



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO-QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

DALTON MENDES DE ABREU

**AVALIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E DO
SEU POTENCIAL USO COMO COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS**

FORTALEZA

2024

DALTON MENDES DE ABREU

AVALIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E DO SEU
POTENCIAL USO COMO COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Química do Centro
de Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gisele Simone
Lopes.

Coorientador: Prof. Dr. Ari Clecius Alves de
Lima.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A145a Abreu, Dalton Mendes de.
Avaliação do poder calorífico de resíduos sólidos urbanos e do seu potencial uso como combustíveis derivados de resíduos / Dalton Mendes de Abreu. – 2024.
46 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Gisele Simone Lopes.
Coorientação: Prof. Dr. Ari Clecius Alves de Lima.
1. Poder calorífico. 2. Resíduos sólidos. 3. Aproveitamento energético. 4. Combustível derivado de resíduo. I. Título.

CDD 540

DALTON MENDES DE ABREU

AVALIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E DO SEU
POTENCIAL USO COMO COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Química do Centro
de Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Química.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Gisele Simone Lopes (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ari Clecius Alves de Lima (Coorientador)
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
(NUTEC)

Prof^ª. Dr^ª. Janaína Sobreira Rocha
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
(NUTEC)

Aos meus pais Dario e Erika, a minha irmã Vanessa e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria durante toda a jornada de elaboração deste trabalho, sendo minha fonte de inspiração e amparo em todos os momentos.

À minha família, que sempre proporcionou o suporte necessário para enfrentar os desafios e superar as dificuldades.

À Professora Dr^a. Gisele Simone Lopes e ao Professor Dr. Ari Clecius Alves de Lima, pela sua orientação, paciência e motivação proporcionados ao longo deste trabalho.

À Professora Dr^a. Janaína Sobreira Rocha por ter aceitado fazer parte da banca.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de aprendizado e acesso aos recursos acadêmicos sem os quais a elaboração deste trabalho não seria possível.

Ao NUTEC, e a toda a equipe do LARSE onde realizei o estágio durante o período do TCC, pela acolhida, suporte e pela oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante o período em que fui bolsista no Laboratório de Estudos em Química Aplicada.

Aos amigos que fiz no Centro Cultural Alvorada, no curso, no PET Química, no LEQA, no NUTEC, no LabPOA e no GOU Guerreiros pelas trocas de experiências, pelo apoio mútuo e por compartilharem momentos de estudo e descontração, tornando essa jornada acadêmica mais agradável e enriquecedora.

A todos os professores e profissionais que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação acadêmica, transmitindo conhecimentos e incentivando meu crescimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho, direta ou indiretamente, e que não foram mencionados, mas que foram essenciais para o seu êxito.

RESUMO

De acordo com o Relatório What a Waste 2.0, publicado em 2018 pelo World Bank, são gerados no nosso planeta cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos anualmente, dos quais 33% não recebem o tratamento adequado, representando um risco para o meio ambiente. O relatório também projeta que haverá um aumento de 70% na geração de resíduos sólidos nos próximos 30 anos. Países da Europa Ocidental, Japão e Coreia têm empregado tecnologias em favor da redução, reciclagem e incineração controlada de resíduos para aproveitamento energético, minimizando impactos ambientais e trazendo benefícios econômicos e sociais. Apesar dos avanços alcançados em outros países, no Brasil, cerca de 39% dos resíduos coletados foram incorretamente direcionados, com destaque para as regiões Norte e Nordeste, que enviaram apenas 37% dos resíduos coletados para uma destinação final adequada do ponto de vista ambiental, causando problemas ambientais e desperdício de recursos valiosos. Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o poder calorífico de amostras de pneus de bicicleta, bandas de rodagem e flancos de pneus de carro, folhas, cascas e sementes de Nim Indiano, cascas folhas e cavacos de cajueiro, cavacos de algaroba, cascas de castanha, sarrafos de *Pinus spp* e filamentos de plástico composto de ácido poliláctico a fim de classificar e identificar quais desses resíduos possuem potencial para a geração de energia e aplicação em processos industriais. A análise de poder calorífico superior foi feita com uma bomba calorimétrica IKA modelo C200 e, em seguida, o poder calorífico inferior foi estimado. Dentre as amostras analisadas, apenas as folhas de Nim Indiano apresentaram poder calorífico inferior baixo (6,584 MJ/kg) enquanto as frações de pneus de bicicleta (31,706 MJ/kg), banda de rodagem (35,948 MJ/kg) e flancos (31,876 MJ/kg) de pneus de carro, sementes do Nim Indiano (20,594 MJ/kg) e cascas de castanha (22,015 MJ/kg) se enquadraram na classe P1, os cavacos de algaroba (16,621 MJ/kg), cavacos de cajueiro (16,485 MJ/kg), sarrafos de *Pinus spp* (15,967 MJ/kg) e filamento de ácido poliláctico (18,396 MJ/kg) se enquadraram na classe P2 e as cascas do Nim Indiano (14,865 MJ/kg) e as cascas e folhas de cajueiro (13,449 MJ/kg) foram categorizadas na classe P3, conforme a NBR 16849:2020, demonstrando potencial para serem empregadas como combustíveis derivados de resíduos em caldeiras industriais, processos de pirólise e gaseificação, e em fornos de produção de clínquer de acordo com a Resolução SIMA nº 047, de 06 de agosto de 2020 considerando o parâmetro de poder calorífico.

Palavras-chave: poder calorífico; resíduos sólidos; aproveitamento energético; combustível

derivado de resíduo.

ABSTRACT

According to the "What a Waste 2.0" report published in 2018 by the World Bank, approximately 2 billion tons of solid waste are generated annually on our planet, of which 33% do not receive proper treatment, posing a risk to the environment. The report also projects a 70% increase in solid waste generation over the next 30 years. Countries in Western Europe, Japan, and Korea have been employing technologies to promote waste reduction, recycling, and controlled incineration for energy recovery, minimizing environmental impacts and bringing economic and social benefits. Despite the progress made in other countries, in Brazil, around 39% of collected waste was improperly disposed of, with emphasis on the Northern and Northeastern regions, where only 37% of the collected waste was sent for proper environmental disposal, causing environmental issues and wastage of valuable resources. In this context, this study aims to evaluate the calorific value of samples from bicycle tires, tire treads and sidewalls, leaves, peels, and seeds of Neem, peels, leaves, and wood chips of cashew trees, carob wood chips, chestnut peels, *Pinus* spp slats, and composite plastic filaments made of polylactic acid to classify and identify which of these wastes have the potential for energy generation and application in industrial processes. The analysis of higher calorific value was conducted using an IKA C200 bomb calorimeter and then the lower calorific value was estimated. Among the analyzed samples, only Neem leaves showed a low lower calorific value (6.584 MJ/kg), while bicycle tire fractions (31.706 MJ/kg), tire tread (35.948 MJ/kg), and car tire sidewalls (31.876 MJ/kg), Neem seeds (20.594 MJ/kg), and chestnut peels (22.015 MJ/kg) fell under class P1. Carob wood chips (16.621 MJ/kg), cashew wood chips (16.485 MJ/kg), *Pinus* spp slats (15.967 MJ/kg), and polylactic acid filament (18.396 MJ/kg) fell under class P2, and Neem peels (14.865 MJ/kg) and cashew leaves and peels (13.449 MJ/kg) were categorized under class P3 according to NBR 16849:2020, showing potential for use as waste-derived fuels in industrial boilers, pyrolysis and gasification processes, and in clinker production furnaces according to Resolution SIMA No. 047, dated August 6, 2020, considering the calorific value parameter.

Keywords: calorific value; solid waste; energy recovery; refuse derived fuel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação regional na geração de RSU em 2022.....	18
Figura 2 – Percentual de RSU coletados por grande região em 2022.....	19
Figura 3 – Disposição final adequada × inadequada de RSU no Brasil em 2022.....	20
Figura 4 – Disposição final de RSU por região em 2022	20
Figura 5 – Etapas do processo de quarteamento.....	21
Figura 6 – Recorte de tabela de composição dos RSU no Ceará em 2015.....	23
Figura 7 – Recorte de quadro das normas brasileiras referentes ao tratamento térmico de resíduos, coprocessamento para produção de clínquer e emissões de poluentes atmosféricos.....	25
Figura 8 – Esquema dos componentes de uma bomba calorimétrica	29
Figura 9 – Esquemas de trocas de calor que ocorrem em calorímetros que operam nos modos adiabático (a), isoperibólico (b) e jaqueta estática (c).....	32
Figura 10 – Frações de resíduos. Folhas (a), sementes (b) e cascas (c) de Nim Indiano, pneus de bicicleta (d), banda de rodagem (e) e flancos (f) de pneu de carro, cavacos de algaroba (g), cascas de castanha (h), cavacos (i), cascas e folhas de cajueiro (j), sarrafos de <i>Pinus</i> spp. (k) e filamentos de PLA (l).....	34
Figura 11 – Estufa (a) e balança analítica (b) utilizadas para secagem e pesagem das frações de amostras.....	35
Figura 12 – Calorímetro de combustão IKA C200 utilizado para a determinação de PCS das amostras analisadas.	36
Figura 13 – Etapas de preparação da bomba para a pressurização com oxigênio ultrapuro na estação de gás.....	37
Figura 14 – PCS X PCI Estimado	40
Figura 15 – PCI de combustíveis X PCI das amostras	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios para a utilização de CDR	26
Tabela 2 – Limites para classificação dos RSUE.....	26
Tabela 3 – Resultados experimentais de PCS.....	38
Tabela 4 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança dos valores estimados de PCI	41
Tabela 5 – Valores médios de PCS e PCI em MJ/kg e valor médio de PCI em kcal/kg .	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDR	Combustíveis Derivados de Resíduos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
LARSE	Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes
NBR	Norma Técnica Brasileira
NUTEC	Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PLA	Ácido Polilático
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RSUE	Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos
SIMA	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente
TJ	Temperatura da Jaqueta
TVI	Temperatura do Vaso Interno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Resíduos Sólidos	15
3.1.1	<i>Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil</i>	17
3.1.2	<i>Geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos no Brasil</i>	18
3.1.3	<i>Gravimetria dos Resíduos Sólidos no Ceará</i>	21
3.2	Combustível Derivado de Resíduos	24
3.2.1	<i>Contexto legal e normativo</i>	24
3.2.1.1	<i>Poder Calorífico</i>	27
3.3	Calorimetria de combustão	28
3.3.1	<i>Princípios termodinâmicos básicos da calorimetria de combustão</i>	28
3.3.2	<i>Componentes de uma bomba calorimétrica</i>	29
3.3.3	<i>Modos de operação</i>	31
3.3.3.1	<i>Adiabático</i>	31
3.3.3.2	<i>Isoperibólico</i>	31
3.3.3.3	<i>Jaqueta estática</i>	32
3.3.4	<i>Funcionamento de uma bomba calorimétrica</i>	32
4	METODOLOGIA	34
4.1	Amostras e reagentes	34
4.2	Equipamento	35
4.3	Calibração do equipamento	36
4.4	Determinação do poder calorífico superior	37
5	RESULTADOS	38
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Relatório What a Waste 2.0, publicado em 2018 pelo World Bank, estima-se que sejam gerados no nosso planeta cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos anualmente. Dentre esse total, pelo menos 33% não recebem o tratamento adequado, representando um risco para o meio ambiente. O relatório também projeta que a rápida urbanização, o crescimento populacional, o desenvolvimento econômico e o consequente aumento do consumo resultarão em um aumento de 70% na geração de resíduos sólidos nos próximos 30 anos, ou seja, anualmente, serão geradas aproximadamente 3,4 bilhões de toneladas de resíduos (KAZA *et al.*, 2018).

