1 para CDR1 e CDR2 são resultado de uma média ponderada pelo % mássico de cada material na composição dessa mistura.

Tabela 11 - Caracterização das frações de rejeito da triagem de RSU de Imbituba/SC

	P/P	PM	PR	EPS	MD	OR	TR	OU	CDR1	CDR2
<i>Análise imediata</i>										
CZ [%, b.s. <sup>a</sup> ]	5,70	1,76	1,51	0,61	14,97	7,61	3,80	67,62	13,48	4,69
MV [%, b.s.]	85,21	97,49	98,49	99,39	68,33	75,84	85,89	22,46	78,40	87,49
CF [%, b.s.]	9,09	0,75	0,00	0,00	16,70	16,55	10,31	9,92	8,12	7,83
U [%, c.r. <sup>b</sup> ]	8,54	3,31	0,83	1,91	8,37	15,67	4,88	8,96	7,56	7,33
<i>Análise elementar</i>										
C [%, b.s.]	53,18	85,60 <sup>c</sup>	84,17	91,57 <sup>c</sup>	46,42	41,58	52,11	7,50	54,25	61,85
H [%, b.s.]	8,17	13,40 <sup>c</sup>	11,23	7,80 <sup>c</sup>	5,58	7,15	6,44	2,33	8,18	9,13
N [%, b.s.]	0,24	0,26 <sup>c</sup>	0,06	0,15 <sup>c</sup>	0,82	1,33	1,02	0,60	0,53	0,52
S [%, b.s.]	0,14	0,00 <sup>c</sup>	0,22	0,04 <sup>c</sup>	0,06	0,14	0,15	0,08	0,11	0,11
O <sup>d</sup> [%, b.s.]	32,49	0,62 <sup>c</sup>	2,81	0,00 <sup>c</sup>	32,15	42,19	36,48	21,87	23,75	24,06
Cl [%, b.s.]	0,08	0,00 <sup>c</sup>	0,01	0,00 <sup>c</sup>	0,28	0,43	0,17	0,17	0,13	0,13
<i>Poder calorífico</i>										
PCS [MJ.kg <sup>-1</sup> , b.s.]	19,53	38,95	44,10 <sup>c</sup>	41,39 <sup>f</sup>	21,88	18,34	21,62	23,11	26,08	26,56
PCI [MJ.kg <sup>-1</sup> , b.s.]	17,72	36,01	41,62	39,63	20,65	16,76	20,20	22,60	24,28	24,55

<sup>a</sup> Base seca; <sup>b</sup> Base conforme recebida; <sup>c</sup> Resultados de Sharuddin et al. (2017); <sup>d</sup> Obtido por diferença; <sup>e</sup> Resultados de Areeprasert et al. (2017); <sup>f</sup> Resultado de Pessoa Filho (2020); Composições de CDR1 e CDR2 calculadas por balanço de massa considerando mistura homogênea, ponderadas pela composição gravimétrica. Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os resultados da análise imediata indicaram MD e OR como frações com maiores teores de CF (16,70% e 16,55% b.s., respectivamente). O teor de MV foi alto para todas as frações (68,33% a 99,39%, b.s.), com exceção da OU (22,46%, b.s.), representada em grande parte por areia, terra e materiais não identificados. Apesar disso, o teor de MV do CDR1 foi 78,40% (b.s.) pela expressiva contribuição da fração de EPS (99,39%, b.s.), PR (98,49%, b.s.) e PM (97,49%, b.s.). O teor de umidade para CDR1 (7,56%, c.r.) ficou acima da faixa indicada por Sharma et al. (2024) (0,79-3,57%, c.r.). Esse maior valor se deve principalmente à fração de OR (U=15,67%, c.r.).



O teor de CZ também se mostrou compatível com outros estudos realizados (2,80%-30%, b.s.), resultando em 13,48% (b.s.) para CDR1, porém, esse valor ficou acima do limite aceitável pela indústria cimenteira no Brasil (<12%). Esse resultado se deve à fração OU, que possui o maior teor de CZ (67,62%, b.s.). Pode-se perceber um maior poder calorífico nas frações que apresentaram altos teores de C e H e baixos teores de O: PR (PCI=41,62 MJ/kg, b.s.), PM (PCI=36,01 MJ/kg, b.s.) e EPS (PCI=39,63 MJ/kg, b.s.). Segundo Obernberger et al. (2006), problemas de emissão relacionados a biocombustíveis sólidos podem ser esperados quando a concentração de N é maior que 0,6% em massa. As frações que apresentaram teores altos de N foram OR (1,33%, b.s.), TR (1,02%, b.s.) e MD (0,82%, b.s.), porém, CDR1 apresentou teor de 0,53% (b.s.), estando abaixo do valor de referência citado.