No Brasil, estima-se que cada pessoa tenha gerado uma média de 1,04 kg de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por dia em 2022, resultando em aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU geradas no país ao longo do ano. Aproximadamente 93% dos resíduos são coletados adequadamente, representando mais de 196 mil toneladas de RSU coletadas diariamente (ABREMA, 2023). No entanto, os 7% não coletados correspondem a mais de 5 milhões de toneladas que são destinadas de forma inadequada, causando impactos negativos, como a disseminação de doenças, a degradação ambiental e o desperdício de materiais recicláveis (EFING; SILVA, 2020).

Em 2022, aproximadamente 61% dos RSU coletados foram destinados a aterros sanitários no Brasil, totalizando cerca de 43,8 milhões de toneladas de resíduos (ABREMA, 2023). Embora os aterros sanitários sejam amplamente utilizados devido ao seu baixo custo operacional e à tecnologia conhecida, eles possuem limitações em termos de capacidade de absorção de resíduos e requerem manutenção constante para evitar a contaminação ambiental por lixiviados. Além disso, esses empreendimentos exigem grandes áreas de terra, o que se torna cada vez mais desafiador nas áreas urbanas devido à escassez de espaço disponível (BERTICELLI *et al.*, 2016).

Diante desse cenário, vários países têm empregado tecnologias para reduzir o desperdício tanto nos processos de fabricação quanto no tratamento de resíduos, recuperando materiais por meio da reciclagem e do aproveitamento de resíduos orgânicos, além de investirem em automação nos processos de separação. Países como Japão, Coreia e alguns da Europa Ocidental, estão abandonando aterros sanitários em favor da redução, reciclagem e incineração controlada de resíduos para aproveitamento energético. Essas tecnologias, além de minimizar impactos ambientais, trazem benefícios econômicos e sociais, como geração de empregos e redução de

gastos municipais (KAZA *et al.*, 2018).

No entanto, apesar dos avanços alcançados em outros países, o Brasil ainda enfrenta dificuldades em implementar as regulações que aumentariam a eficiência na gestão de resíduos sólidos (SILVA *et al.*, 2016).

No ano de 2022, no Brasil, cerca de 39% dos resíduos coletados foram incorretamente direcionados, com destaque para o desempenho abaixo da média nacional nas regiões Norte e Nordeste, que enviaram apenas 37% dos resíduos coletados para uma destinação final adequada do ponto de vista ambiental (ABREMA, 2023). Essa destinação inadequada provoca problemas ambientais além do desperdício de recursos valiosos (ARRUDA; TREVIZAN, 2023).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o poder calorífico de resíduos sólidos a fim de identificar quais resíduos possuem potencial para a geração de energia utilizando o calorímetro de combustão para a sua quantificação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial energético de resíduos sólidos urbanos.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar o poder calorífico superior dos resíduos utilizando a bomba calorimétrica;
- Estimar o poder calorífico inferior dos resíduos sólidos a partir do poder calorífico superior;
- Classificar os resíduos sólidos de acordo com as normas de elegibilidade e aplicabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos

Segundo a Norma Técnica Brasileira (NBR) 10004, resíduos sólidos são definidos como resíduos oriundos de indústrias, hospitais, comércios, serviços, atividades agrícolas, domésticas e de varrição além de lodos gerados em sistemas de tratamento de água, equipamentos e instalações de controle de poluição e líquidos que possuem características que os impedem de serem lançados na rede pública de esgotos ou corpos de água.

Outra definição para os resíduos sólidos pode ser encontrada na Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e estabelece diretrizes para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010):

material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à sua origem e a sua periculosidade. Quanto à origem, o art. 13 da Lei 12.305/2010, faz a seguinte classificação (BRASIL, 2010):

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Conforme a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), é possível categorizá-los em duas classes, considerando os potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Portanto, de acordo com essa regulamentação, os resíduos podem ser classificados da seguinte maneira:

- a) Classe I - Resíduos Perigosos: São resíduos que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, representando riscos significativos à saúde pública e ao meio ambiente. Exemplos incluem materiais químicos, substâncias tóxicas, resíduos hospitalares contaminados, entre outros.
- b) Classe II - Resíduos Não Perigosos: São resíduos que não apresentam características de periculosidade, mas podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Esses resíduos podem ser subdivididos em duas categorias:
 - Classe II A - Não Inertes: Resíduos que podem sofrer processos de decomposição, degradação ou transformação físico-química, representando certo potencial de poluição do meio ambiente. Exemplos incluem resíduos orgânicos, plásticos, papel, entre outros.
 - Classe II B - Inertes: Resíduos que, quando submetidos a condições específicas, não apresentam risco de poluição ao meio ambiente, não sendo biodegradáveis, combustíveis ou solúveis em água. Exemplos incluem entulhos de construção civil, cerâmicas, vidros, entre outros.

De acordo com a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), no que diz respeito à priorização no gerenciamento de resíduos, é estabelecida a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e, por fim, a disposição final adequada dos rejeitos, levando em consideração os impactos ambientais. Bispo, Nascimento e Santos (2019) consideram que essas prioridades refletem uma tendência global de evitar a geração de resíduos sólidos, com destaque para ações específicas para reduzir e reutilizar os resíduos, de forma a minimizar a necessidade de processamento ou tratamento.

Apesar de seguir o processo de priorização de forma abrangente, ainda permanece uma porção de material que não pode ser reutilizada ou reciclada. Essa porção de resíduos sólidos, após esgotar todas as opções de tratamento e recuperação por meio de processos tecnológicos viáveis e economicamente sustentáveis, não possui outra alternativa além da sua disposição final adequada do ponto de vista ambiental, sendo denominada como rejeitos (BRASIL, 2010).

Segundo Campani (2016, p. 16), o resíduo é classificado como rejeito somente quando perde seu valor, seja ele econômico, material ou energético, ou seja, quando deixa de ser incorporado ou aproveitado em outros processos (AMARO; VERDUM, 2016).

3.1.1 Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil

A PNRS, que engloba os princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações estabelecidos pelo Governo Federal, seja de forma independente ou em colaboração com Estados, Distrito Federal, Municípios ou entidades privadas, tem o propósito de promover a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente correto dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Este fragmento da legislação destaca a complexidade e a importância da integração não apenas na compreensão e no gerenciamento dos resíduos sólidos, mas também a necessidade de políticas interdisciplinares relacionadas aos diversos aspectos sociais, ambientais e econômicos envolvidos nesse setor do saneamento básico (MAIELLO *et al.*, 2018).

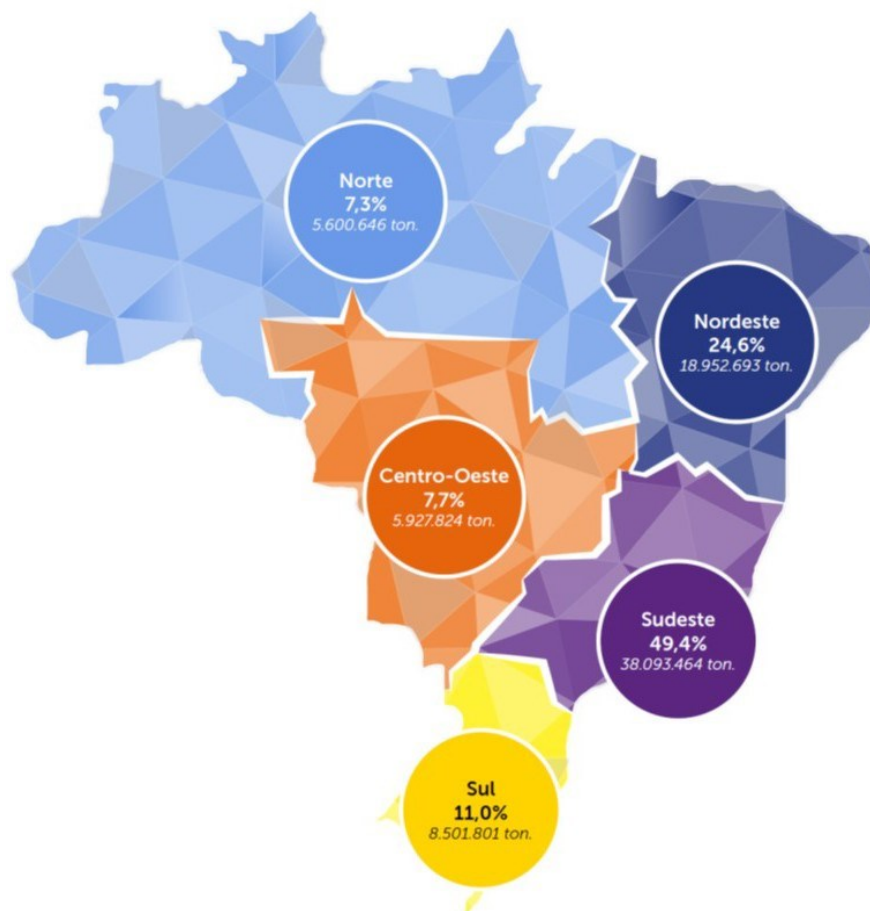
A gestão integrada de resíduos sólidos é fundamental para lidar com os desafios enfrentados pelos municípios brasileiros. A gestão intermunicipal e os consórcios de saneamento ou gestão de resíduos desempenham um papel relevante nesse contexto. A cooperação entre municípios por meio de consórcios públicos tem se fortalecido nos últimos anos, proporcionando uma abordagem regionalizada e sustentável para investimentos nessa área. Embora já existissem arranjos cooperativos antes da lei, a legislação atual fortaleceu esses modelos, conferindo-lhes personalidade jurídica e institucional. Existem aproximadamente 200 consórcios de resíduos sólidos no país, com diferentes objetivos e abrangência. A região Sudeste concentra o maior número de consórcios em funcionamento. Esses modelos cooperativos oferecem vantagens, como maior controle sobre o tratamento e disposição final de resíduos, incentivo à reciclagem e melhoria das condições de trabalho dos catadores. No entanto, a implantação e o funcionamento dos consórcios enfrentam desafios, como a falta de profissionais capacitados, apoio técnico e administrativo dos municípios, e instabilidade política. A gestão integrada de resíduos sólidos ainda apresenta muitos obstáculos a serem superados, apesar de ser um objetivo reconhecido e buscado institucionalmente (MAIELLO *et al.*, 2018).

3.1.2 Geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos no Brasil

No ano de 2022, estima-se que cada brasileiro tenha produzido em média 1,04 kg de RSU diariamente. Com base nos dados populacionais do Censo Demográfico 2022, isso resulta em cerca de 77,1 milhões de toneladas de RSU geradas ao longo do ano em todo o país. Essa quantidade representa uma média diária de aproximadamente 211 mil toneladas ou cerca de 380 kg por habitante por ano (ABREMA, 2023).

Ao analisar regionalmente, observa-se que a região Sudeste apresentou a maior geração per capita de RSU, com aproximadamente 449 kg por habitante em 2022. Por outro lado, a região Sul registrou uma geração anual de 284 kg de RSU por habitante. O Sudeste foi responsável por cerca de 104 mil toneladas diárias de RSU, correspondendo a aproximadamente 50% do total nacional. Já a região Norte contribuiu com a menor quantidade de resíduos, gerando cerca de 15 mil toneladas diárias, o que equivale a 7,3% do total do país. A Figura 1 mostra a participação regional na geração de RSU em 2022 (ABREMA, 2023).

Figura 1 – Participação regional na geração de RSU em 2022

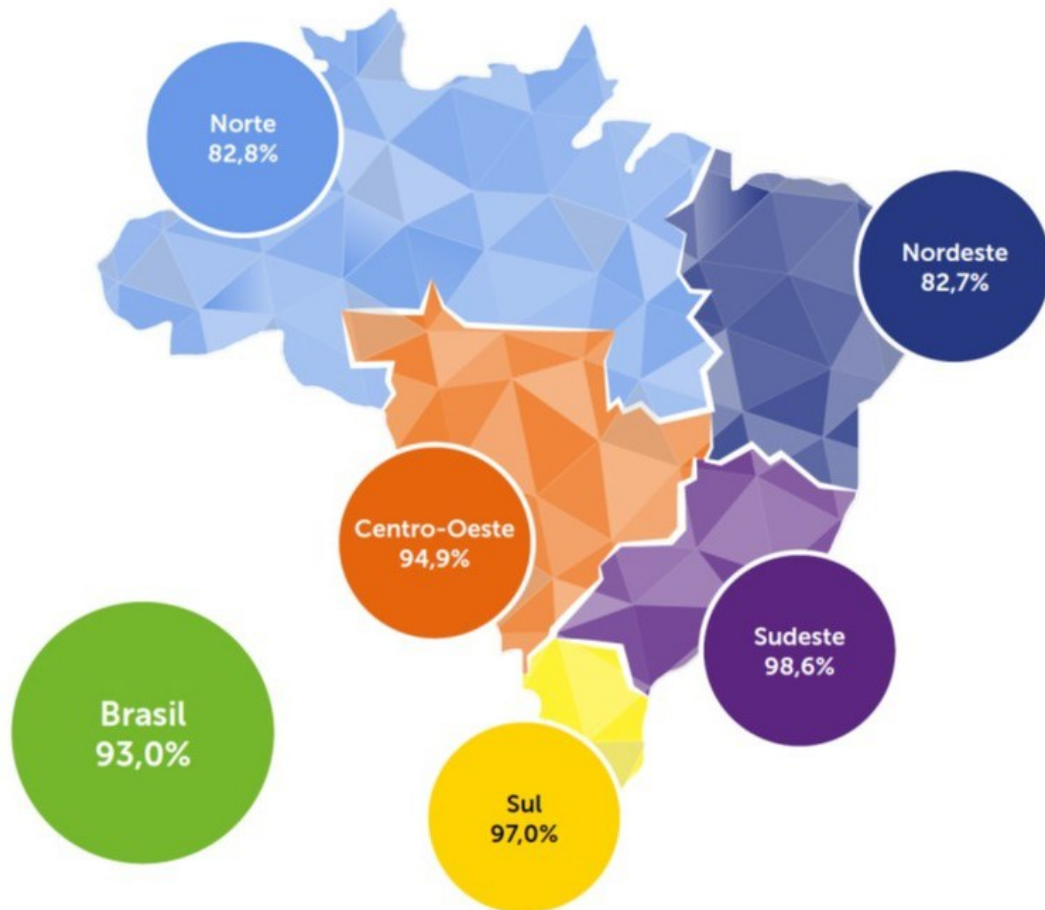


Fonte: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, (2023).

Em relação à coleta dos resíduos, estima-se que 93% dos resíduos gerados no Brasil em 2022 tenham sido corretamente coletados, totalizando mais de 196 mil toneladas de RSU coletadas diariamente. Embora essa quantidade seja significativa, é importante destacar que os 7% não coletados corresponderam a mais de 5 milhões de toneladas, que acabaram sendo destinadas inadequadamente, representando riscos ao meio ambiente e à saúde pública (ABREMA, 2023).

Ao analisar regionalmente a coleta, as projeções indicam que as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste estão acima da média nacional, com taxas de coleta de 97,0%, 98,6% e 94,9%, respectivamente. Por outro lado, as regiões Norte e Nordeste coletaram cerca de 83% dos RSU gerados, evidenciando diferenças regionais na gestão de resíduos sólidos no país. A Figura 2 mostra o percentual de RSU coletados por grande região em 2022 (ABREMA, 2023).

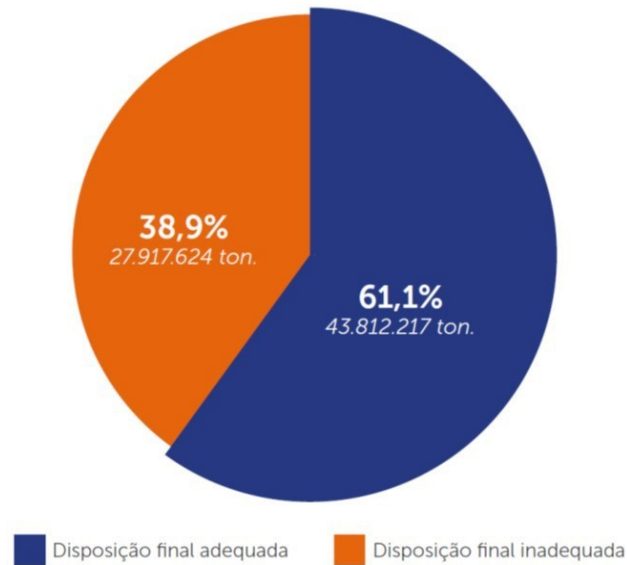
Figura 2 – Percentual de RSU coletados por grande região em 2022



Fonte: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, (2023).

No que diz respeito à destinação final dos resíduos coletados, aproximadamente 61% dos RSU coletados em 2022 no Brasil foram encaminhados para aterros sanitários, totalizando cerca de 43,8 milhões de toneladas de resíduos, como mostra a Figura 3 (ABREMA, 2023).

Figura 3 – Disposição final adequada × inadequada de RSU no Brasil em 2022



Fonte: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, (2023).

O Sudeste e o Sul se destacaram, enviando mais de 70% dos RSU coletados para aterros sanitários, superando a média nacional. Porém, as demais regiões apresentaram desempenho abaixo da média, com o Norte e o Nordeste destinando apenas 37% dos resíduos coletados para uma destinação final adequada do ponto de vista ambiental. Infelizmente, aproximadamente 39% do total de resíduos coletados em 2022 no Brasil foram destinados a áreas de disposição inadequada, presentes em todas as regiões do país. A Figura 4 mostra a disposição final de RSU por região em 2022 (ABREMA, 2023).

Figura 4 – Disposição final de RSU por região em 2022



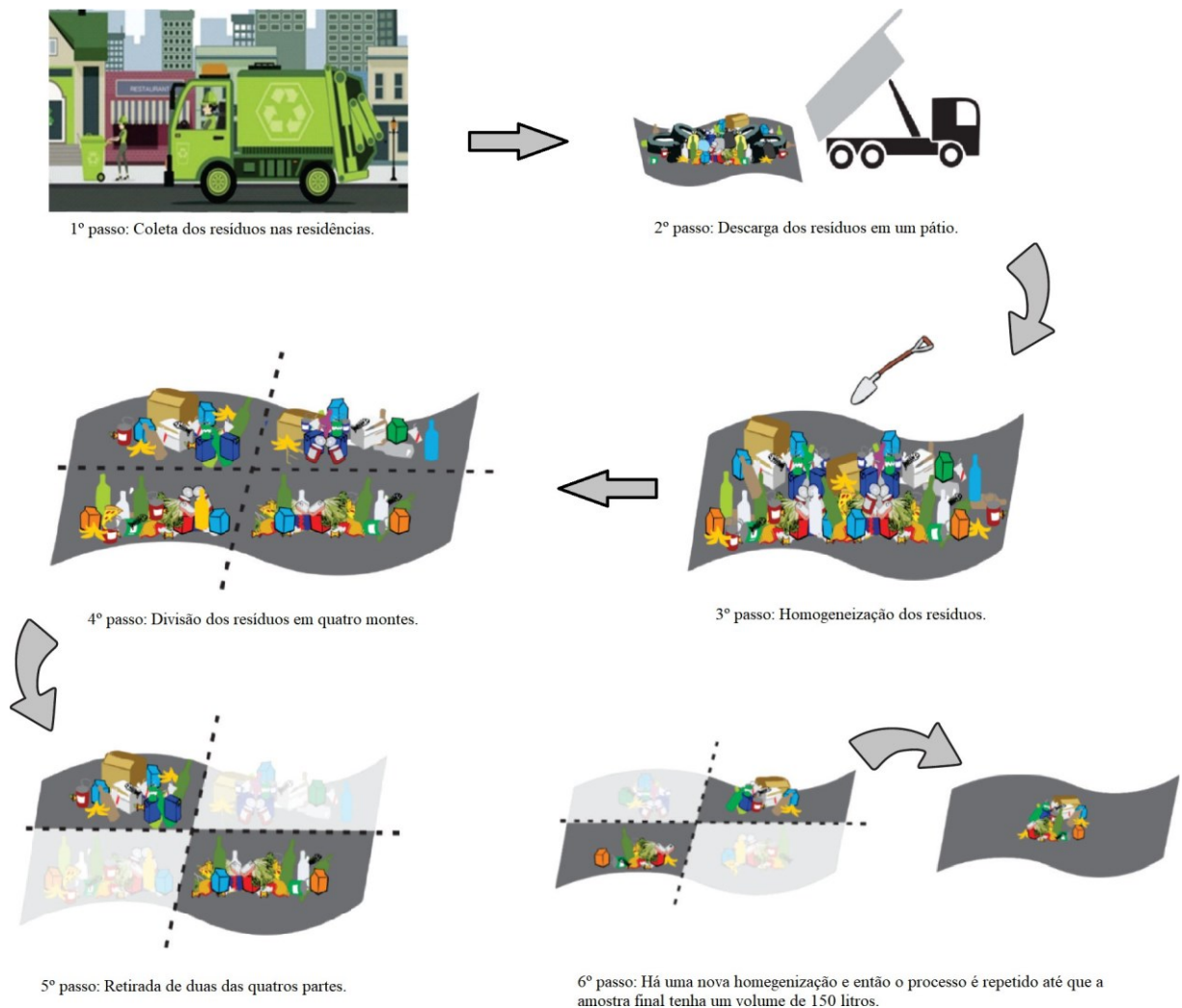
Fonte: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, (2023).

3.1.3 Gravimetria dos Resíduos Sólidos no Ceará

Em 2013, a equipe de pesquisa da Gaia Engenharia Ambiental, fez a caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos de vários municípios do estado do Ceará a fim de determinar a composição dos RSU nas regionais do estado. Foi utilizada a metodologia descrita pela NBR 10.007/2004 chamada de quarteamo, esquematizado na Figura 5, e definido como (ABNT, 2004):

Processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamo é repetido até que se obtenha o volume desejado.