O teor de S de CDR comumente é inferior aos valores de referência dos combustíveis fósseis convencionais (0,1-0,2% em CDR, 3-5% em combustíveis fósseis), conforme expresso por Genon e Brizio (2008). Sharma et al. (2024) encontraram a faixa de 0,3%-0,6%, b.s. para CDR aplicado na indústria cimenteira. Nas frações do rejeito estudado, não foram encontradas concentrações de S maiores que 0,22% (b.s.), sendo que o CDR1 apresentou 0,11% (b.s.).

A utilização de CDR pode representar um aumento na concentração de Cl em relação aos combustíveis convencionais (0,3-0,5% em CDR, conforme Sharma et al. (2024), e 0,1% em coque de petróleo segundo Genon e Brizio (2008) dado que esse contaminante é encontrado principalmente em plásticos, compósitos, combustíveis e resíduos alimentares (VICZEK et al., 2020). As frações de PM (0,00%, b.s.), PR (0,01%, b.s.) e EPS (0,00%, b.s.) não apresentaram Cl, estando esse presente apenas nas frações OR (0,43%, b.s.), MD (0,28%, b.s.), TR e OU (0,17%, b.s.). O CDR1, por sua vez, apresentou 0,13% (b.s.) de Cl. Foram observados maiores valores de PCS e PCI nas frações de PM, PR e EPS. Para a amostra de CDR1, foi estimado PCS de 26,08 MJ/kg (b.s.) e PCI de 24,28 MJ/kg (b.s.), valores maiores do que os apresentados por Sharma et al. (2024) (PCI=12,07-16,08 MJ/kg, b.s.) e do que o do carvão da região sul de SC, que apresenta PCS=18,3 MJ/kg segundo Machado (2022), mas cerca de 24% menor do que o PCI do coque de petróleo (34,38 MJ/kg, b.s., AKDAG et al., 2016).

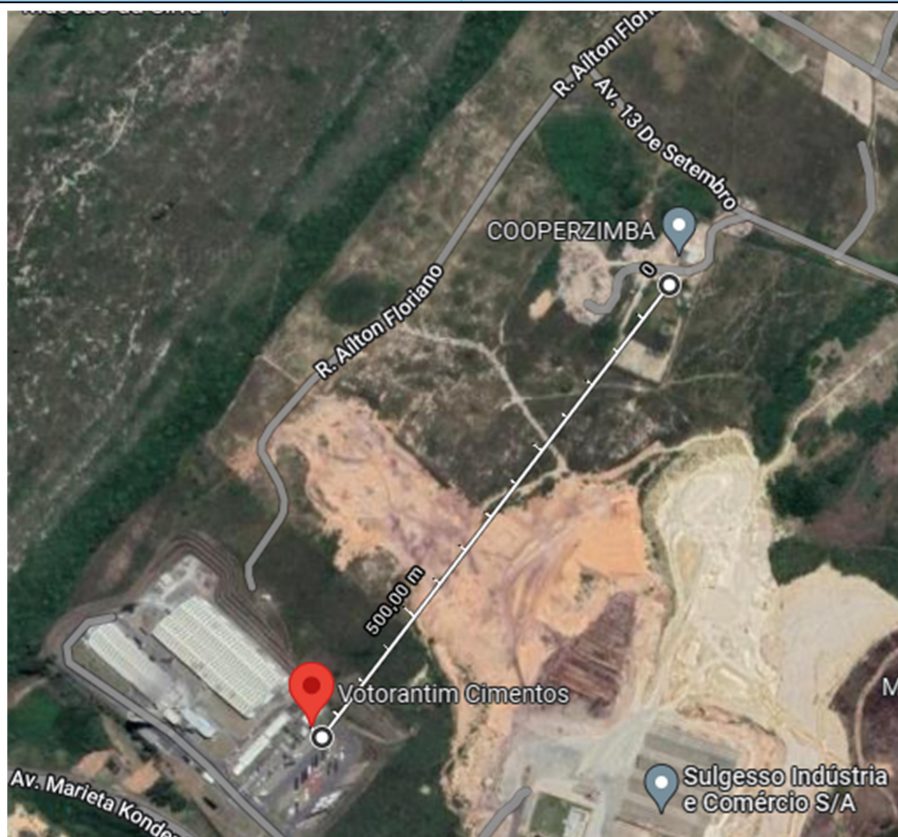
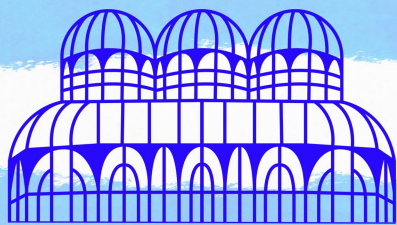
### Potencial de aplicação do CDR na indústria de cimento

Segundo o SNIS, no ano de 2020 foram coletadas 21.500,7 t de resíduos sólidos domiciliares em Imbituba/SC, sendo uma taxa de geração per capita diária de 1,3 kg/hab.dia. Desse total, 93,72% foram aterrados e apenas 6,28% reciclados. A COOPERZIMBA opera a coleta seletiva de materiais recicláveis no município e conta, atualmente, com mais de 30 associados.

Com três veículos de coleta, a cooperativa recolheu em média 110 t/mês de resíduos em 2020, sendo 20% rejeito e 80% material passível de ser reciclado. Os recicláveis são enviados ao centro de triagem e o rejeito é encaminhado ao aterro do município de Pescaria Brava, localizado a 43 km de distância. Este trabalho propôs uma rota alternativa para destinação de rejeito da triagem de RSU de Imbituba/SC, na qual, ao invés de ser destinado ao aterro, passa por um processamento para retirada de materiais inertes e trituração, obtendo-se um CDR com potencial aplicação em fornos da indústria de cimento localizada a aproximadamente 700 m de distância da COOPERZIMBA.

Segundo a norma que impõe limites de classificação de RSU para fins energéticos no Brasil (ABNT 16849/2020), o CDR1 se enquadrou em P1 para PCI e C1 para teor de Cl. Segundo as especificações básicas da indústria de cimento para recebimento de CDR 50 (partículas de até 50 mm) para a queima no pré-calcinador, o CDR1 atendeu aos requisitos de PCI (24,28 MJ/kg, b.s.), U (7,33%, b.s.) e Cl (0,13%, b.s.), divergindo apenas no teor de CZ (13,48%, b.s.), estando não conforme. Para o recebimento de CDR 25 (partículas de até 25 mm) para a queima no queimador principal, o CDR1 também atendeu aos requisitos de PCS, U, Cl, mas divergiu no teor de CZ, estando em não conformidade em ambas as aplicações.

O CDR2 (sem a fração OU) apresentou maior PCI (24,55 MJ/kg, b.s.), menor teor de CZ (4,69%, b.s.) e mesmos teores de U (7,33%, b.s.) de Cl (0,13%, b.s.) que o CDR1, estando assim em conformidade com as especificações da indústria de cimento tomadas como referência tanto para CDR 50 e CDR 25. Assim, como resultado da análise do rejeito da triagem da COOPERZIMBA, obteve-se o CDR1 e o CDR2 com as características apresentadas na Tabela 1. Conforme padrões de qualidade de CDR na Europa (UNE-EN 15359, 2012) apontados por Gallardo et al. (2020), ambos se enquadrariam na classe 1. Vale destacar, contudo, que a análise de mercúrio não foi realizada neste estudo, mas será feita na sua continuidade. No que tange à análise econômica da produção do CDR, não foram realizados cálculos de simulação de viabilidade, mas deve-se considerar que a matéria-prima é RSU e que ela substitui o carvão, por vezes importado e de custo elevado. Além disso, a COOPERZIMBA fica localizada a menos de 1 km de distância da indústria de cimento (Figura 4).



**Figura 4: Imagem aérea ilustrando a localização da COOPERZIMBA e da indústria de cimento. Fonte: Google Maps (2022).**

Ou seja, a produção de CDR proveniente de RSU de Imbituba/SC para utilização por essa indústria de cimento não demandaria custos significativos de transporte, armazenamento e logística. Sendo assim, os custos envolvidos nesse processo seriam com o pré-tratamento (separação de inertes e trituração, se necessário) do material para obtenção do CDR e ajustes de operação do sistema de conversão para uma melhor eficiência.