Figura 5 – Etapas do processo de quarteamo



Fonte: Adaptado de Fundação Estadual do Meio Ambiente, (2019).

De acordo com a norma mencionada, a equipe de pesquisa utilizou tambores de 100 litros, sacos plásticos, pás e Equipamentos de Proteção Individual (EPI) para coletar amostras do resíduo nos locais definidos previamente, seguindo a metodologia descrita no Manual de Gerenciamento Integrado do IPT/CEMPRE (2000). Inicialmente, foi coletado um volume de 600 litros de resíduo, que foi despejado no centro de uma lona após romper os sacos. Em seguida, foi realizado o processo de quarteamento, conforme especificado na norma mencionada, resultando em uma amostra final de 150 litros. Após o quarteamento, ocorreu a triagem dos componentes, separando-os por grupos de resíduos correspondentes, e em seguida, foram pesados em uma balança digital, concluindo assim o processo (AMBIENTAL, 2015).

Os resultados obtidos pelo processo incluem a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos RSU e o peso anual em toneladas de materiais recicláveis, compostáveis e rejeitos. É importante ressaltar que, embora haja uma falta de informações por parte dos municípios cearenses em relação à composição física dos RSU, é possível fazer uma estimativa dos percentuais com base nos maiores geradores de cada região, que possuem dados conhecidos sobre a composição física dos RSU, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Recorte de tabela de composição dos RSU no Ceará em 2015

Municípios representativos	Regiões correspondentes	RSU estimados dos Municípios representativos (ton./dia)	Parcela de RSU estimados dos Municípios representativos na Região <small>* Captura Helicóptero</small>	Composição física dos RSU do Municípios representativos (%)		
				Recicláveis	Compostáveis	Rejeitos
Baturité	Maciço de Baturité	22,27	25,37%	26,00%	64,00%	10,00%
Camocim	Litoral norte	39,87	22,21%	33,00%	56,00%	11,00%
Cascavel	Litoral leste	59,83	36,83%	18,00%	61,00%	21,00%
Crateús	Sertão Crateús	55,05	31,84%	30,00%	44,00%	26,00%
Fortaleza	RMF - A	5.530,83	90,83%	26,50%	42,70%	30,80%
Iguatú	Sertão Centro Sul	79,83	23,47%	25,00%	53,00%	22,00%
Itapipoca	Litoral oeste	74,65	29,37%	29,00%	46,00%	25,00%
Juazeiro do Norte	Cariri	329,34	46,96%	37,00%	58,00%	5,00%
Maracanaú	RMF - B	269,03	43,42%	29,10%	43,90%	27,00%
Quixadá	Sertão Central	61,91	31,25%	25,80%	47,60%	26,60%
Russas	Médio Jaguaribe	42,03	21,59%	36,90%	51,30%	11,80%
Sobral	Sertão Norte	218,10	56,20%	22,40%	54,40%	23,20%
Tauá	Sertão dos Inhamuns	29,67	55,29%	34,40%	50,20%	15,40%
Tianguá	Chapada da Ibiapaba	42,34	31,53%	21,00%	61,00%	18,00%

Fonte: AMBIENTAL, (2015).

3.2 Combustível Derivado de Resíduos

Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) são comumente denominados como a fração combustível dos RSU composta por materiais de moderada (como papel e papelão) e de difícil biodegradação (como plásticos, têxteis, madeira e couro) (FAZIL *et al.*, 2023).

No Brasil, a Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA), por meio da Resolução Nº 47 de 06 de agosto de 2020, define CDR como combustíveis alternativos preparados a partir de resíduos sólidos que possuem requisitos estabelecidos de Poder Calorífico Inferior (PCI), homogeneidade, granulometria, teor de umidade e estabilidade de modo que a sua utilização não cause prejuízos na produção, nos produtos e no meio ambiente superiores aos dos combustíveis convencionais (BRASIL, 2020).

A produção de CDR a partir de RSU é uma estratégia que contribui para a promoção de uma economia circular. Essa abordagem estabelece ciclos fechados de materiais e energia, ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de resíduos destinados a aterros, resultando em uma diminuição das emissões de gases de efeito estufa e da poluição dos recursos hídricos (MATEUS *et al.*, 2023).

3.2.1 Contexto legal e normativo

A PNRS permitiu que alguns estados criassem normas e legislação própria no que tange ao tratamento térmico de resíduos e coprocessamento. Além disso, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou algumas resoluções sobre o assunto (PIAIA, 2021). A Figura 7 mostra as normas que tratam sobre aproveitamento energético de resíduos sólidos e coprocessamento em fornos de produção de clínquer.

De acordo com a Resolução SIMA nº 047, de 06 de agosto de 2020, os CDR devem ser preparados a partir de RSU provenientes de diferentes fontes, como comércio, serviços, construção civil, indústrias e estações de tratamento de água e efluentes. Esses resíduos devem ser classificados como Classe II - Não Perigosos, seguindo a classificação estabelecida pela NBR 10004:2004 - Resíduos sólidos - Classificação.

Além disso, os CDR devem cumprir requisitos mínimos de PCI e teor de cloro em base seca, de acordo com os limites estipulados na resolução e em conformidade com o local de utilização do CDR. A Tabela 1 exemplifica alguns desses critérios:

Em 2020, A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou a NBR

Figura 7 – Recorte de quadro das normas brasileiras referentes ao tratamento térmico de resíduos, coprocessamento para produção de clínquer e emissões de poluentes atmosféricos.

Legislação	Conteúdo
Resolução CONAMA nº 264 de 26 de agosto de 1999.	Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos.
Rio Grande do Sul –Resolução CONSEMA 02 de 17 de abril de 2000.	Dispõe de norma sobre o licenciamento ambiental para coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.
Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002.	Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.
São Paulo –CETESB Norma Técnica P4-263 de dezembro de 2003.	Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer.
Resolução CONAMA nº 382 de 26 de dezembro de 2006.	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.
Paraná –Resolução SEMA nº 76 de 30 de novembro de 2009.	Estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético.
Minas Gerais –Deliberação Normativa DN 154 de 25 de agosto de 2010.	Dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.
Resolução CONAMA nº 436 de 26 de dezembro de 2011.	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007.
São Paulo –Resolução SIMA nº 38 de 31 de maio de 2017.	Estabelecem diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos –CDRU em Fornos de Produção de Clínquer.
ABNT –NBR 16.849 de 10 de fevereiro de 2020.	Estabelece os requisitos para aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos com ou sem incorporação de outros resíduos classe II –não perigosos, abrangendo os aspectos de elegibilidade de resíduos, registros e rastreabilidade, amostragem e formação dos lotes, armazenamento, preparo de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE), classificação dos lotes gerados e uso do RSU nas unidades de recuperação energética (URE), conforme a cadeia de custódia descrita na norma, respeitando a hierarquia de gestão e gerenciamento de resíduos.
São Paulo. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA). Resolução nº 047 de 6 de agosto de 2020.	Estabelece diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos -CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR.
Resolução CONAMA nº 499 de 6 de outubro de 2020.	Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer.

Fonte: Adaptado de PIAIA, (2021).

16849, que estabelece diretrizes e requisitos para o preparo dos Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos (RSUE). Essa norma abrange a preparação dos resíduos, incluindo a possibilidade de introdução de outros resíduos da classe II, e engloba conceitos como elegibilidade, registro, rastreabilidade, amostragem, criação de lotes, armazenagem, preparação e classifica-

Tabela 1 – Critérios para a utilização de CDR

Tipologia de fontes	PCI (kcal/Kg)	Teor de cloro (%)	Temperatura (°C)
Caldeiras industriais a biomassa entre 50 e 100 t/h de vapor	≥ 2300	≤ 0,3	≥ 500
Caldeiras industriais a biomassa >100 t/h de vapor	≥ 2300	≤ 0,6	≥ 550
Fornos de produção de clínquer	≥ 2775	≤ 1,0	NA
Pirólise	≥ 2300	NA	≥ 400
Gaseificação	≥ 2300	NA	≥ 750

Fonte: Adaptado de Brasil (2020).

ção dos lotes produzidos, levando em consideração a hierarquia da gestão dos resíduos e suas implicações ambientais.

Tabela 2 – Limites para classificação dos RSUE

Característica de classificação				
Unidade	Medida estatística	Classes		
PCI (base seca)		P1	P2	P3
kcal/kg	Limite inferior da média ($P \geq 95\%$)	PCI ≥ 4750	4750 > PCI ≥ 3580	3580 > PCI ≥ 2390
Teor de Cloro		C1	C2	C3
%	Limite superior da média ($P \geq 95\%$)	C1 ≤ 0,5	0,5 < C1 ≤ 1,5	1,5 < C1 ≤ 3,0
Teor de mercúrio		H1	H2	H3
mg/kg	Média aritmética	Hg ≤ 0,1	0,1 < Hg ≤ 0,25	0,25 < Hg ≤ 0,5
	Percentil de 80	HgP80 ≤ 0,2	0,2 < HgP80 ≤ 0,5	0,5 < HgP80 ≤ 1

Fonte: Adaptado de Brasil (2020).

Conforme estabelecido na NBR 16849, os limites indicados na Tabela 2 são determinados com base em análises estatísticas das três características a seguir:

- PCI na base seca: calculado a partir do limite inferior da média aritmética, considerando um intervalo de confiança de 95%;
- Quantidade de cloro: calculada a partir do limite superior da média aritmética, considerando um intervalo de confiança de 95%;
- Quantidade de mercúrio: calculada considerando a média aritmética e o percentil 80 do conjunto de amostras. A classe selecionada será aquela que apresentar o valor mais alto entre os dois parâmetros mencionados.

3.2.1.1 Poder Calorífico

O poder calorífico é a energia (bruta, líquida ou sob outra condição pré-definida) disponível em uma unidade de massa de um combustível e é geralmente expresso em unidades de energia (cal, kcal, J, kJ, kWh, BTU, etc.) divididas por unidades de massa (kg, lb, etc.). Ele pode ser classificado como Poder Calorífico Superior (PCS), ou PCI e, na literatura, esses valores costumam ser referidos como (upper/lower) heat value ou (gross/net) heat content (nos Estados Unidos) ou calorific value (na Europa e Ásia). É a partir do conjunto formado por um vaso de decomposição (bomba calorimétrica) e um calorímetro que a determinação do poder calorífico é realizada (POLI *et al.*, 2013).

O poder calorífico é classificado como superior quando a combustão da amostra se realiza a volume constante e a água gerada durante o processo é integralmente condensada. Em contrapartida, o poder calorífico é qualificado como inferior quando a combustão ocorre a pressão constante, isto é, à pressão atmosférica, resultando na não condensação da água formada (DOAT, 1977).

Segundo Doat (1977), o PCI pode ser calculado a partir do PCS por meio da seguinte equação:

$$PCI = PCS - 600(9H/100) \quad (3.1)$$

Onde PCI é o poder calorífico inferior (kcal/kg), PCS é o poder calorífico superior (kcal/kg) e H o teor de hidrogênio(% m/m), cujo valor encontra-se na faixa de 5 a 6% conforme valores encontrados na literatura para diversas biomassas (SANTOS; TAMBANI, 2019).

Assim, embora apresente uma maior proximidade com a realidade, é importante frisar que o PCI ainda representa um conceito matemático. Apesar da sua distância significativa em relação às condições reais, o PCI permanece como o parâmetro principal para a avaliação energética de combustíveis, enquanto os ajustes específicos às peculiaridades de cada sistema são realizados por meio de parâmetros operacionais distintos e das características particulares do RSU utilizado (POLI *et al.*, 2013).

3.3 Calorimetria de combustão

O termo "calorimetria", originado da combinação da palavra latina "calor" e grega "metron" (medir), refere-se à investigação da transferência de energia em processos físicos ou químicos. Joseph Black (1728-1799), um renomado cientista francês e considerado o fundador da calorimetria, foi o primeiro a fazer a distinção clara entre temperatura e calor, demonstrando como as medições de temperatura podem ser empregadas para determinar a quantidade de calor envolvida nesses processos (LAIDLER, 1993).

A calorimetria é uma área antiga da físico-química, com suas origens remontando ao dia 13 de junho de 1783, quando Lavoisier e Laplace apresentaram um trabalho intitulado "Memoire de la Chaleur" em uma sessão da Académie Française. Desde então, ao longo da história da calorimetria, uma série de métodos inovadores foram desenvolvidos e as técnicas de medição foram aprimoradas. Atualmente, inúmeros laboratórios ao redor do mundo continuam dedicando seus esforços em estudos na calorimetria, enquanto várias empresas especializadas se dedicam à produção de calorímetros (ZIELENKIEWICZ; MARGAS, 2006).

3.3.1 Princípios termodinâmicos básicos da calorimetria de combustão

Os princípios que fundamentam os procedimentos de calorimetria de combustão se baseiam na primeira lei da termodinâmica (BROWN; GALLAGHER, 2008):

$$U_f - U_i = \Delta U = Q - W \quad (3.2)$$

Uma vez que U_f e U_i representam as energias internas do sistema nos estados final e inicial, respectivamente; Q é a quantidade de calor liberada entre os estados inicial e final; e W é o trabalho realizado pelo sistema contra a pressão externa. Durante um experimento de combustão, o calor é medido sob volume constante, o que implica que $W = 0$. Sob tais circunstâncias:

$$Q_v = U_f - U_i = \Delta U \quad (3.3)$$

Assim, a quantidade de calor absorvida ou liberada pelo sistema para o ambiente a volume constante equivale à variação na energia interna do sistema. Para converter a variação de

energia determinada em um experimento de calorimetria de combustão de uma reação específica, Q_v , para a variação de entalpia a pressão constante, é essencial empregar a relação entre Q_v e Q_p :

$$Q_p = \Delta H = Q_v + p(V_f - V_i) = Q_v + \Delta nRT \quad (3.4)$$

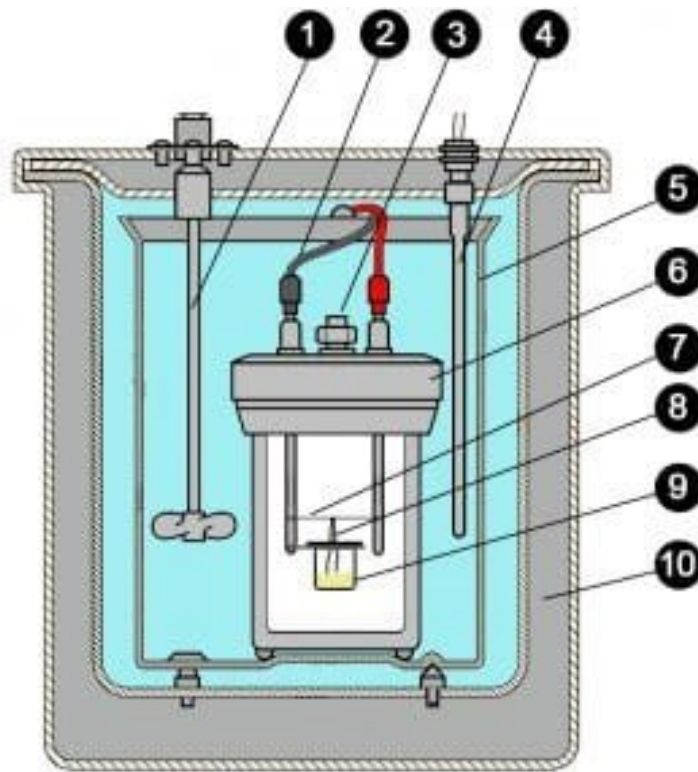
onde Δn representa a mudança no número de moles de gases durante a reação, R é a constante dos gases ($8.314472 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$) e T é a temperatura absoluta:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta nRT \quad (3.5)$$

3.3.2 Componentes de uma bomba calorimétrica

A Figura 8 apresenta uma representação esquemática de uma bomba calorimétrica, e a seguir são descritos seus componentes.

Figura 8 – Esquema dos componentes de uma bomba calorimétrica



Fonte: Biovera, (2020).

- a) Sistema de agitação (1) – acionado por um motor ou outro mecanismo, é utilizado para manter a água em constante movimento e promover a mistura necessária para homogeneizar sua temperatura. Alguns modelos empregam um conjunto mecânico composto por um eixo (com acoplamento magnético) e uma hélice, enquanto outros adotam a agitação magnética por meio de uma barra magnética posicionada no fundo do recipiente interno (ATWATER; SNELL, 1903; BIOVERA, 2020);
- b) Contatos do sistema de ignição (2) - são os componentes responsáveis por transmitir corrente elétrica ao fio de ignição (BIOVERA, 2020);
- c) Admissão de oxigênio (3) – nos modelos manuais, o vaso de decomposição é pressurizado manualmente fora do equipamento para permitir a entrada de oxigênio. Nos modelos automáticos, o equipamento realiza automaticamente a admissão de oxigênio, sem a necessidade de intervenção do usuário (BIOVERA, 2020);
- d) Sensor de temperatura (4) – é fundamental para o acompanhamento do perfil térmico ao longo do experimento. Ele deve ser capaz de medir pequenas diferenças de temperatura com alta precisão, uma vez que as medições constituem a principal fonte de erro nesse processo, medindo diferenças de temperatura com precisão de alguns milésimos de grau (ATWATER; SNELL, 1903; BIOVERA, 2020);
- e) Vaso interno (5) – é o local onde a bomba é imersa. Nesse espaço, ocorre a transferência de calor do corpo da bomba para a água contida nele, e a elevação da temperatura é medida por um sensor. O vaso interno deve ter uma capacidade adequada para manter a bomba completamente submersa na água além de incluir uma sonda para leitura da temperatura e um agitador para promover um rápido equilíbrio térmico, evitando a introdução de calor excessivo na forma de energia mecânica. Geralmente, tem um acabamento externo altamente polido para minimizar a absorção e emissão de calor radiante (BIOVERA, 2020; PARR, 2021);
- f) Vaso de decomposição ou bomba (6) – é um recipiente de aço com paredes espessas projetado para suportar a pressão de gás e a variação de temperatura durante a combustão. É um dispositivo de volume constante onde materiais combustíveis são queimados em oxigênio sob pressão. Ela deve ser construída com um recipiente metálico resistente, com paredes espessas, que possa ser aberto para a inserção da amostra, remoção dos produtos resultantes da combustão e limpeza. Ela contém uma válvula para o enchimento com oxigênio sob pressão e para liberar os gases residuais após a conclusão do teste e

eletrodos para conduzir corrente elétrica para o fio de ignição. Devido à possibilidade de desenvolvimento de uma pressão interna de cerca de 100 bar durante a combustão, a maioria das bombas de oxigênio é construída para suportar pressões de pelo menos 200 bar (ATWATER; SNELL, 1903; BIOVERA, 2020; JESSUP, 1960; PARR, 2021);

- g) Fio de ignição (7) – geralmente feito de níquel-cromo ou platina, é responsável por aquecer o suficiente para queimar o fio de algodão e provocar a ignição da amostra quando uma corrente elétrica é aplicada (BIOVERA, 2020);
- h) Fio de algodão (8) – é anexado ao fio de ignição e entra em contato com a amostra. Quando queimado pelo fio de ignição, desempenha o papel de um pavio, levando a amostra à combustão (BIOVERA, 2020);
- i) Cadinho de amostras (9) – é um recipiente projetado para acomodar amostras líquidas e sólidas. Ele está disponível em versões feitas de vidro e ligas metálicas (BIOVERA, 2020);
- j) Vaso externo ou jaqueta (10) – é utilizado com o objetivo de minimizar a troca de calor entre o ambiente e o sistema, a fim de reduzir os efeitos de correntes de ar, radiação térmica e variações na temperatura ambiente durante um teste. Sua função é criar uma camada isolante que ajuda a manter a temperatura do sistema mais estável e constante, evitando interferências externas indesejadas (BIOVERA, 2020; PARR, 2021).

3.3.3 Modos de operação

3.3.3.1 Adiabático

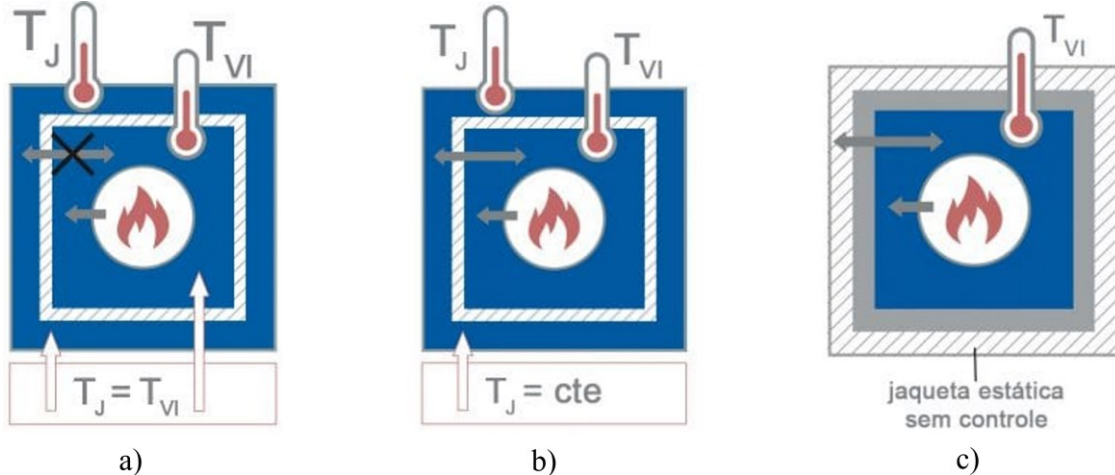
Nesse tipo de calorímetro, a Temperatura da Jaqueta (TJ) é controlada por meio de um banho termostático para minimizar a diferença em relação à Temperatura do Vaso Interno (TVI) ao longo de todo o processo de medição. Isso resulta em uma condição de "isolamento perfeito" ou sistema adiabático, onde as perdas de calor são evitadas. Essa abordagem elimina a necessidade de cálculos de correção para flutuações de temperatura, como observado nos calorímetros isoperibol (BIOVERA, 2020).