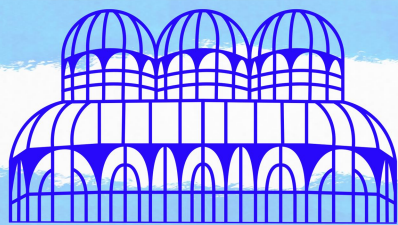
## CONCLUSÕES

Este estudo identificou a oportunidade de se traçar uma rota para produção e aplicação de CDR derivado do rejeito da triagem de RSU de Imbituba/SC como combustível na indústria de cimento. O CDR analisado pode ser uma alternativa mais interessante do que outros combustíveis, como carvão ou coque de petróleo. Adicionalmente, o CDR possui alto potencial energético, parte é renovável pela fração de biomassa (matéria orgânica biodegradável) que o compõe, contribuindo também para a redução da emissão de gases poluentes e de efeito estufa. Além da contribuição ambiental, espera-se que a aplicação do CDR derivado de RSU como combustível na indústria cimenteira gere economia financeira tanto em questões de logística e transporte, quanto em questão de aquisição da matéria-prima dado que o CDR possui menor custo do que os demais combustíveis comumente utilizados. Dessa forma, pode-se aliar destinação ambientalmente adequada de resíduos no contexto do saneamento básico e o setor energético, promovendo avanços a nível nacional em relação a cinco ODS: 6) Água potável e saneamento, 7) Energia limpa e acessível, 11) Cidades e comunidades sustentáveis, 12) Consumo e produção sustentável e 13) Ação contra a mudança global do clima.

## AGRADECIMENTO

Este trabalho recebeu apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC (Termo de Outorga Nº: 2021TR1505).





### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREMA - Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em 19/03/2024.
2. ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em 26/09/2021.
3. AKDAĞ, A.S.; ATIMTAY, A.; SANIN, F.D. Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste Management*, v. 47, Part B, p. 217-224, 2016.
4. AREEPRASERT, C. et al. Municipal plastic waste composition study at transfer station of bangkok and possibility of its energy recovery by pyrolysis. *Energy Procedia*, v. 107, p. 222-226, 2017.
5. BRASIL, Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>, Acesso em: 13/04/2020.
6. BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018. Brasília: SNS/MDR, 2019a. 247 p. : il.
7. FIESC. Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina. Mapeamento da cadeia de reciclagem em Santa Catarina 2018. Disponível em <http://www3.fiescnet.com.br/images/sustentabilidade/publicacoes/reciclagem.pdf>. em: 30/03/2021.
8. BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União: Poder Legislativo. 135. ed. Brasília, DF, 16 jul. 2020. Seção 1, p. 1. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou//lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>. Acesso em: 17/09/2020.
9. GALLARDO, A.; CARLOS, M.; COLOMER, F.J.; EDO, N.; JORGE, A. Design of solid recovered fuels from municipal solid waste and biomass. **Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos (Acipro)**, Alcoi, p. 1-10, jul. 2020.
10. MACHADO, A.G. **Aproveitamento energético dos rejeito da triagem de resíduos sólidos urbanos combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina**. 2022. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Sustentabilidade, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2022.
11. OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 11, p. 973-982, nov. 2006.
12. PESSOA FILHO, J.S. **Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental**. 2020. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.
13. PILISSÃO, Y. L.; MACHADO, A. G.; VIRMOND, E.; WATZKO, E. S. Energy recovery from Municipal Solid Waste: Opportunities and Challenges in the Brazilian scenario. **Engenharia Térmica (Thermal Engineering)**, v. 20, n. 3, p. 20-30, September 2021.
14. SHARMA, P.; SHETH, P.N.; CHOURASIA, M.; MOHAPATRA, B.N. Chemical characterization of refuse derived fuel (RDF) using Py-GC/MS. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 179, p. 106456, 2024.
15. SOARES, E.L.S.F. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.
16. VICZEK, S.A.; ALDRIAN, A.; POMBERGER, R.; SARC, R. Origins and carriers of Sb, As, Cd, Cl, Cr, Co, Pb, Hg, and Ni in mixed solid waste – A literature-based evaluation. **Waste Management**, [S.L.], v. 103, p. 87-112, fev. 2020.