3.3.3.2 Isoperibólico

Nesse tipo de calorímetro, a TJ é regulada por meio de um banho termostático, garantindo sua constância ao longo de todo o processo de medição. Tanto TJ quanto TVI são

continuamente monitoradas com o objetivo de determinar as perdas de calor e, ao final, aplicar os cálculos corretivos necessários. Esse método de cálculo corretivo é conhecido como método de Regnault-Pfaundler, sendo assim, esse tipo de calorímetro é às vezes referido como isoperibol de Regnault-Pfaundler (BIOVERA, 2020).

Figura 9 – Esquemas de trocas de calor que ocorrem em calorímetros que operam nos modos adiabático (a), isoperibólico (b) e jaqueta estática (c)



Fonte: Adaptado de Biovera, (2020).

3.3.3.3 Jaqueta estática

Em bombas calorimétricas com este tipo de jaqueta, presume-se que a temperatura da jaqueta permanecerá constante ao longo do teste sem a necessidade de um sistema auxiliar de controle de temperatura. Devido à sua simplicidade, esses calorímetros são recomendados principalmente como instrumentos de baixo custo para usuários que realizam testes calorimétricos ocasionais ou cuja carga de trabalho não justifica a aquisição de um modelo com controle de temperatura. Um calorímetro de jaqueta simples não requer conexões permanentes. Ele pode ser rapidamente configurado e pronto para operação em poucos minutos e, quando não está em uso, pode ser facilmente desmontado para armazenamento (PARR, 2021).

3.3.4 Funcionamento de uma bomba calorimétrica

Após a correta instalação do equipamento e a separação de uma amostra representativa a ser analisada, uma pequena massa desta amostra é colocada em um cadinho metálico e pesada em uma balança analítica. Em seguida, o cadinho é colocado dentro da bomba. Antes de iniciar o experimento, uma quantidade conhecida de água é adicionada na bomba com o

objetivo de saturar o espaço com vapor de água. Isso é feito para garantir que a água formada como produto da reação seja completamente condensada. A bomba é conectada a eletrodos e um circuito de disparo elétrico. Os eletrodos são ligados por um fio metálico amarrado a um pedaço de linha de algodão, que entra em contato com a amostra permitindo a sua queima controlada dentro da bomba. O oxigênio é introduzido na bomba através de uma válvula, aumentando a pressão interna para 30 Pa. A bomba é então colocada dentro do calorímetro, que contém uma quantidade conhecida de água. Após a preparação do sistema, a amostra é queimada na bomba através do circuito de disparo elétrico. A queima completa da amostra libera calor, aumentando a temperatura tanto da bomba quanto da água do calorímetro. Uma vez que o sistema atinge um novo estado estável de temperatura, a medição é realizada utilizando um termômetro de alta precisão. A diferença de temperatura antes e depois da reação é usada para determinar a quantidade de energia liberada pela amostra (KALETUNÇ, 2009; MCLEAN, 1987).

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes (LARSE) do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC).

4.1 Amostras e reagentes

Os experimentos foram conduzidos utilizando frações de resíduos fornecidos pelo NUTEC. Essas frações incluíram pneus inservíveis de bicicletas e carros, folhas, cascas e sementes do Nim Indiano, cascas, folhas e cavacos de cajueiro, cavacos de algaroba, cascas de castanha, sarrafos de *Pinus* spp. e fragmentos de filamentos de Ácido Poliláctico (PLA).

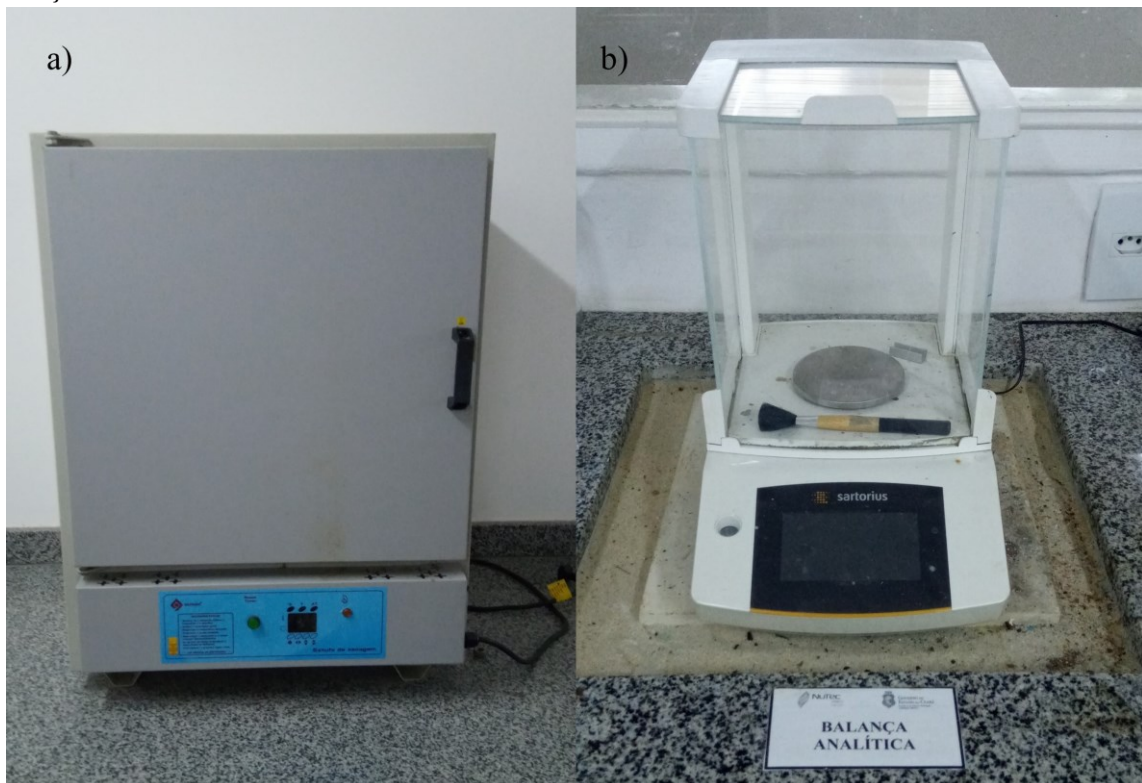
Figura 10 – Frações de resíduos. Folhas (a), sementes (b) e cascas (c) de Nim Indiano, pneus de bicicleta (d), banda de rodagem (e) e flancos (f) de pneu de carro, cavacos de algaroba (g), cascas de castanha (h), cavacos (i), cascas e folhas de cajueiro (j), sarrafos de *Pinus* spp. (k) e filamentos de PLA (l).



Fonte: Elaborado pelo autor.

As frações foram submetidas a um processo de secagem em uma estufa da marca Quimis, a uma temperatura de 105 °C, por um período de 24 horas. Uma vez retiradas da estufa, as frações foram moídas e, em seguida, pesadas com o auxílio de uma balança analítica da marca Sartorius. As massas pesadas variaram entre valores de 0,200 g e 0,600 g de acordo com o volume que ocuparam no cadinho metálico.

Figura 11 – Estufa (a) e balança analítica (b) utilizadas para secagem e pesagem das frações de amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Equipamento

O equipamento empregado para a determinação do PCS das amostras foi o calorímetro de combustão da marca IKA C200, ilustrado na Figura 12. Este equipamento possui uma faixa de medição máxima de 40000 J e operação limitada a temperaturas de até 50 °C e pressões de até 230 bar.

Dentre os modos de operação disponíveis, o modo isoperibólico foi escolhido para a realização dos experimentos e a medição foi feita de forma automatizada, seguindo os padrões dos calorímetros isoperibólicos em um processo que teve uma duração aproximada de 15 minutos.

Figura 12 – Calorímetro de combustão IKA C200 utilizado para a determinação de PCS das amostras analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Calibração do equipamento

Foi feita uma calibração prévia para viabilizar medições precisas no calorímetro. Esse processo envolveu a combustão de comprimidos contendo ácido benzóico certificado de poder calorífico conhecido. A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do sistema calorimétrico em um Kelvin foi, então, utilizada para determinar a capacidade calorífica do sistema, que foi calculada de acordo com a Equação 4.1 abaixo:

$$C = \frac{(H_o \cdot m + Q_{Ext1} + Q_{Ext2})}{DT} \quad (4.1)$$

Onde C é capacidade calorífica do sistema, H_o é o poder calorífico, m é a massa da amostra combustível, Q_{Ext1} é o valor de correção da energia liberada pelo barbante de algodão durante a ignição, Q_{Ext2} é o valor de correção da energia liberada por outros materiais que auxiliam a combustão.

4.4 Determinação do poder calorífico superior

Depois da calibração do equipamento e da pesagem das amostras, foram adicionados 5 mL de água destilada no interior do recipiente metálico e os cadinhos de aço inoxidável foram colocados no seu interior, de forma que o barbante amarrado ao fio de ignição estivesse em contato com as amostras. Em seguida, o recipiente foi fechado com uma porca de união e levado à estação de gás onde foi pressurizado com oxigênio ultrapuro a 25 bar.

Figura 13 – Etapas de preparação da bomba para a pressurização com oxigênio ultrapuro na estação de gás



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez pressurizado, o recipiente metálico foi colocado dentro do calorímetro, que foi abastecido com dois litros de água. Em seguida, a tampa do calorímetro foi fechada e as configurações para o início dos experimentos foram ajustadas. A unidade de poder calorífico escolhida para o resultado dos experimentos foi a de MJ/kg e os valores foram obtidos em triplicata e calculados pelo equipamento por meio da Equação 4.2 adaptada da Equação 4.1:

$$H_o = \frac{(C \cdot DT - Q_{Ext1} - Q_{Ext2})}{m} \quad (4.2)$$

Com os dados de PCS em mãos, foi possível estimar o PCI dos materiais analisados utilizando a equação 3.1 e os valores de teor de hidrogênio da literatura.

5 RESULTADOS

Na Tabela 3 estão registrados os valores encontrados de PCS para as frações das amostras estudadas neste trabalho.

Tabela 3 – Resultados experimentais de PCS

Fração	Amostra	PCS (MJ/kg)	Média (MJ/kg)
Pneu de bicicleta	1	33,511	33,292
	2	33,447	
	3	33,618	
Pneu de carro (banda de rodagem)	1	37,762	37,534
	2	37,68	
	3	37,949	
Pneu de carro (flancos)	1	33,764	33,462
	2	33,486	
	3	33,839	
Folhas do Nim Indiano	1	7,863	8,004
	2	8,126	
	3	8,19	
Casca do Nim Indiano	1	17,231	16,927
	2	16,913	
	3	16,991	
Sementes do Nim Indiano	1	22,518	22,873
	2	23,517	
	3	22,585	
Casca e folhas de cajueiro	1	14,642	14,634
	2	14,783	
	3	14,477	
Cavacos de algaroba	1	18,053	17,768
	2	17,623	
	3	17,628	
Casca de castanha	1	24,425	23,099
	2	22,665	
	3	22,206	
Cavacos de cajueiro	1	17,707	17,634
	2	17,615	
	3	17,579	
Sarrafos de Pinus spp.	1	17,479	17,122
	2	17,431	
	3	16,457	
PLA	1	19,498	19,455
	2	19,399	
	3	19,469	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores médios de PCS obtidos para os pneus de bicicleta, a banda de rodagem e os

flancos de pneus de carro foram de 33,292 MJ/kg, 37,534 MJ/kg e 33,462 MJ/kg, respectivamente. Em relação aos valores médios de PCI, foram registrados como 31,706 MJ/kg, 35,948 MJ/kg e 31,876 MJ/kg, respectivamente. Resultados similares foram obtidos por Akkapedi (2008) para raspas de pneus, variando entre 33,650 MJ/kg e 38,970 MJ/kg, indicando o alto potencial calorífico desses resíduos, tornando-os eficazes como combustíveis alternativos.

No entanto, Neto *et al.* (2023) identificaram médias de PCS de 18,791 MJ/kg e 22,913 MJ/kg para as frações de sementes e folhas de Nim Indiano, respectivamente. Embora o valor de PCS para sementes de Nim Indiano neste estudo tenha sido semelhante (22,873 MJ/kg), o PCS das folhas foi consideravelmente mais baixo (8,004 MJ/kg). Essa disparidade pode ser atribuída à diferença de umidade entre as amostras.

Ponte *et al.* (2019) reportaram valor de PCS de 17,40 MJ/kg para amostras de podas de cajueiro, similar ao obtido neste estudo de 17,634 MJ/kg, demonstrando o potencial desse material como CDR.

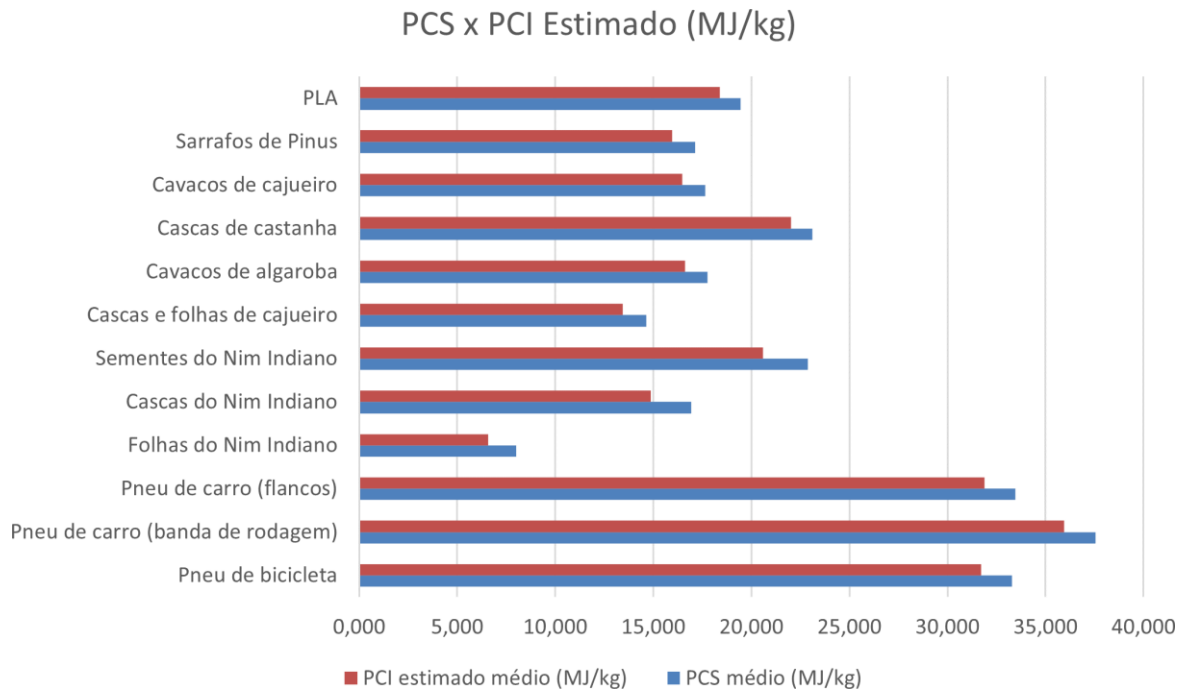
Paiva e Filho (2023) identificaram um PCI médio de 4745,23 kcal/kg para cascas de castanha de caju, ligeiramente inferior ao PCI encontrado neste estudo, de 5261,6 kcal/kg. Em ambos os estudos, o desvio padrão foi considerável, sugerindo falta de homogeneidade entre as amostras, provavelmente devido às disparidades de umidade, o que pode explicar as discrepâncias nos resultados.

Tavares e Tavares (2015) estimaram o PCI para a lenha de algaroba, obtendo um valor de 4611 kcal/kg, próximo aos valores obtidos para os cavacos de algaroba neste estudo.

Carvalho *et al.* (2020) investigaram o poder calorífico dos cavacos de *Pinus* spp. em diversas condições de armazenamento para avaliar possíveis ganhos energéticos. Ao preparar e armazenar pilhas de cavacos em solo coberto e sob telha de fibrocimento de 6 mm, observaram que o poder calorífico variava de 3000 a 4000 kcal/kg ao longo de sete semanas, valores comparáveis aos observados para os sarrafos de *Pinus* spp. neste estudo.

O PCI das amostras foi estimado utilizando os dados de teor de hidrogênio de Neto *et al.* (2023), Faria (2021), Pearson (1993) e Santos e Tambani (2019). A Figura 14 mostra a comparação entre os valores médios de PCS e de PCI para cada amostra. Em geral, a diferença entre esses valores ficou na faixa de 4% a 10%, exceto as folhas e cascas do Nim Indiano que apresentaram diferenças na faixa de 17,7% e 12,2% respectivamente. Essas diferenças evidenciam a importância de se conhecer os valores de PCI dos combustíveis, pois eles se aproximam mais dos valores reais, sendo mais relevantes para aplicações práticas.

Figura 14 – PCS X PCI Estimado



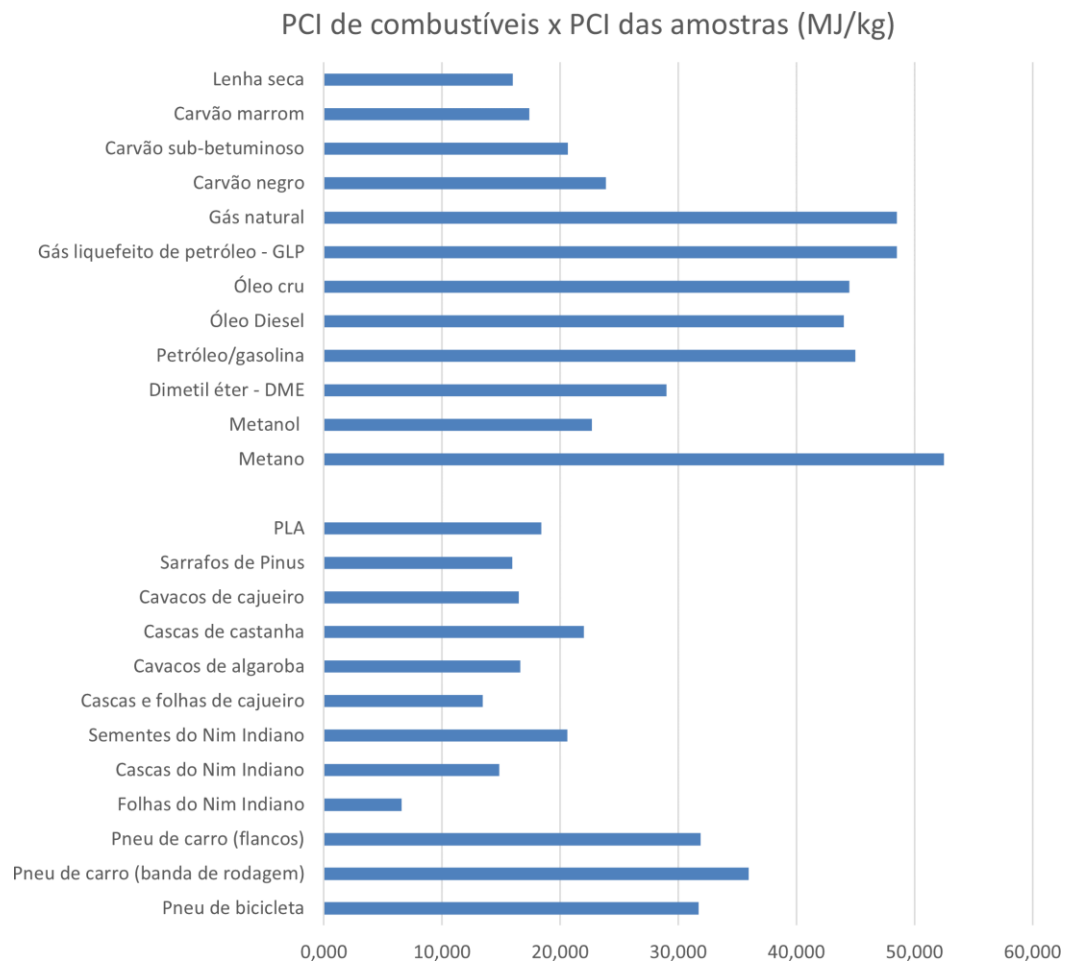
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 15, foi realizada uma comparação entre os valores de PCI das amostras de resíduos e os valores de PCI de alguns combustíveis convencionais listados pela World Nuclear Association. Ao analisar a Figura 15, observou-se que os valores de PCI das amostras de sementes de Nim Indiano, cavacos de algaroba, cascas de castanha, cavacos de cajueiro, sarrafos de *Pinus* spp. e PLA são comparáveis aos valores de PCI de lenha seca, carvão marrom, carvão sub-betuminoso, carvão negro e metanol. Por outro lado, os valores de PCI das amostras de pneus de bicicleta e de carro excederam o do dimetil éter. Contudo, o PCI dessas amostras foi consideravelmente inferior aos do metano e dos combustíveis fósseis, como petróleo, óleo diesel, óleo cru, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e gás natural. Apesar disso, a utilização dessas amostras como CDR pode contribuir para a diversificação da matriz energética e para aprimorar a gestão de resíduos.

A análise estatística dos dados, mostrada na Tabela 4, revela que a dispersão dos valores em torno da média para as amostras de sementes do Nim Indiano, cascas de castanha e sarrafos de *Pinus* spp. foi relativamente alta, indicada pelo desvio padrão maior que 0,25. Esse valor, estabelecido pela norma NBR 11956/90, sugere uma variabilidade considerável nos valores de PCI para essas amostras.

Além disso, observou-se que ao calcular o intervalo de confiança para um nível de

Figura 15 – PCI de combustíveis X PCI das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança dos valores estimados de PCI

Material analisado	PCI (MJ/kg)	Desvio padrão	IC (95%)
Pneu de bicicleta	31,706	0,086	31,493 - 31,920
Pneu de carro (banda de rodagem)	35,948	0,137	35,608 - 36,288
Pneu de carro (flancos)	31,876	0,185	31,417 - 32,335
Folhas do Nim Indiano	6,584	0,172	6,157 - 7,012
Cascas do Nim Indiano	14,865	0,165	14,456 - 15,274
Sementes do Nim Indiano	20,594	0,555	19,216 - 21,971
Cascas e folhas de cajueiro	13,449	0,155	13,064 - 13,834
Cavacos de algaroba	16,621	0,25	16,000 - 17,241
Cascas de castanha	22,015	1,185	19,071 - 24,960
Cavacos de cajueiro	16,485	0,067	16,319 - 16,651
Sarrafos de <i>Pinus</i> spp.	15,967	0,584	14,518 - 17,417
PLA	18,396	0,052	18,268 - 18,524

Fonte: Elaborado pelo autor.

confiança de 95%, os valores médios de PCI das amostras analisadas ficaram dentro dos seus respectivos limites inferiores e superiores, ou seja, há um forte indício de que as verdadeiras

médias de poder calorífico estejam contidas nesses intervalos.

Tabela 5 – Valores médios de PCS e PCI em MJ/kg e valor médio de PCI em kcal/kg

Fração	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	PCI (kcal/kg)
Pneu de bicicleta	33,292	31,706	7577,8
Pneu de carro (banda de rodagem)	37,534	35,948	8591,7
Pneu de carro (flancos)	33,462	31,876	7618,4
Folhas do Nim Indiano	8,004	6,584	1573,6
Cascas do Nim Indiano	16,927	14,865	3552,7
Sementes do Nim Indiano	22,873	20,594	4921,9
Cascas e folhas de cajueiro	14,634	13,449	3214,4
Cavacos de algaroba	17,768	16,621	3972,4
Cascas de castanha	23,099	22,015	5261,6
Cavacos de cajueiro	17,634	16,485	3939,9
Sarrafos de <i>Pinus</i> spp.	17,122	15,967	3816,2
PLA	19,455	18,396	4396,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a NBR 16849:2020, foi constatado que as frações correspondentes aos pneus de bicicleta, pneus de carro, sementes do Nim Indiano e cascas de castanha se enquadram na classe P1, exibindo valores de PCI superiores a 4750 kcal/kg. Por outro lado, cavacos de algaroba, cavacos de cajueiro, sarrafos de *Pinus* spp. e PLA são classificados como pertencentes à classe P2, apresentando valores de PCI inferiores a 4750 kcal/kg e superiores a 3580 kcal/kg. Por fim, as cascas do Nim Indiano e as cascas e folhas de cajueiro são categorizadas na classe P3, com valores de PCI inferiores a 3580 kcal/kg e superiores a 2390 kcal/kg. Essa análise destaca o potencial desses materiais como CDR.

Além disso, de acordo com a Resolução SIMA nº 047, de 06 de agosto de 2020, a maioria das amostras analisadas demonstrou potencial para serem empregadas como CDR, uma vez que seus valores de PCI excederam os limites mínimos de aplicação de 2300 kcal/kg em caldeiras industriais, processos de pirólise e gaseificação, e de 2775 kcal/kg em fornos de produção de clínquer. A única exceção foi a amostra de folhas do Nim Indiano, cujo valor de PCI foi de 1573,6 kcal/kg, situando-se abaixo dos limites estabelecidos para aplicação direta conforme os critérios da resolução mencionada.

Segundo Poli *et al.* (2013), as variações encontradas nos resultados podem ser atribuídas a uma série de fatores, como a composição e heterogeneidade dos RSU, o processo de coleta e armazenamento das amostras, dificuldades de amostragem e eventual descaracterização ou modificação das amostras durante o preparo para os ensaios, tais como perda de voláteis durante a secagem, perdas físicas e alterações de propriedades durante a moagem.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, evidenciou-se que resíduos como pneus de bicicleta, bandas de rodagem e flancos de pneus de carro, cascas e sementes do Nim Indiano, cascas, folhas e cavacos de cajueiro, cavacos de algaroba, cascas de castanha, sarrafos de *Pinus* spp e plásticos PLA são viáveis para uso como CDR em caldeiras industriais, processos de pirólise e gaseificação, e em fornos de produção de clínquer. Contudo, destaca-se que apenas as folhas do Nim Indiano demonstraram um PCI desfavorável (1573,6 kcal/kg), tornando sua utilização inviável em tais processos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que a determinação do PCI seja realizada por meio de experimentos e com um maior número de replicatas, considerando potenciais influências dos ácidos formados durante a combustão das amostras. Além disso, sugere-se a avaliação dos parâmetros de teor de cloro e mercúrio, conforme especificado na norma NBR 16849:2020, juntamente a outros fatores relevantes, como teor de umidade e cinzas, a fim de classificar os combustíveis de forma mais abrangente.

REFERÊNCIAS

- ABREMA - Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 17 de setembro de 2024.
- AKKAPEDDI, S. **Alternative solid fuels for the production of Portland cement**. Tese (Doutorado), 2008.
- AMARO, A. B.; VERDUM, R. Política nacional de resíduos sólidos e suas interfaces com o espaço geográfico: entre conquistas e desafios. *Letra1*, 2016.
- AMBIENTAL, G. E. **Panorama dos Resíduos Sólidos do Ceará**. v. 3. [S. l.]: Fortaleza, 2015.
- ARRUDA, M. F. de A.; TREVIZAN, A. F. C. 1.3 governança na gestão de resíduos sólidos no Brasil. **Gampe/UFRPE Recife, 2023 1ª edição**, p. 36, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16849**: Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ATWATER, W.; SNELL, J. Description of a bomb-calorimeter and method of its use. **Journal of the American Chemical Society**, ACS Publications, v. 25, n. 7, p. 659–699, 1903.
- BERTICELLI, R.; PANDOLFO, A.; KORF, E. P. Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: perspectivas e desafios. **Revista gestão & sustentabilidade ambiental**, v. 5, n. 2, p. 711–744, 2016.
- BIOVERA. **O Que é um Calorímetro/Bomba Calorimétrica?** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.biovera.com.br/o-que-e-um-calorimetro-bomba-calorimetrica/>. Acesso em: 18 de setembro de 2024.
- BISPO, L. M.; NASCIMENTO, J. F. do; SANTOS, M. S. T. O uso da prospecção como ferramenta na busca de tecnologias de gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil. **Cadernos de Prospecção**, v. 12, n. 2, p. 439–439, 2019.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, DF, ago. 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 12 nov. 2023.
- BROWN, M. E.; GALLAGHER, P. K. **Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry: Recent Advances, Techniques and Applications**. 5th. ed. Amsterdam: Elsevier, 2008. 780 p.
- CARVALHO, D. E.; SCHROEDER, F.; FRANÇA, R. F.; SILVA, D. A. D. Qualidade energética de cavacos de pinus spp. em diferentes condições de armazenamento. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 35, n. 2, p. 236–245, 2020.
- DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. **Bois & Forêts des Tropiques**, v. 172, p. 33–55, 1977.

EFING, A. C.; SILVA, J. F. M. da. O enfrentamento de geração e destinação inadequada dos resíduos sólidos sob o viés ambiental e o consumo consciente. **Revista da Faculdade de Direito do Sul de Minas**, v. 36, n. 1, 2020.

FARIA, L. M. G. **Avaliação da Biodegradabilidade de Cápsulas de café Constituídas por Polímeros Biodegradáveis**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho (Portugal), 2021.

FAZIL, A.; KUMAR, S.; MAHAJANI, S. M. Gasification and co-gasification of paper-rich, high-ash refuse-derived fuel in downdraft gasifier. **Energy**, Elsevier, v. 263, p. 125659, 2023.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Cartilha de orientações: estudo gravimétrico de resíduos sólidos urbanos**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2019. 27 p.

JESSUP, R. S. **Precise measurement of heat of combustion with a bomb calorimeter**. [S. l.]: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1960. v. 7.

KALETUNÇ, G. **Calorimetry in food processing: analysis and design of food systems**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2009.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; WOERDEN, F. V. **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. [S. l.]: World Bank Publications, 2018.

LAIDLER, K. J. **The world of physical chemistry**. [S. l.]: Oxford University Press, 1993.

MAIELLO, A.; BRITTO, A. L. N. d. P.; VALLE, T. F. Implementação da política nacional de resíduos sólidos. **Revista de Administração Pública**, SciELO Brasil, v. 52, p. 24–51, 2018.

MATEUS, M. M.; CECÍLIO, D.; FERNANDES, M. C.; CORREIA, M. J. N. Refuse derived fuels as an immediate strategy for the energy transition, circular economy, and sustainability. **Business Strategy and the Environment**, Wiley Online Library, 2023.

MCLEAN, J. **Animal and human calorimetry**. [S. l.]: Cambridge university press. New York, 1987.

NETO, F. S.; NETA, M. M.; SOUSA, A.; DAMASCENO, L.; SOUSA, B.; MEDEIROS, S.; MELO, R.; LOPES, A.; SANTOS, J.; RIOS, M. Analysis of the fuel properties of the seed shell of the neem plant (*azadirachta indica*). **Processes**, MDPI, v. 11, n. 8, p. 2442, 2023.

PAIVA, J. M. de; FILHO, R. dos S. F. Reaproveitamento de resíduo agroindustrial do beneficiamento da castanha de caju em processos de geração de calor. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 1, p. 3010–3023, 2023.

PARR. **Introduction to Bomb Calorimetry**. [S. l.], 2021. Disponível em: https://www.parrinst.com/wp-content/uploads/downloads/2013/07/483M_Parr_Intro-to-Bomb-Calorimetry.pdf. Acesso em: 18 de setembro de 2024.

PEARSON, W. The mc graw-hill recycling handbook, edit. **Mc Graw-Hill Inc.(HF. Lund)**, New York, Estados Unidos de Norteamérica, **Capítulo**, v. 14, p. 1–32, 1993.

PIAIA, E. **Uso de rejeitos da coleta seletiva de materiais recicláveis para produção de combustível derivado de resíduos - CDR**. 2021. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental: Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

- POLI, D. d. C. R.; ZANCHETA, M. N.; BOARI, Z. de M.; MELDONIAN, N. L.; MOURA, C. L. de; JIURGIU, P. A. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Revista de ciências exatas e tecnologia**, v. 8, n. 8, p. 9–31, 2013.
- PONTE, M. R.; GADELHA, A. M. T.; MACHADO, Y. d. L.; LOPES, A. A. S.; MALVEIRA, J. Q.; MAZZETTO, S. E.; LOMONACO, D.; RIOS, M. A. d. S. Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 24, p. e12372, 2019.
- SANTOS, J. L. D.; TAMBANI, P. C. Potencial energético de diferentes biomassas disponíveis no brasil. In: **IV Congresso Internacional de Biomassa. Curitiba. Anais do CIBIO**. [S. l.: s. n.], 2019. v. 4, p. 616–621.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resolução SIMA 047/2020**. 2020. São Paulo: Diário Oficial do Estado de São Paulo.
- SILVA, A. R. da; CHAVES, G. d. L. D.; GHISOLFI, V. Os obstáculos para uma efetiva política de gestão dos resíduos sólidos no brasil. **Veredas do Direito–Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 26, p. 211–234, 2016.
- TAVARES, M. A. d. M. E.; TAVARES, S. d. L. Precificação da energia disponível no briquete de carnaúba e capim-elefante e na lenha do semiárido potiguar. *Holos*, Natal, ano 31, v. 5, p. 271-177, 2015., 2015.
- ZIELENKIEWICZ, W.; MARGAS, E. **Theory of calorimetry**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2006. v. 2.